FABIANA TAKEBAYASHI

Um modelo de localização-roteirização de instalações
de transferência para distribuição de carga urbana
baseado no método de *cluster-first route-second*

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Área de concentração:
Engenharia de Sistemas Logísticos

Orientador:
Prof. Dr. Antonio Galvão N. Novaes

São Paulo
2015

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Antonio Galvão N. Novaes, pelo inestimável auxílio.

Ao Prof. Dr. Cláudio Barbieri da Cunha pelo direcionamento pragmático e rigoroso.

À Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, pela minha formação abrangente em Engenharia e pela possibilidade de desenvolvimento deste trabalho.

Ao Dr. Sergio Henrique Demarchi, pelo estímulo ao desenvolvimento acadêmico e por todo o apoio e conselhos dados durante este processo, com seu grande conhecimento e experiência da área de transportes.

Ao Rubens Augusto de Almeida Júnior, por ser uma referência não apenas na minha vida profissional, mas também por ser uma pessoa que considero como se fosse parte de minha família.

A Wagner Colombini Martins e Diogo Barreto da LOGIT, pelo apoio que me deram para conclusão deste mestrado.

Ao Eduardo, por manter meu computador funcionando.

A Benjamin e Adam por me ajudar com as disciplinas de programação linear. Aos meus outros amigos Arthur, Mari, Luiz, Zingler, Mario Sergio e Andre, que de uma forma ou de outra também me auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, ao meu marido Jonas Malaco Filho pelo apoio didático e emocional, não só durante o mestrado. Agradeço por todas suas explicações sobre diversos assuntos técnicos e *geeks*, pelas palavras de incentivo e por me ajudar no dia a dia para que eu conseguisse finalizar este trabalho.

RESUMO

O trabalho apresenta o desenvolvimento e a aplicação de um modelo de localização de centros intermediários de consolidação e redistribuição de cargas em um ambiente urbano brasileiro. O método integra o TransCAD e o OpenSolver e é aplicado à cidade de Curitiba, uma das dez mais populosas do Brasil.

O método proposto é caracterizado como um modelo de localização-roteirização baseado em agrupamento e subsequente roteirização, identificado na literatura por *cluster-first route-second*; a adoção deste ordenamento permite tratar o problema para o atendimento de muitos estabelecimentos, como os até 65 mil em alguns dos cenários no estudo de caso de Curitiba.

Cada agrupamento representa os pontos a serem visitados em uma única viagem e o processo inicial tenta minimizar as distâncias entre os estabelecimentos de cada grupo; na fase seguinte o melhor roteiro é computado para cada grupo; a terceira etapa consiste em calcular, para cada grupo e candidato, a distância total percorrida na viagem; por fim, a implantação ou não dos candidatos a centros de distribuição é obtida com a minimização em um modelo de programação linear inteira dos custos de aquisição e de operação dos centros de distribuição e dos custos de transportes.

A dissertação também aborda a crescente percepção da importância da logística urbana à qualidade de vida nas cidades onde o adensamento populacional acirra a disputa pelo espaço viário e o conceito de *City Logistics*, que delineia entre outras medidas o ambiente cooperativo no qual implantação de centros de distribuição urbanos deve ocorrer.

Palavras-chave: Logística urbana, localização de instalações, roteirização de veículos, agrupamento capacitado, programação linear inteira.

ABSTRACT

This work presents the development and application of a model for the location of intermediary consolidation and redistribution freight centers in Brazilian cities. The method integrates TransCad and OpenSolver, and its use was evaluated with data from the City of Curitiba – one of the ten largest in Brazil.

The proposed method is characterized as a location-routing model based on clustering and subsequent tour building known as cluster-first route-second. This enables dealing with problem instances containing as many as 65 thousand customers.

Each cluster comprehends the points visited on a single trip and the initial process minimizes the distances between customers; the routes are calculated in the next phase and the third step consists in computing the total distance covered in each trip for every cluster and every candidate; finally, the implementation of each distribution center candidate is decided by minimizing the costs of acquisition, operation and distribution, using an integer linear programming model.

The dissertation also highlights the growing realization of the importance of urban freight transport to quality of life, especially in cities where increasing population density intensifies the competition for road space, and City Logistics concepts, that outline among other measures the cooperative environment where implementation of urban distribution centers should occur.

Keywords: Urban freight transport, City Logistics, facility location, vehicle routing, capacitated clustering, integer linear programming.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Agentes atuantes na logística urbana	23
Figura 2.2 – Pilares de <i>City Logistics</i>	26
Figura 2.3 – Pontos inteligentes de entrega	37
Figura 2.4 – Resumo da evolução da logística urbana e perspectivas para a Europa e Brasil ..	46
Figura 3.1 – Exemplo de um sistema de distribuição com dois níveis de CDs	53
Figura 3.2 – (a) Exemplo de método de <i>cluster-first route-second</i>	54
Figura 4.1 – Etapas do modelo proposto	59
Figura 4.2 – Exemplo da primeira etapa: agrupamento dos clientes	59
Figura 4.3 – Exemplo da segunda etapa: roteirização de cada grupo de clientes	60
Figura 4.4 – Exemplo da quarta etapa: cálculo da distância entre cada grupo de clientes e local candidato a CDU	60
Figura 4.5 – Exemplo do resultado final	61
Figura 4.6 – Fases da heurística adotada para resolução do CCP	63
Figura 4.7 – Exemplo de sobreposição de <i>clusters</i> para CCP	65
Figura 4.8 – Caixa de diálogo para preenchimento dos dados de entrada para a ferramenta de <i>Clustering</i> do TransCAD	65
Figura 4.9 – Tabela de resultados da ferramenta de <i>Clustering</i> do TransCAD (<i>Assignment table</i>)	66
Figura 4.10 – Tabela de resultados da ferramenta de <i>Clustering</i> do TransCAD (<i>Cluster table</i>)	66
Figura 4.11 – Sumário dos resultados da ferramenta de <i>Clustering</i> do TransCAD	67
Figura 4.12 – Caixa de diálogo para preenchimento dos dados de entrada de operação para a ferramenta de <i>Vehicle Routing Problem</i> do TransCAD	70
Figura 4.13 – Caixa de diálogo para preenchimento dos dados de entrada de depósito para a ferramenta de <i>Vehicle Routing Problem</i> do TransCAD	71
Figura 4.14 – Caixa de diálogo para preenchimento dos dados de entrada de paradas para a ferramenta de <i>Vehicle Routing Problem</i> do TransCAD	72
Figura 4.15 – Caixa de diálogo para preenchimento dos dados de entrada da matriz de custo para a ferramenta de <i>Vehicle Routing Problem</i> do TransCAD	73
Figura 4.16 – Caixa de diálogo para preenchimento dos dados de entrada da frota de veículos para a ferramenta de <i>Vehicle Routing Problem</i> do TransCAD	74
Figura 4.17 – Caixa de diálogo para preenchimento dos dados de entrada do OpenSolver	76

Figura 5.1 – Região Metropolitana de Curitiba.....	78
Figura 5.2 – Malha rodoviária de Curitiba	79
Figura 5.3 – Localização dos estabelecimentos considerados no estudo de caso	87
Figura 5.4 – Localização dos CDUs candidatos para o estudo de caso.....	92
Figura 5.5 – Rede viária de Curitiba.....	98
Figura 5.6 – Problemas de conectividade da rede viária	99
Figura 5.7 – Variação dos custos em função do aumento da quantidade de <i>clusters</i> para.....	104
Figura 5.8 – Resultado do procedimento de <i>Clustering</i> para o cenário com 30% de demanda e 47% de adesão do mercado	105
Figura 5.9 – Variação da quantidade de <i>clusters</i> por faixa de custo ao decorrer das iterações para	106
Figura 5.10 – Variação da quantidade de <i>clusters</i> por faixa de quantidade de elementos nos <i>clusters</i> ao decorrer das iterações para (a) Cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 246 <i>clusters</i>	107
Figura 5.11 – Variação da quantidade de <i>clusters</i> por faixa de tamanho dos <i>clusters</i> ao decorrer das iterações para (a) Cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 246 <i>clusters</i>	108
Figura 5.12 – Variação do custo em função das iterações para o cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 246 <i>clusters</i>	109
Figura 5.13 – Variação do custo em função das iterações para o cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 260 <i>clusters</i>	110
Figura 5.14 – Variação do custo em função das iterações para o cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 300 <i>clusters</i>	111
Figura 5.15 – Variação do custo em função das iterações para o cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 350 <i>clusters</i>	112
Figura 5.16 – Variação do custo em função das iterações para o cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 400 <i>clusters</i>	113
Figura 5.17 – Rotina simplificada para roteirização dos <i>clusters</i> no TransCAD.....	114
Figura 5.18 – Variação do custo total (distância total) obtida na fase de <i>clustering</i> e na fase de roteirização	116
Figura 5.19 – Variação do tempo computacional em função da quantidade de <i>clusters</i> de cada cenário simulado.....	118
Figura 5.20 – Rota de um <i>cluster</i> do cenário cen30-ad47-cl246-it100	118

Figura 5.21 – Exemplo do modelo de planilha utilizado para montar o modelo de localização dos CDUs.....	119
Figura 5.22 – Variação do custo total em função da quantidade de <i>clusters</i> dos cenários de menor custo	120
Figura 5.23 – Custos diários por tonelada movimentada dos cenários simulados	122
Figura 6.1 – Etapas do modelo proposto	128
Figura B.1 – Variação do custo em função das iterações para o cenário com 30% de demanda e 60% de adesão do mercado.....	143
Figura B.2 – Variação do custo em função das iterações para o cenário com 30% de demanda e 82% de adesão do mercado.....	144
Figura B.3 – Variação do custo em função das iterações para o cenário com 30% de demanda e 100% de adesão do mercado.....	145
Figura B.4 – Variação do custo em função das iterações para o cenário com 60% de demanda e 47% de adesão do mercado.....	146
Figura B.5 – Variação do custo em função das iterações para o cenário com 60% de demanda e 60% de adesão do mercado.....	147
Figura B.6 – Variação do custo em função das iterações para o cenário com 60% de demanda e 82% de adesão do mercado.....	148
Figura B.7 – Variação do custo em função das iterações para o cenário com 60% de demanda e 100% de adesão do mercado.....	149
Figura B.8 – Variação do custo em função das iterações para o cenário com 100% de demanda e 47% de adesão do mercado.....	150
Figura B.9 – Variação do custo em função das iterações para o cenário com 100% de demanda e 60% de adesão do mercado.....	151
Figura B.10 – Variação do custo em função das iterações para o cenário com 100% de demanda, 82% de adesão do mercado e 1181 <i>clusters</i>	152
Figura B.11 – Variação do custo em função das iterações para o cenário com 100% de demanda, 82% de adesão do mercado e 1182 <i>clusters</i>	153
Figura B.12 – Variação da quantidade de <i>clusters</i> por faixa de custo ao decorrer das iterações para	155
Figura B.13 – Variação da quantidade de <i>clusters</i> por faixa de quantidade de elementos nos <i>clusters</i> ao decorrer das iterações para (a) Cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 246 <i>clusters</i>	155

Figura B.14 – Variação da quantidade de <i>clusters</i> por faixa de tamanho dos <i>clusters</i> ao decorrer das iterações para (a) Cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 246 <i>clusters</i>	156
Figura B.15 – Variação do custo em função das iterações para o cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 246 <i>clusters</i>	157
Figura B.16 – Variação do custo em função das iterações para o cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 260 <i>clusters</i>	158
Figura B.17 – Variação do custo em função das iterações para o cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 300 <i>clusters</i>	159
Figura B.18 – Variação do custo em função das iterações para o cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 350 <i>clusters</i>	160
Figura B.19 – Variação do custo em função das iterações para o cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 400 <i>clusters</i>	161
Figura B.20 – Variação da quantidade de <i>clusters</i> por faixa de custo ao decorrer das iterações para	162
Figura B.21 – Variação da quantidade de <i>clusters</i> por faixa de quantidade de elementos nos <i>clusters</i> ao decorrer das iterações para (a) Cenário com 100% de demanda, 100% de adesão do mercado e 1437 <i>clusters</i> / (b) Cenário com 100% de demanda, 100% de adesão do mercado e 1700 <i>clusters</i>	163
Figura B.22 – Variação da quantidade de <i>clusters</i> por faixa de tamanho dos <i>clusters</i> ao decorrer das iterações para (a) Cenário com 100% de demanda, 100% de adesão do mercado e 1437 <i>clusters</i>	163
Figura B.23 – Variação do custo em função das iterações para o cenário com 100% de demanda, 100% de adesão do mercado e 1437 <i>clusters</i>	164
Figura B.24 – Variação do custo em função das iterações para o cenário com 100% de demanda, 100% de adesão do mercado e 1450 <i>clusters</i>	165
Figura B.25 – Variação do custo em função das iterações para o cenário com 100% de demanda, 100% de adesão do mercado e 1500 <i>clusters</i>	166
Figura B.26 – Variação do custo em função das iterações para o cenário com 100% de demanda, 100% de adesão do mercado e 1600 <i>clusters</i>	167
Figura B.27 – Variação do custo em função das iterações para o cenário com 100% de demanda, 100% de adesão do mercado e 1700 <i>clusters</i>	168

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Medidas para melhoria da logística urbana: área de mobilidade.....	26
Tabela 2.2 – Medidas para melhoria da logística urbana: oferta de infraestrutura e uso do solo	27
Tabela 2.3 – Medidas para melhoria da logística urbana: oferta de veículos.....	28
Tabela 2.4 – Medidas para melhoria da logística urbana: medidas comportamentais	28
Tabela 2.5 – Outras medidas para melhoria da logística urbana (COST 321, 1998).	28
Tabela 3.1 – Tipos de artigos desenvolvidos em modelos de localização-roteirização em 2007 a 2013	48
Tabela 3.2 – Comparação de performance de metaheurísticas para modelos de localização-roteirização com limite de capacidade de CDs e sem limite para veículos	55
Tabela 3.3 – Comparação de performance de metaheurísticas para modelos de localização-roteirização com limite de capacidade de CDs e veículos.....	56
Tabela 3.4 – Comparação de performance de algoritmos híbridos para modelos de localização-roteirização com limite de capacidade de CDs e veículos.....	57
Tabela 4.1 – Comparação de resultados utilizando o TransCAD e heurísticas de Solomon: distância média	68
Tabela 4.2 – Comparação de resultados utilizando o TransCAD e heurísticas de Solomon: número médio de rotas	69
Tabela 4.3 – Dados de entrada de operação da ferramenta de <i>Vehicle Routing Problem</i> do TransCAD.....	69
Tabela 4.4 – Dados necessários para a base georreferenciada de depósitos candidatos para utilização ferramenta de <i>Vehicle Routing Problem</i> do TransCAD.....	70
Tabela 4.5 – Dados necessários para a base georreferenciada de paradas para utilização ferramenta de <i>Vehicle Routing Problem</i> do TransCAD	71
Tabela 5.1 – População do município de Curitiba, Região Metropolitana de Curitiba e do Brasil e respectivo crescimento entre 1970 e 2010	79
Tabela 5.2 – População urbana e rural de Curitiba, Região Metropolitana de Curitiba e do Brasil entre 1970 e 2010	80
Tabela 5.3 – Estrutura do código CNAE	81
Tabela 5.4 – Estabelecimentos e empregos detalhados por seção em Curitiba em 2010.....	81
Tabela 5.5 – Estabelecimentos e empregos na seção C – Indústrias de transformação	83

Tabela 5.6 – Estabelecimentos e empregos na seção G – Comércio, reparação de veículos automotores e motocicletas	84
Tabela 5.7 – Estabelecimentos e empregos na seção H – Transporte, armazenagem e correio	84
Tabela 5.8 – Tipos de estabelecimentos considerados no estudo de caso - comércio atacadista	85
Tabela 5.9 – Tipos de estabelecimentos considerados no estudo de caso - comércio varejista	85
Tabela 5.10 – Tipos de estabelecimentos considerados no estudo de caso - alojamento.....	86
Tabela 5.11 – Tipos de estabelecimentos considerados no estudo de caso - alimentação	86
Tabela 5.12 – Peso movimentado por funcionário (kg) por tipo de estabelecimento	87
Tabela 5.13 – Comparação das características das cidades de Bordeaux e Curitiba.....	88
Tabela 5.14 – Estimativa de demanda, número médio de funcionários e participação de tipo de produto movimentado por tipo de estabelecimento considerado no estudo de caso	90
Tabela 5.15 – Vinte bairros com maior quantidade de estabelecimentos considerados no estudo de caso	91
Tabela 5.16 – Tipos de CDUs considerados.....	93
Tabela 5.17 – Locais candidatos para implantação de CDU e respectivos tipos e custos de aluguel	94
Tabela 5.18 – Custos de construção estimados por tipo de CDU.....	94
Tabela 5.19 – Estimativa de salário por tipo de funcionário do CDU	95
Tabela 5.20 – Total de funcionários e salário total estimados por tipo de CDU.....	95
Tabela 5.21 – Estimativa de salário do motorista e ajudante	95
Tabela 5.22 – Custos fixos de caminhões leves	96
Tabela 5.23 – Resumo dos custos considerados para o estudo de caso.....	96
Tabela 5.24 – Custos fixos por local candidato.....	96
Tabela 5.25 – Custos operacionais variáveis.....	97
Tabela 5.26 – Estrutura dos dados da base geográfica da rede viária	98
Tabela 5.27 – Participação de cada tipo de produto para os níveis de demanda considerados	100
Tabela 5.28 – Cenários simulados no modelo proposto.....	101
Tabela 5.29 – Demanda por cenário simulado	102
Tabela 5.30 – Características dos computadores utilizados	102
Tabela 5.31 – Resumo dos resultados por cenário simulado.....	103

Tabela 5.32 – Resumo dos resultados para o cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 246 <i>clusters</i>	108
Tabela 5.33 – Resumo dos resultados para o cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 260 <i>clusters</i>	109
Tabela 5.34 – Resumo dos resultados para o cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 300 <i>clusters</i>	110
Tabela 5.35 – Resumo dos resultados para o cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 350 <i>clusters</i>	111
Tabela 5.36 – Resumo dos resultados para o cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 400 <i>clusters</i>	112
Tabela 5.37 – Distância total para cada cenário simulado	115
Tabela 5.38 – Comparação entre as distâncias totais obtidas na fase <i>clustering</i> e roteirização	116
Tabela 5.39 – Tempo computacional da simulação dos cenários.....	117
Tabela 5.40 – Resultado para cada cenário considerando iteração que obteve menor custo total	120
Tabela 5.41 – Comparação dos resultados dos cenários simulados com diferentes quantidades de <i>clusters</i>	121
Tabela 5.42 – Ocorrências de cada CDU nos cenários de menor custo	122
Tabela 5.43 – Comparação dos resultados de menor custo com os de outras iterações da fase de <i>clustering</i>	123
Tabela 5.44 – Comparação dos resultados de localização dos CDUs utilizando os dados das diferentes iterações da fase de <i>clustering</i> para o cenário cen30-ad47-cl246.....	124
Tabela 5.45 – Comparação dos resultados de localização dos CDUs utilizando os dados das diferentes iterações da fase de <i>clustering</i> para o cenário cen30-ad47-cl260.....	125
Tabela 5.46 – Comparação dos resultados de localização dos CDUs utilizando os dados das diferentes iterações da fase de <i>clustering</i> para o cenário cen100-ad60	125
Tabela 5.47 – Comparação dos resultados de localização dos CDUs utilizando os dados das diferentes iterações da fase de <i>clustering</i> para o cenário cen60-ad60	126
Tabela A.1 – Estimativa de demanda, número médio de funcionários e participação de tipo de produto movimentado por tipo de estabelecimento considerado no estudo de caso	135
Tabela B.1 – Resumo dos resultados para o cenário com 30% de demanda e 60% de adesão do mercado	143

Tabela B.2 – Resumo dos resultados para o cenário com 30% de demanda e 82% de adesão do mercado	144
Tabela B.3 – Resumo dos resultados para o cenário com 30% de demanda e 100% de adesão do mercado	145
Tabela B.4 – Resumo dos resultados para o cenário com 60% de demanda e 47% de adesão do mercado	146
Tabela B.5 – Resumo dos resultados para o cenário com 60% de demanda e 60% de adesão do mercado	147
Tabela B.6 – Resumo dos resultados para o cenário com 60% de demanda e 82% de adesão do mercado	148
Tabela B.7 – Resumo dos resultados para o cenário com 60% de demanda e 100% de adesão do mercado	149
Tabela B.8 – Resumo dos resultados para o cenário com 100% de demanda e 47% de adesão do mercado	150
Tabela B.9 – Resumo dos resultados para o cenário com 100% de demanda e 60% de adesão do mercado	151
Tabela B.10 – Resumo dos resultados para o cenário com 100% de demanda, 82% de adesão do mercado e 1181 <i>clusters</i>	152
Tabela B.11 – Resumo dos resultados para o cenário com 100% de demanda, 82% de adesão do mercado e 1182 <i>clusters</i>	153
Tabela B.12 – Resumo dos resultados para o cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 246 <i>clusters</i>	157
Tabela B.13 – Resumo dos resultados para o cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 260 <i>clusters</i>	158
Tabela B.14 – Resumo dos resultados para o cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 300 <i>clusters</i>	159
Tabela B.15 – Resumo dos resultados para o cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 350 <i>clusters</i>	160
Tabela B.16 – Resumo dos resultados para o cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 400 <i>clusters</i>	161
Tabela B.17 – Resumo dos resultados para o cenário com 100% de demanda, 100% de adesão do mercado e 1437 <i>clusters</i>	164
Tabela B.18 – Resumo dos resultados para o cenário com 100% de demanda, 100% de adesão do mercado e 1450 <i>clusters</i>	165

Tabela B.19 – Resumo dos resultados para o cenário com 100% de demanda, 100% de adesão do mercado e 1500 <i>clusters</i>	166
Tabela B.20 – Resumo dos resultados para o cenário com 100% de demanda, 100% de adesão do mercado e 1600 <i>clusters</i>	167
Tabela B.21 – Resumo dos resultados para o cenário com 100% de demanda, 100% de adesão do mercado e 1700 <i>clusters</i>	167
Tabela C.1 – Resultados obtidos na fase de localização de CDUs	170

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALNS	Adaptive large-neighborhood search
BESTUFS	Best Urban Freight Solutions
BLU	Ponto/caixa inteligente de entrega
CCP	Capacitated clustering problem
CD	Centro de distribuição
CDU	Centro de distribuição urbano
CE	Estado do Ceará
CLUB	Centro de Logística Urbana do Brasil
CNAE	Classificação Nacional de Atividades Econômicas
ELS	Evolutionary local search
FRETURB	Modelo desenvolvido pelo Laboratoire d'Economie des Transports da Universidade de Lyon
GISDK	Geographic Information System Developer's Kit
GLRP	Generalized location routing problem
GRASP	Greedy randomized adaptive search procedure
HGTS	Hybrid granular tabu search
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ID	Chave numérica/código identificador
ILP	Integer linear programming
ILS	Iterated local search
IPPUC	Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba
LARP	Location arc-routing problem
LRGTS	Lagrangean relaxation-granular tabu search

LRP	Location routing problem
MG	Estado de Minas Gerais
PAM	Ponto de recepção de carga
PAV	Ponto de recepção de veículos
PCLRP	Prize-collecting location routing problem
PD	Preferência declarada
PIB	Produto interno bruto
PLI	Programação linear inteira
PNMU	Plano Nacional de Mobilidade Urbana
PRV	Problema de roteirização de veículos
RAIS	Relação Anual de Informações Sociais
REFORM	Research on Freight Platforms and Freight Organisation
RMC	Região Metropolitana de Curitiba
SA	Simulated annealing
SDLRP	Split delivery location routing problem
SILENCE	Projeto de pesquisa europeu para controle de ruídos no transporte de superfície em áreas urbanas
SUGAR	Sustainable Urban Goods Logistics Achieved by Regional and Local Policies
TSP	Travelling salesman problem
VLC	Veículo leve de carga
VLNS	Very large neighborhood search
VND	Variable neighborhood descent
VNS	Variable neighborhood search

VUC	Veículo urbano de carga
ZLU	Zona de logística urbana

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	19
1.1	Objetivo.....	19
1.2	Estruturação do trabalho	20
2	LOGÍSTICA URBANA.....	21
2.1	Importância da logística urbana	21
2.2	Impactos da logística urbana	23
2.3	Agentes atuantes na logística urbana.....	23
2.4	Definição de <i>City Logistics</i>	24
2.4.1	Medidas.....	26
2.4.2	Centros urbanos de distribuição.....	31
2.5	Estudos e projetos de logística urbana no âmbito internacional.....	33
2.5.1	Europa.....	34
2.5.2	América do Norte.....	38
2.5.3	Oceania	40
2.5.4	Ásia	40
2.6	Estudos e projetos de logística urbana no Brasil	41
2.7	Considerações finais sobre a logística urbana.....	44
3	PROBLEMAS DE LOCALIZAÇÃO-ROTEIRIZAÇÃO	47
3.1	Tipos de problemas de localização-roteirização	48
3.2	Métodos de solução	50
3.2.1	Métodos exatos para problemas determinísticos	51
3.2.2	Heurísticas	51
3.2.3	Metaheurísticas	55
3.2.4	Algoritmos híbridos (<i>matheuristics</i>).....	56
3.2.5	Problemas estocásticos e dinâmicos	57
3.3	Considerações finais sobre modelos de localização-roteirização.....	58
4	MODELO APLICADO	59
4.1	TransCAD.....	61
4.1.1	<i>Clustering</i>	61
4.1.2	<i>Vehicle routing problem</i>	68
4.2	OpenSolver - Modelo de localização dos centros urbanos de distribuição.....	75
5	ESTUDO DE CASO	78
5.1	Curitiba.....	78
5.2	Dados adotados para o modelo	80
5.2.1	Estimativa da demanda diária dos estabelecimentos	80

5.2.2	Localização dos candidatos a centros urbanos de distribuição	91
5.2.3	Custos diários.....	92
5.2.4	Rede viária	98
5.3	Cenários simulados	99
5.4	Resultados obtidos	102
5.4.1	<i>Clustering</i>	102
5.4.2	Vehicle routing problem	113
5.4.3	Localização dos CDs	118
5.5	Considerações finais sobre os resultados do estudo de caso	126
6	CONCLUSÕES.....	127
6.1	Continuidade do trabalho	129
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	130
APÊNDICE A DADOS PARA ESTIMATIVA DA DEMANDA DOS ESTABELECIMENTOS DE CURITIBA.....		134
APÊNDICE B RESULTADOS OBTIDOS NA FASE DE <i>CLUSTERING</i>.....		142
APÊNDICE C RESULTADOS OBTIDOS NA FASE DE LOCALIZAÇÃO DOS CENTROS URBANOS DE DISTRIBUIÇÃO		169
APÊNDICE D ROTINA DESENVOLVIDA.....		173

1 INTRODUÇÃO

O aumento de população em grandes cidades gera uma maior demanda por produtos de necessidade corrente, como alimentos, produtos para higiene, móveis, roupas, eletrônicos, etc. Para que o atendimento dessa demanda seja realizado, um número significativo de caminhões disputa com outros veículos um espaço cada vez mais escasso nos centros urbanos, seja para circulação, seja para estacionamento com o propósito de carga ou descarga das mercadorias. De modo geral, os estudos referentes à logística urbana não acompanharam o crescimento da movimentação urbana de cargas, ao contrário do que aconteceu com o transporte de pessoas.

Das medidas para amenizar esses problemas, uma é a implantação de centros de distribuição onde empresas podem consolidar suas cargas e até mesmo formar cooperativas para a distribuição de suas mercadorias de maneira conjunta e mais otimizada. Nesses centros também podem existir outras estruturas de apoio ao sistema de distribuição, como a armazenagem de produtos.

Modelos eficientes para a seleção dos locais desses centros de distribuição são conhecidos, mas a limitação de dados disponíveis restringe, por vezes, seu uso. Há também a complexidade computacional, que ainda penaliza sua aplicação a problemas de grande dimensão. Por fim, é mais comum na literatura seu uso na resolução de conjuntos de problemas sintéticos para análise comparativa de performance, seja ela em termos de qualidade da solução ou de custo computacional necessário.

Portanto, além do desenvolvimento de um desses modelos, esta dissertação apresenta um estudo de caso com a aplicação deste a vários cenários de redistribuição de carga do município de Curitiba, compreendendo o atendimento de até sessenta e cinco mil estabelecimentos.

1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho foi desenvolver, aplicar e analisar um modelo de localização-roteirização de centros urbanos de transferência de carga utilizando o TransCAD e um *software* de solução problemas de programação linear, além de mostrar a relevância da logística urbana e da implantação dos centros de distribuição.

1.2 Estruturação do trabalho

Os capítulos seguintes seguem a seguinte estrutura:

Capítulo 2. Revisão bibliográfica pertinente à logística urbana – identificando sua importância, seus impactos e os agentes envolvidos – e o conceito relacionado de *City Logistics*.

Capítulo 3. Modelos de localização-roteirização encontrados na literatura e sua classificação quanto aos dados necessários e os métodos de solução.

Capítulo 4. Definição e modelo e descrição das etapas e dos *softwares* utilizados.

Capítulo 5. O estudo de caso de Curitiba, incluindo a obtenção e processamento dos dados de Curitiba, a aplicação do modelo proposto, os resultados obtidos e a análise da solução e do método.

Capítulo 6. Conclusões acerca do trabalho e sugestões para a sua continuidade.

Uma versão eletrônica deste trabalho e outros arquivos relacionados estão disponíveis em:

<https://fabitakebayashi.github.io/mestrado>

2 LOGÍSTICA URBANA

A definição de logística urbana varia entre os autores e estudos. Dablanc (1997, 2009) adota uma conceituação mais simplificada definindo-a como a “movimentação de mercadorias dentro de um território urbano” realizada por ou para estabelecimentos comerciais devido as suas necessidades econômicas, incluindo ainda entregas de produtos a domicílio.

Allen et al. (2000) adotam um conceito mais abrangente, pois para uma melhor compreensão dos fluxos dentro de uma cidade, acreditam que é necessário também tratar os elementos do transporte de maneira desagregada. Desta maneira, analisaram os diferentes veículos adotados para o transporte das mercadorias numa área urbana, incluindo também vans, veículos de serviço público e outros veículos utilizados por motivos comerciais; e também consideraram diversos tipos de produtos movimentados, como suprimentos, embalagens, lixo e dinheiro.

Ogden¹ apud Allen et al. (2000) pondera que os diversos modais que podem ser utilizados em determinada área urbana, como petróleo sendo movimentado por um duto, abastecimento de água, coleta de lixo, entrega de correspondências e até mesmo viagens de pessoas aos shoppings, fazem parte da logística urbana. Para o autor, é relevante analisar qualquer tipo de atividade que utilize a malha urbana, independente dos modais, terminais, docas de carga e descarga ou sistema de distribuição interna de estabelecimentos, para que seja obtida maior eficiência na distribuição urbana de mercadorias.

2.1 Importância da logística urbana

A movimentação urbana de mercadorias é realizada devido às necessidades econômicas das cidades, das suas indústrias, dos estabelecimentos comerciais e do consumo direto de seus habitantes. Com o crescimento da urbanização, o transporte de produtos se tornou mais crítico por trazer impactos negativos nos aspectos ambientais, sociais e econômicos.

Allen et al. (2000) e Anderson, Allen e Browne (2005) identificaram os seguintes motivos para a importância deste tema:

- Aspectos ambientais trazidos pelo transporte urbano de cargas, em termos de uso de energia e geração de poluição, ruídos, intrusão visual, etc;
- Custo total deste transporte, por ser significativo e estar ligado à eficiência econômica;

¹ Ogden, K, 1992, Urban Goods Movement: A Guide to Policy and Planning, Ashgate, Aldershot

- Efeitos dos custos de transporte em relação aos preços de *commodities* consumidos na região estudada;
- O transporte urbano de cargas é fundamental para o cotidiano das pessoas;
- Seu papel no abastecimento de indústrias e atividades comerciais que são essenciais para o crescimento econômico;
- A contribuição que um transporte eficiente traz na competitividade das indústrias da região estudada.

O estudo COST 321 (1998) ainda menciona a importância de adequar este transporte de maneira que os centros das grandes cidades não percam sua função econômica. Existe uma competitividade no comércio com os shoppings centers, que por vezes estão localizados em outras partes das cidades que são mais vantajosas quanto ao trânsito.

Além desses fatores, ainda é importante mencionar a contribuição dos veículos de carga no congestionamento. Com o aumento da população e, conseqüentemente, da movimentação de mercadorias para seu atendimento, há um número maior de todos os tipos de veículos circulando nas vias, ocasionando pontos de congestionamento nas regiões próximas aos centros comerciais. Além dos problemas de fluxo nas vias em si, podem ocorrer disputas por vagas de estacionamento também. Todos esses fatores trazem ineficiências no transporte, gerando custos maiores e também maior intolerância da população aos veículos de carga.

Outras mudanças que têm ocorrido nas atividades comerciais também indicam a importância deste assunto. A diminuição dos estoques nos estabelecimentos comerciais e o aumento do comércio eletrônico também contribuem em um maior número de veículos de carga fracionada circulando nas áreas urbanas.

Por estas razões é importante estudar este tipo de transporte, a fim de minimizar os impactos que podem ser causados em grandes cidades onde a distribuição urbana de carga não é realizada de maneira eficiente ou sustentável. Para isso, podem ser consideradas soluções como, regulamentações do transporte, demarcações de vagas de estacionamento específicas para veículos de carga, implantação de terminais, entre outras. Estas medidas são mais detalhadas no item 2.4.

2.2 Impactos da logística urbana

A distribuição urbana de mercadorias gera diversos impactos negativos, tanto econômicos como ambientais e sociais. Anderson, Allen e Browne (2005) listaram vários deles:

- Econômicos: congestionamento, ineficiência e desperdício de recursos;
- Ambientais: emissões de gases poluentes, uso de combustíveis fósseis não-renováveis, uso do solo, geração de lixo como pneus usados, óleos e outros resíduos, e perda de habitats naturais e ameaças a animais;
- Sociais: problemas de saúde pública em consequência da poluição, acidentes no trânsito, ruído, intrusão, dificuldades de realizar viagens sem o carro ou transporte público e outros aspectos relacionados a qualidade de vida, como a perda de espaços verdes ou livres por construção de infraestrutura viária.

Quak (2008) identificou ainda como impactos econômicos: a diminuição de confiabilidade e pontualidade das entregas, o que pode potencialmente resultar em um menor nível de serviço ao cliente e perda de mercado; diminuição do próprio desenvolvimento econômico e redução da acessibilidade urbana.

2.3 Agentes atuantes na logística urbana

Taniguchi (2012) levanta quatro tipos de agentes envolvidos na distribuição urbana de mercadorias: embarcadores, transportadoras, população e os administradores públicos; a relação entre eles pode ser vista na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Agentes atuantes na logística urbana
Fonte: Taniguchi (2012)

Os embarcadores são os responsáveis pela expedição da carga e pela contratação das transportadoras para este fim. Para isso, tentam maximizar o nível de serviço no atendimento de seus clientes, minimizando custos e tempos da distribuição. São caracterizados principalmente pelas indústrias e grandes redes varejistas e podem ser chamados também de

expedidores ou *shippers* (OGDEN apud SANCHES JUNIOR, 2008; OLIVEIRA, 2007; RUSSO; COMI, 2010).

A população representa uma parte dos consumidores da carga como também a principal entidade que considera os veículos de carga um problema no tráfego das cidades. É o agente que mais sofre com os impactos negativos da distribuição urbana e gostaria que os mesmos fossem reduzidos. Também pode ser chamados de recebedores de carga ou *receivers* (OGDEN apud SANCHES JUNIOR, 2008; OLIVEIRA, 2007). Russo e Comi (2010) também consideram como recebedores de carga os estabelecimentos comerciais, cuja maior preocupação é o recebimento de seus produtos no menor prazo de entrega possível.

As transportadoras são as empresas responsáveis pela distribuição das mercadorias, buscando o menor custo relativo a este transporte e um alto nível de serviço para atender os embarcadores e consumidores (OLIVEIRA, 2007; RUSSO; COMI, 2010). Ogden apud Sanches Junior (2008) classifica as transportadoras pelo seu tamanho (pelo tamanho da frota), área de atuação (pelo tipo de produto que transporta) e pelo formato legal (pelas restrições impostas pelo local em que as transportadoras atuam).

Os administradores públicos podem ser de nível municipal, estadual e federal e são os agentes que podem atuar na regulamentação da distribuição urbana de carga, para um transporte mais eficiente e minimizando os impactos negativos gerados. Além disso, devem garantir o desenvolvimento econômico da região e podem ajudar na resolução dos conflitos entre os agentes envolvidos na movimentação de carga (OGDEN apud SANCHES JUNIOR, 2008; OLIVEIRA, 2007; RUSSO; COMI, 2010).

Além desses agentes, Sanches Junior (2008) ainda identificou outros elementos que estão envolvidos neste setor, como por exemplo: agentes de carga, que prestam serviços de consolidação das mercadorias de embarcadores para as transportadoras e as autoridades viárias e de tráfego, que atuam no controle do tráfego e manutenção e construção de vias.

2.4 Definição de *City Logistics*

Para um transporte mais sustentável e eficiente, nos anos 90 surgiu o conceito de *City Logistics*. Taniguchi (2012) define *City Logistics* como “o processo de total otimização das atividades logísticas e de transporte pelas empresas privadas com o apoio de sistemas de informações avançadas em áreas urbanas considerando o tráfego, o congestionamento, a segurança e a economia de energia dentro do desenvolvimento econômico”. Seu objetivo é otimizar todos os

sistemas logísticos dentro da área urbana considerando os custos e os benefícios para os setores privados e públicos.

Para Taniguchi² apud Sanches Junior (2008), *City Logistics* é ainda um processo de planejamento integrado para a distribuição de mercadorias baseado em um sistema de integração envolvendo parcerias dos setores públicos e privados promovendo melhor planejamento da cidade e esquemas inovadores reduzindo custos econômicos, impactos sociais e ambientais.

Muñuzuri et al. (2011) ainda complementam que o conceito de *City Logistics* inclui a aplicação de soluções inovadoras para a distribuição de cargas utilizando ferramentas de planejamento e tecnologias avançadas disponíveis para facilitar a mobilidade urbana sem gerar deseconomias.

Crainic (2008) identifica que a ideia fundamental dos modelos relacionados a *City Logistics* não é levar em consideração cada entrega, veículo ou empresa individualmente, mas considerar que todos os agentes atuantes nesta logística e fluxos fazem parte de um sistema integrado. Este tipo de pensamento implica na coordenação dos embarcadores, transportadoras e fluxos como também na consolidação de cargas de clientes e transportadoras utilizando os mesmos veículos, e que causam menos impactos ambientais, como por exemplo, os veículos elétricos.

Para Crainic, Ricciardi e Storch (2009), *City Logistics* é um desafio para todos os agentes envolvidos na distribuição urbana de cargas que apresenta novos modelos de negócios e operacionais, com entendimento entre as partes, colaboração e parcerias inovadoras. Sendo que pouco desse conceito ainda foi desenvolvido de forma prática, mas há projetos pilotos e teorias em andamento para isso.

Para Oliveira (2007), os projetos nesta área que foram conduzidos até o momento, proporcionaram um incremento na rentabilidade das empresas de transporte por veículo e também alcançaram objetivos benéficos para a comunidade.

Taniguchi (2012) apresenta uma visão sobre *City Logistics* baseado em três pilares: sustentabilidade, mobilidade e qualidade de vida, como pode ser visto na Figura 2.2.

2 Taniguchi, E., Thompson, R., Yamada, Tadashi. (2003) Predicting the effects of city logistics schemes. Transport Reviews, vol. 23 nº 04. Reino Unido: Taylor & Francis Ltda.

Figura 2.2 – Pilares de *City Logistics*
Fonte: Taniguchi (2012)

Como apresentado, os autores consideram que *City Logistics* é a aplicação de soluções inovadoras, através de ferramentas de planejamento e tecnologias avançadas disponíveis, para um planejamento integrado do sistema buscando a otimização das diversas atividades logísticas que compõem a distribuição urbana de mercadorias considerando os diversos elementos de maneira conjunta e interligada dentro desse sistema. Para isso, devem envolver o setor público e privado em parcerias e colaborações com o objetivo de minimizar os impactos sociais, econômicos e ambientais. Algumas das medidas já implementadas com foco em *City Logistics* são apresentados no item seguinte.

2.4.1 Medidas

COST 321 (1998) foi um dos primeiros estudos promovidos pela Comissão Europeia acerca do transporte urbano de cargas (RUSSO; COMI, 2011). Foram identificadas melhorias em 5 áreas: mobilidade (Tabela 2.1), oferta de infraestrutura e uso do solo (Tabela 2.2), oferta de veículos (Tabela 2.3), comportamento (Tabela 2.4) e outras medidas (Tabela 2.5), sendo também indicadas aquelas consideradas mais promissoras pelo estudo.

Tabela 2.1 – Medidas para melhoria da logística urbana: área de mobilidade

Tópico	Medidas	Promissora
Organização logística	Serviços diferenciados / redução de requisitos de nível de serviço	
	Compartilhamento do uso de espaços por varejistas	
	Promoção de armazéns nas áreas urbanas	
	Terceirização do serviço de transporte	
	Transporte cooperativo dos varejistas	X
	Redução do volume dos pacotes	X

Tópico	Medidas	Promissora
	Uso comum dos veículos	X
	Sistemas de informação e aplicação de telemática	X
	Centros de distribuição	X
	Consolidação através de contêineres urbanos	X
	Utilização de caminhões menores ou vans no lugar de caminhões grandes	X
	Desenvolvimento e uso de equipamentos leves de manuseio de cargas	
	Desenvolvimento de armazéns comuns para um grupo de clientes	
Escolha Modal	Uso de bicicletas para pequenas entregas ou transporte de curta distância para comércios	X
	Uso de dutos para transporte de combustíveis e alguns tipos de resíduos	
	Manipulação subterrânea de carga	
	Uso de equipamentos de manuseio mais baratos	
	Coordenação de transporte intermodal	X
	Utilização da ferrovia em conjunto com centros urbanos de distribuição	X
Custo de transporte	Licenças de posse de caminhões para distribuição urbana	X
	Pedágios urbanos	X
	Cobrança de estacionamento para veículos de carga conforme período do dia, tempo de parada e local	
	Subsídio público de transporte ferroviário nas cidades	

Fonte: COST 321, 1998

Tabela 2.2 – Medidas para melhoria da logística urbana: oferta de infraestrutura e uso do solo

Tópico	Medidas	Promissora
Planejamento físico e investimento e planejamento de infraestrutura	Otimização de sistemas de distribuição incluindo terminais	X
	Promoção de uma menor intensidade de atividades econômicas que exigem transporte	
	Aglomeração ou separação geográficas de atividades	X
	Terminais de transbordo	
	Alocação de áreas industriais e comerciais para infraestrutura de transporte existente e futura	
	Solução dos problemas de infraestrutura	
	Remoção de armazéns e estabelecimentos voltados a distribuição de mercadorias das áreas residenciais	
	Faixas mais largas para acomodar veículos de carga	
	Projetos de vias mais sustentáveis quanto a consumo de energia	
	Expansão da malha ferroviária	X
	Reutilização de áreas que eram terminais ferroviários ou hidroviários como centros urbanos de distribuição	
	Aceleração dos procedimentos quanto medidas voltadas para a infraestrutura	

Tópico	Medidas	Promissora
	Estabelecimento de rotas rápidas e diretas entre os centros de distribuição e o centro da cidade	
Planejamento e gerenciamento de tráfego	Regulamentação do tráfego de veículos de carga	X
	Guias e sistemas de informações para o gerenciamento de tráfego	X
	Uso específico de infraestrutura para o transporte de mercadorias	
	Rotas para caminhões nas cidades	
	Reservas de áreas específicas nas vias para parada de caminhões	
	Limites de velocidade e controle através de sua mensuração	
	Hierarquia de infraestrutura para o transporte de carga	

Fonte: COST 321, 1998

Tabela 2.3 – Medidas para melhoria da logística urbana: oferta de veículos

Tópico	Medidas	Promissora
Tecnologia de veículos e combustíveis alternativos	Desligamento do motor do veículo durante carga e descarga	
	Limitadores de velocidade	
	Medidas técnicas referentes a veículos de carga	
	Recomendações quanto a aparelhos eletrônicos de uso de combustível e troca de marcha	
	Regeneração de energia de uso do freio	
	Uso de combustíveis alternativos	X
	Harmonização de características de carga e unitização	X
	Desenvolvimento de veículos e equipamentos silenciosos para entregas e coletas realizadas no período noturno	X

Fonte: COST 321, 1998

Tabela 2.4 – Medidas para melhoria da logística urbana: medidas comportamentais

Tópico	Medidas	Promissora
Comportamento do motorista	Influência do comportamento do motorista	

Fonte: COST 321, 1998

Tabela 2.5 – Outras medidas para melhoria da logística urbana (COST 321, 1998).

Tópico	Medidas	Promissora
Outras medidas	Harmonização de regulamentação nacional	
	Procura pelo tamanho ótimo do veículo urbano de carga	
	Remoção de obstáculo de medidas eletrônicas de entrega	

Fonte: COST 321, 1998

Entre as medidas mais recomendadas estão o cooperativismo das empresas, seja pelo transporte ou pelo uso comum dos veículos, assim como o envolvimento de centros de distribuição e da utilização do modal ferroviário na logística. Também é considerada uma harmonização da carga e sua unitização para facilitar o seu transporte, assim como uma regulamentação do tráfego de

veículos de carga, sendo que sua realização em nível nacional ainda não foi considerada como promissora pela pesquisa.

Para uma melhor compreensão das medidas referentes de *City Logistics* e seus impactos, Russo e Comi (2010) classificaram tais medidas para identificar características homogêneas que permitam identificar o tomador de decisão (autoridades públicas, empresas privadas ou parcerias público-privadas) ou quem deve respeitá-las (consumidores finais, recebedores de carga ou embarcadores). Sua classificação foi dividida pelos seguintes critérios:

- Medidas relativas à infraestrutura “material”: podem se referir a vias da malha urbana/metropolitana e áreas para atividades logísticas. Vias exclusivas para veículos de carga, áreas de carga e descarga, centros de distribuição urbana são exemplos de medidas desta categoria.
- Medidas relativas à infraestrutura “não-material” ou sistemas inteligentes de transporte: podem se referir a sistemas para informação de tráfego, serviços de otimização de rotas, sistemas de gerenciamento de manutenção de veículos e outras informações passíveis de acesso pela internet;
- Medidas relativas a equipamentos: podem se referir a equipamentos para carga de mercadorias, caso sejam de novas tecnologias e padrões para otimização de manuseio por veículos de baixa emissão de poluentes; e veículos menos poluentes, elétricos, ferroviários e trens;
- Medidas relativas à governança: podem se referir a regulamentações quanto a controle de acesso e de uso de vias para veículos pesados, pedágios urbanos, tempo máximo de estacionamento, área máxima de ocupação e permissões específicas.

Thompson e Taniguchi (2008) consideram que *City Logistics* inclui uma ou mais das seguintes iniciativas:

- Sistemas de informações avançadas;
- Sistemas cooperativos de transporte de carga;
- Centros logísticos públicos;
- Controle dos fatores de ocupação dos veículos;
- Sistemas de transporte de carga subterrâneos.

Os sistemas de informações avançadas podem melhorar as operações logísticas e possuem três importantes funções: (i) permitir comunicação entre os motoristas e centro de controle; (ii)

prover informação em tempo real sobre condições de tráfego; e (iii) armazenar dados sobre operação de entrega e coleta dos veículos (THOMPSON; TANIGUCHI, 2008).

Os sistemas cooperativos de transporte de carga podem reduzir os custos de transporte e impactos ambientais, através da utilização de um único operador logístico para entregar produtos de clientes de uma mesma região ou de empresas com centros de distribuição próximos (THOMPSON; TANIGUCHI, 2008).

Centros logísticos públicos podem ter diversas funções como o transbordo de mercadorias, consolidação de cargas, armazenagem e mercadões (THOMPSON; TANIGUCHI, 2008). Esses centros também permitem a formação dos sistemas cooperativos de transporte, pois permitem a consolidação de carga e promovem a cooperação entre as empresas.

De acordo com Thompson e Taniguchi (2008), o controle dos fatores de ocupação dos veículos é uma iniciativa mais nova em comparação com as regulamentações de veículos de carga quanto ao seu peso e horários de circulação. As cidades de Copenhagen (Dinamarca) e Amsterdã (Países Baixos) são duas iniciativas citadas, onde, em determinadas ocasiões, os veículos de carga das transportadoras devem possuir uma ocupação superior a 60% e 80% em média, respectivamente. Em Copenhagen, as empresas reportam a ocupação de seus veículos de carga todos os meses; enquanto em Amsterdã, veículos específicos são vistoriados durante seu roteiro.

Sistemas de transporte de carga subterrâneos são considerados soluções inovadoras por Thompson e Taniguchi (2008). Os autores identificaram um estudo que estimou que o impacto de construir este tipo de sistema na área central de Tóquio (Japão) resulta em: redução de emissões de NO_x e CO₂ entre 10% a 18%, redução de consumo de energia em 18% e aumento de velocidade média em 24%. Ooishi e Taniguchi³ apud Thompson e Taniguchi (2008) indicaram que nessa mesma região um sistema subterrâneo poderia ter uma taxa interna de retorno de 10%, se a infraestrutura for construída pelo setor público.

Em resumo, o estudo COST 321 (1998) identificou 60 medidas para melhorias identificando quais são as mais promissoras e propondo uma classificação temática, assim como Russo e Comi (2010) fizeram para um melhor entendimento do conceito de *City Logistics*. Thompson

³ Ooishi, R. and E. Taniguchi. Effects and profitability of constructing the new underground freight transport system. In: *City Logistics I*, 1st International Conference on City Logistics, Cairns, (E. Taniguchi and R.G. Thompson, eds.), Institute of Systems Science Research, Kyoto, pp.303-316.

e Taniguchi (2008) enumeram 5 iniciativas que acreditam fazer parte deste mesmo conceito. Nota-se que determinadas medidas foram elencadas por todos os autores, sendo algumas já implementadas em alguns países, como o estabelecimento de regulamentações e implantações de centros logísticos. Também foram realizados estudos para uma compreensão maior da distribuição urbana de carga em algumas cidades, principalmente na Europa, e elaborados guias de boas práticas para difundir e apresentar estas iniciativas, como por exemplo, Allen, Thorne e Browne (2007), SUGAR (2011) e Boudouin (2012).

Alguns exemplos das medidas e projetos existentes internacionalmente e no Brasil serão apresentados no item 2.5 e 2.6, respectivamente; e no subitem a seguir será explorada em mais detalhes a implantação de centros urbanos de distribuição.

2.4.2 Centros urbanos de distribuição

Como mostrado, a implantação de centros de distribuição urbanos (CDU) é uma das medidas recomendadas para a melhoria da logística urbana. Eles podem ter várias finalidades, como o transbordo de mercadorias, a consolidação de cargas, a armazenagem e mercadões (THOMPSON; TANIGUCHI, 2008).

Como apontam Egger e Ruesch (2002), os conceitos destes centros podem variar em diversos países ou segundo diversos autores. Em COST 321 (1998) os centros urbanos de distribuição são definidos como os locais de transbordo de viagens de longas distâncias para viagens de curtas distâncias (viagens urbanas), onde há reorganização e consignação de carga. Também podem ser chamados de centros de consolidação urbana ou terminais urbanos, podendo também ser de um único operador ou um elemento da cadeia logística de uma empresa (EGGER; RUESCH, 2002).

Além destes centros, outra infraestrutura que pode atender diversas atividades logísticas são as plataformas logísticas. De acordo com REFORM⁴ apud Egger e Ruesch (2002), estas plataformas são áreas onde atuam operadores logísticos e agentes de transporte e onde ocorre o transbordo de carga por pelo menos dois modais, idealmente. As funções identificadas da plataforma logística são:

⁴REFORM *Research on freight platforms and freight organisation* (Transport research, Fourth Framework Programme, urban transport, DG VII). Luxemburgo: Bernan Associates, 1999. 131 p.

- Integração de diferentes modais e transportadoras;
- *Hubs*;
- Ponto inicial do transporte de entrega e coleta, incluindo consignação de mercadorias;
- Armazenagem de produtos;
- Manuseio de produtos, como por exemplo, empacotamento;
- Fornecimento e manutenção de veículos, contêineres e equipamentos;
- Fornecimento de infraestrutura como acessos ferroviários e estacionamentos;
- Fornecimento de áreas para serviços internos como aduanas, segurança, sistemas de informação, treinamento e consultoria.

Desta maneira a implantação de centros urbanos de distribuição e de plataformas logísticas podem trazer diversos benefícios, como os identificados por REFORM apud Egger e Ruesch (2002):

- Benefícios para o setor público:
 - Menor emissão de gases poluentes consequente de uma distribuição urbana de mercadorias mais eficiente;
 - Mudança de modal para viagens de longa distância da rodovia para ferrovia;
 - Redução do tráfego urbano, com eliminação das viagens a estabelecimentos que oferecem serviços fornecidos nos próprios centros ou plataformas;
 - Estímulo do crescimento econômico da região com a melhoria da infraestrutura logística (aumento do número de empregos, criação de novas empresas, aumento da oferta nas indústrias).
- Benefícios para o setor privado:
 - Espaços adequados para sua operação;
 - Consolidação de cargas;
 - Uso do transporte intermodal;
 - Ganhos econômicos a partir de serviços adicionais;
 - Participação em cooperativismo;
 - Atração de novos clientes.

Apesar destes benefícios, Egger e Ruesch (2002) identificaram casos em que centros urbanos de distribuição não obtiveram sucesso devido aos seguintes obstáculos:

- Falta de interesse econômico devido ao aumento de custos advindo da interrupção de um transporte direto nos centros de distribuição;

- Falta de motivação de cooperativismo por causa da competição entre empresas causado por medo de dividir informações sobre volumes, produtos, clientes e conhecimento, além da perda de clientes para os concorrentes;
- Relutância de não possuir o controle sobre as mercadorias;
- Perda do contato direto com o cliente, uma vez que ao entregar sua mercadoria diretamente a transportadora pode estabelecer um relacionamento com o consumidor, sendo que no caso de implantação de um centro de distribuição, a transportadora apenas realizaria a entrega até o CD;
- Muitas empresas dão prioridade para serviço ao cliente e vantagem competitiva sobre custos de transportes inferiores;
- Necessidade reduzida de um centro de distribuição nos casos onde grandes estabelecimentos já possuem seu próprio centro, visto que utilizar a nova infraestrutura traria pouco benefício.

Com base nessas informações identificadas por Egger e Ruesch (2002), conclui-se que é necessário um estudo para entender as características de cada cidade acerca da distribuição de mercadorias já existente, além da estrutura das empresas nela localizadas, pois dependendo deste diagnóstico a implantação de centros de distribuição pode não ser a solução mais adequada. Porém, se esse for o caso, deve-se instaurar uma cultura de maior comunicação entre os agentes para que haja interesse em cooperativismo entre as empresas, sem que tenham medo de compartilhar suas informações, de ceder controle sobre a carga ou de perder o relacionamento direto com consumidores. A nova cultura deve ocorrer através da conscientização e da promoção dos benefícios e conceitos de logística urbana e *City Logistics* pelo setor público, que também deve atuar na implantação das medidas de melhoria.

2.5 Estudos e projetos de logística urbana no âmbito internacional

Nos anos 60 e 70, informações referentes à distribuição urbana de mercadorias eram mais abundantes, devido à existência de estudos de transporte que incluíam gerenciamento de tráfego de caminhões, principalmente nos Estados Unidos e Austrália, além de algumas cidades na Europa e América Latina (DABLANC, 2009). Neste período, também foram realizadas regulamentações sobre circulação de veículos de carga em algumas cidades de maneira a privilegiar os fluxos de automóveis (SANCHES JUNIOR, 2008; CRAINIC, 2008).

Nos anos seguintes, não houve continuidade neste tipo de estudo e pouco foi desenvolvido na área de logística urbana, tanto em coletas de dados como na modelagem de tráfego (DABLANC, 2009; SANCHES JUNIOR, 2008).

Na década de 90, novos estudos relacionados a este tema começaram a surgir, devido às preocupações e aos problemas que surgiram com o crescimento da urbanização e do tráfego. Foram realizadas pesquisas para coleta de dados, projetos experimentais e de pesquisas, inicialmente em países da União Europeia e no Japão (SANCHES JUNIOR, 2008; CRAINIC; RICCIARDI; STORCHI, 2009). Neste mesmo período, também surgiu o conceito de *City Logistics*.

Nos últimos anos, foram realizados estudos, conferências e projetos relacionados com o transporte urbano de carga. Nos itens seguintes, serão descritos o que alguns países têm feito em relação a este tema.

2.5.1 Europa

Alguns estudos foram realizados na Europa, sendo que um dos mais importantes e completos foi o BESTUFS. Iniciado no fim do ano 2000, o *Best Urban Freight Solutions* (BESTUFS) fazia parte do *5th Framework Programme*, programa financiado pela União Europeia entre 1998 a 2002 para pesquisas e desenvolvimento tecnológico com o objetivo de solucionar problemas e reagir aos desafios socioeconômicos da época (COMISSÃO EUROPEIA, 1998).

O principal objetivo do BESTUFS era “identificar, descrever e difundir as melhores práticas, critérios de sucesso e gargalos das soluções para o transporte urbano de mercadorias”. Para tal, pesquisadores de diversos países contribuíram com dados e informações das medidas implantadas nas cidades da Europa, a fim de elaborar guias de melhores práticas em diversos temas, como pedágio urbano, implantação de centros de distribuição, parcerias público privadas neste tipo de transporte, esquemas de restrições de acesso, comércio eletrônico, além de um guia com informações geral sobre o tema (ALLEN; THORNE; BROWNE, 2007).

Com o intuito de envolver ainda mais participantes neste assunto, também foram promovidos conferências, *workshops* e grupos de discussão nos diversos temas estudados pelos pesquisadores.

Dois pesquisadores ativos do BESTUFS, Julian Allen e Michael Browne da Universidade de Westminster fazem parte de um grupo de estudos de transporte, que desenvolveu uma extensa

pesquisa para uma melhor compreensão do transporte urbano de cargas no Reino Unido entre os anos de 1998 e 1999. Esta foi uma das primeiras pesquisas da região desde os anos 70 (ALLEN et al., 2000).

Nesse estudo primeiramente foi definido o significado do termo “transporte urbano de cargas”, analisadas as medidas políticas implantadas e obtidos dados de tráfego. Posteriormente, foram feitas entrevistas com os agentes dos setores (embarcadores, atacadistas, transportadores e operadores) e com base na análise dos resultados das pesquisas, foram realizados grupos de discussões para o aprofundamento destas análises e conclusões do estudo. Esta pesquisa trouxe um melhor entendimento nas seguintes questões (ALLEN et al., 2000):

- Relação entre os fluxos de mercadorias e os veículos utilizados para transportá-las;
- Processo de tomada de decisão pelos embarcadores na determinação das viagens realizadas;
- Reação e efeitos de novas políticas de transportes nas empresas;
- Potenciais alterações de comportamento das empresas na implantação de políticas de redução de impactos ambientais;
- Como mudanças podem ser discutidas e planejadas pelas empresas e pelos tomadores de decisão.

Outros países europeus que realizaram estudos nesta área foram a Alemanha e a França. Em ambos os países, pesquisas foram feitas para um melhor entendimento da distribuição urbana (SANCHES JUNIOR, 2008).

Na Alemanha, foram realizadas pesquisas com motoristas sobre seu comportamento no trânsito em 9000 localidades nas cidades de Munique, Berlim e Hamburgo. Seus resultados foram utilizados para a elaboração de um modelo (denominado WIVER) que calculava fluxos origem/destino de veículos comerciais. Esse modelo foi útil para a organização e dimensionamento da infraestrutura urbana para as atividades de distribuição de mercadorias. Além disso, algumas outras medidas foram implantadas na Alemanha, como por exemplo na cidade de Kassel, onde um único operador logístico ficou responsável pelas entregas da cidade de 200 mil habitantes. Além dessas iniciativas, também foram realizados alguns projetos de implantação de plataformas de cargas com sistema multimodal de transporte.

Na França, um projeto foi desenvolvido com parcerias entre o Ministério do Transporte, o Ministério do Meio Ambiente, a Agência de Gerenciamento de Energia e cidades voluntárias, onde foram realizadas pesquisas através de entrevistas com 2.200 motoristas que descreveram

11.300 operações de entregas de mercadorias nas cidades de Bordeaux, Dijon e Marseilles. Com base nestas pesquisas, foram analisados padrões de viagens, ocupação das vias com veículos de carga, distâncias percorridas, entre outros fatores. Ainda a partir dos resultados da pesquisa, foi desenvolvido o modelo FRETURB, que permitiu o desenvolvimento de pesquisas pelas cidades para diagnóstico do transporte urbano de cargas das mesmas. Além disso, para toda cidade com mais de 100 mil habitantes, é obrigatório existir um Plano de Mobilidade Urbana que contempla a logística urbana do ponto de vista multimodal para apoiar na racionalização do abastecimento urbano.

SUGAR (2011) indicou boas práticas na logística urbana em Paris. Como por exemplo, a implantação do conceito de espaços logísticos urbanos (ULS), que, conforme Boudouin (2012), são locais de interface entre produtores e consumidores que podem melhorar a circulação e manuseio de produtos em áreas de alta densidade populacional. Em seu guia de boas práticas, Boudoin (2012) ainda classificou esses espaços em cinco tipos:

- Zonas de logística urbana (ZLU): áreas ocupadas por diferentes empresas e que são dedicadas para atividades ligadas à entrega de mercadorias e algumas outras atividades de manuseio como estoque de curto prazo. Um exemplo de utilização deste tipo de espaço é a plataforma logística operada pelo grupo Sogaris em Marselha, na França. Com área total de aproximadamente 90 mil m², respectivamente, essa plataforma está localizada próximo a um porto e possui acessos a malha rodoviária, ferroviária e de transporte público (Sogaris, 2015).
- Centros de distribuição urbanos (CDU): terminais de consolidação de carga para coletas ou entregas de produtos para uma determinada cidade;
- Pontos de recepção de veículos (PAV): áreas da malha viária onde veículos de carga podem estacionar em períodos de pico de tráfego deste tipo de veículo;
- Pontos de recepção de carga (PAM): pontos de encontro onde veículos de carga podem estacionar e os clientes os encontrariam nestes locais para pegar sua carga. Neste caso, a transportadora não vai até seus clientes diretamente, e os consumidores de uma mesma área podem ir até este ponto de recepção de carga dentro de um período pré-estabelecido.
- Caixas ou Pontos inteligentes de entrega (BLU): são “armários” ou contêineres de variados tamanhos onde a transportadora pode deixar mercadorias de clientes de uma mesma região sem a presença dos mesmos, além de ser uma oferta de armazenagem no período noturno e motivo para consolidação de entregas aos consumidores. Um

experimento deste tipo de espaço logístico urbano foi testado em Paris pela câmara municipal de Paris e a ADEME (Agência do Meio Ambiente) para duas grandes empresas. Estas caixas podem ser visualizadas na Figura 2.3 (SUGAR, 2011).

Figura 2.3 – Pontos inteligentes de entrega
Fonte: Consignity (2013)

Em outros países da Europa, Sanches Junior (2008) identificou outras medidas que foram implantadas para melhoria do transporte urbano de cargas. Como por exemplo, nos Países Baixos, um programa foi iniciado para o combate à poluição e ao congestionamento realizado pelo Ministério de Transporte e Engenharia Civil, nos anos 90. Os principais objetivos desse programa eram diminuir o número de veículos de carga e a quilometragem rodada por eles, otimizando as viagens realizadas pelas empresas; além de incentivar projetos de implantação de centros de distribuição urbana. O autor também cita que em Amsterdã, em 1994, foram aprovadas regulamentações para reduzir a circulação de grandes veículos nos centros urbanos e para respeitar os padrões de emissões de gases EURO2, que entrariam em vigência apenas depois de dois anos.

Na Espanha, SUGAR (2011) identificou outras medidas implantadas, como o uso de faixas multifuncionais em Barcelona. Em sete faixas de vias da cidade, foram utilizadas tecnologias para informar os veículos e os horários nos quais eles podem trafegar, sendo que das 08:00 as 10:00 e das 17:00 as 21:00 essas faixas são utilizadas para uso geral, incluindo ônibus, e das 10:00 as 17:00 são utilizadas apenas por veículos de carga; das 21:00 as 08:00 elas podem ser utilizadas para estacionamento de veículos de residências locais.

Para evitar a circulação de veículos de carga durante os horários de pico, alguns testes de entregas noturnas a supermercados na área central de Barcelona também foram realizados, entre 2006 e 2008, através do projeto SILENCE, financiado pela Comissão Europeia. Para isso,

foram utilizados caminhões e equipamentos mais silenciosos, além de também ser exigido um comportamento adequado dos funcionários para que um limite de ruído medido em decibéis (dB) não fosse ultrapassado. Resultados destes testes mostraram que as entregas foram feitas com sucesso em relação ao ruído em 45% dos casos, sendo que as fontes de maior ruído foram em 62% dos casos os caminhões. Com a melhoria da tecnologia, o limite máximo de ruído imposto pela cidade de 60dB poderá deixar de ser um problema, uma vez que as entregas foram realizadas abaixo de 65dB (SUGAR, 2011).

No entanto, apesar dessas iniciativas implantadas em Barcelona, Muñuzuri et al. (2011) acreditam que essas medidas só serão sucedidas caso haja uma mudança cultural da população e uma maior iniciativa das autoridades locais para lidar com os problemas decorrentes da distribuição urbana de cargas.

Também foram identificadas iniciativas mais pontuais em outros países como a Itália, Suíça, Suécia, Noruega e República Tcheca (SUGAR, 2011).

2.5.2 América do Norte

Sanches Junior (2008) identificou que nos Estados Unidos não há estudos detalhados sobre os agentes da distribuição urbana de mercadorias. Foi levantado também que os modelos de transporte de carga estão mais atrasados em relação aos que tratam de pessoas, sendo que os modelos existentes levam em consideração as demandas regionais, nacionais e internacionais e não levam em consideração o transporte urbano.

O motivo identificado pelo autor para essa falta de interesse em estudos urbanos de carga pode ser uma preocupação mais nas atividades entre as áreas metropolitanas do que nos fluxos intraurbanos ou a menor importância dos centros urbanos nos Estados Unidos em relação à Europa.

Alguns dos poucos estudos identificados foram referentes à região metropolitana de Nova Iorque. Holguin-Veras et al. (2001) elencaram os seguintes fatores considerados problemáticos nessa região:

- Falta de acesso ferroviário eficiente na região oeste do rio Hudson;
- Alta dependência no tráfego rodoviário;
- Altos índices de congestionamento;
- Preocupação com a qualidade do ar;

- Grandes volumes de produtos com necessidade de serem transportados, tanto para consumo interno quanto para outras regiões;
- Fluxos significativos de produtos de alto valor agregado, como diamantes e produtos da moda;
- Falta de projetos de expansão de capacidade para o sistema de transporte de carga de fácil implantação.

Neste estudo, os autores avaliaram alguns métodos para a modelagem do transporte de mercadorias na região metropolitana de Nova Iorque, como o modelo econômico de insumo-produto, o de interação espacial (distribuição de viagens) e a estimativa de uma matriz origem/destino. Essa avaliação resultou na identificação dos métodos mais adequados para ser aplicado na análise dessa região.

Holguin-Veras et al. (2010) também analisaram a possibilidade de entregas noturnas em Manhattan. Para isso, foram realizados projetos pilotos com algumas empresas representativas da região e a aplicação de uma pesquisa junto a estes estabelecimentos avaliando esse procedimento. As empresas envolvidas nesse teste foram: (i) Foot Locker (rede varejista de calçados) e New Deal Logistics (transportadora); (ii) Sysco (distribuidora de alimentos) e alguns clientes; e (iii) Whole Foods Markets (mercado) e suas lojas.

Os receptores das mercadorias participantes receberam 2.000 dólares e as transportadoras que trabalham com as empresas receberam um incentivo monetário no valor de 3.000 dólares além de 300 dólares por caminhão que participou desse projeto piloto.

Para quantificar os tempos de viagens e de paradas para carga e descarga de mercadorias nas empresas e distâncias percorridas, foram utilizados aparelhos *smartphones* com GPS.

Os resultados indicados pelo estudo foram:

- Incentivos financeiros são eficazes para influenciar a mudança de horário de entrega de mercadorias para o período noturno. Pois uma vez que as lojas receptoras são compensadas pelos custos adicionais resultantes de manter funcionários além do horário comercial, eles são incentivados para receber mercadorias neste horário, ao mesmo tempo que as transportadoras se beneficiam com um menor custo de entrega.
- A modelagem de tráfego analisada pelos autores indicou benefícios econômicos com a adoção da entrega noturna, podendo haver incentivos de cerca de 10.000 dólares por ano para cada estabelecimento participante. Os autores acreditam que aproximadamente

7.600 empresas adotariam essa iniciativa, acarretando um custo total de 76 milhões de dólares. Nesse cenário, estimaram que poderia haver um benefício na faixa entre 83 e 129 milhões de dólares.

- Os *smartphones* com GPS indicaram uma velocidade média de cerca de 13 quilômetros por hora com tempo de parada média de 30 minutos durante a entrega noturna, enquanto que no horário comercial essa velocidade é de cerca de 5 quilômetros por hora e o tempo de parada chega a ser superior a 90 minutos.

No Canadá, Sanches Junior (2008) identificou pesquisas realizadas pelos ministérios dos transportes das províncias que tratam da movimentação urbana de cargas, cujos objetivos são:

- Determinação do impacto das movimentações de produtos na atividade econômica;
- Avaliação dos custos de congestionamento;
- Identificação de gargalos;
- Identificação de soluções para controle da movimentação de caminhões;
- Identificação dos impactos de entregas em fila dupla;
- Identificação dos fluxos de cargas perigosas;
- Otimização dos veículos.

2.5.3 Oceania

Na Austrália, Sanches Junior (2008) identificou alguns estudos realizados para entender o fenômeno da carga acerca da relação existente entre o transporte de carga, a produção de produtos e a eficiência funcional das áreas metropolitanas. Porém, estas pesquisas não foram consideradas conclusivas e mais estudos foram recomendados para melhor entendimento e maior consolidação dos resultados.

2.5.4 Ásia

No continente asiático, o Japão é o país que se destaca mais quanto a estudos realizados na área em questão. As pesquisas realizadas tinham como objetivo o desenvolvimento de ferramentas de modelagem para a avaliação de medidas que auxiliem nos problemas gerados pela distribuição urbana de mercadorias (SANCHES JUNIOR, 2008).

Os modelos identificados por Sanches Junior (2008) foram de roteirização e de localização de terminais. No caso do modelo de roteirização, uma abordagem tradicional deste método aliado

de um modelo de fluxo dinâmico demonstrou avaliar a implementação de um sistema avançado de roteirização, a cooperação entre as empresas de transporte e um controle de otimização do carregamento do veículo. Os modelos de localização de terminais foram estudados pelo autor com objetivo de limitar os impactos da circulação dos veículos comerciais na cidade, proteger o meio ambiente, melhorar o nível de serviço prestado e diminuir os custos do transporte.

Ainda de acordo com o autor, foram utilizados vários sistemas de informações avançados com o objetivo melhorar a eficiência, otimizar a duração da carga/descarga e aumentar a segurança para a cadeia de suprimentos: Serviço de Informações Avançadas sobre o Trânsito, Sistemas de Veículos Super Inteligentes, Sistemas Avançados de Gerenciamento do Trânsito e Sistemas Avançados de Controle do Veículo.

2.6 Estudos e projetos de logística urbana no Brasil

No Brasil, em 1970 a população que residia em áreas urbanas era quase de 53 milhões de habitantes, representando pouco mais de 55% do total. Este número passou para mais de 160 milhões em 2010, ou 85%, (IBGE, 2013). Este crescimento urbano indica a importância do desenvolvimento de estudos nesta área para minimizar os problemas que o transporte urbano de cargas tem trazido nas principais cidades do país.

Foram identificados poucos estudos relacionados a este tema no país. Sanches Junior (2008) realizou uma pesquisa com 20 administradores públicos municipais responsáveis pela elaboração das políticas de trânsito de diferentes cidades para avaliar o seu entendimento quanto aos seguintes aspectos:

- Informações Gerais da cidade pesquisada;
- Informações Organizacionais da Administração Pública;
- Aspectos Econômicos da Cidade que impactam na mobilidade urbana;
- Aspectos Conceituais da Logística de Carga Urbana;
- Percepções da situação atual da cidade quanto à carga urbana;
- Percepções da situação ideal para a cidade quanto à carga urbana;
- Tipos de soluções e estratégias adotadas pela cidade;
- Tipos de pesquisas realizadas;
- Base de Dados disponíveis.

Com base nos resultados da pesquisa, notou-se que 60% dos entrevistados não entendem que mobilidade urbana contempla as atividades relacionadas à carga. Também foi verificado que a maioria das cidades não possui estudos acerca de soluções logísticas de carga urbana e que não possuem nenhuma ferramenta para este propósito. Os administradores públicos normalmente tratam dos problemas de congestionamento e transporte coletivo, negligenciando o transporte de carga. Muitos acreditam que isso se dá pela falta de conhecimento deste setor (SANCHES JUNIOR, 2008).

As cidades com menor densidade populacional consideram carga urbana apenas produtos de consumo, movimentações de empresas de serviço e da construção civil. Em cidades com maior densidade, todas as atividades começam a ser consideradas, com exceção de abastecimento de água, eletricidade e gás. Essas cidades de maior densidade populacional ainda incluem todas as etapas no conceito de logística urbana, como o planejamento da distribuição, circulação dos veículos de carga e entrega das mercadorias.

Sanches Junior (2008) concluiu que, devido à falta de entendimento do conceito de mobilidade urbana, transporte, distribuição de carga e da própria carga em si, há dificuldade da parte do governo em implementar política de mobilidade urbana sustentável no país. Seriam necessárias regulamentações e orientações para evitar que diferenças conceituais façam com que cidades proponham soluções enviesadas.

Já na parte de modelagem referente a este tema, Dutra (2004) elaborou um modelo de localização de uma central de entregas, considerando diferentes cenários de adesão para o novo sistema. O modelo foi aplicado na área central de Florianópolis, onde foram estimados os custos envolvidos de mão-de-obra, operação e instalações, entre outros, a fim de obter os benefícios da implantação desse sistema para distribuição de mercadorias na região.

Oliveira (2007) desenvolveu “uma metodologia para analisar a viabilidade dos pontos de entrega inteligentes no Brasil, analisando a adesão ao serviço e os impactos econômicos e ambientais”. A metodologia elaborada incluiu um modelo de adesão ao sistema e outro que permite dimensionar de maneira preliminar a quantidade de equipamentos e veículos. A abordagem proposta foi aplicada para validação na Região Metropolitana de Florianópolis com três diferentes cenários de divulgação do sistema proposto (intensa, moderada e sem divulgação), onde por meio de redução da tarifa de distribuição e da diminuição de emissão de gases poluentes pôde-se observar ganhos econômicos e ambientais.

Alguns estudos acadêmicos também foram realizados para a cidade de Belo Horizonte (MG) buscando ferramentas para melhorar sua distribuição urbana de mercadorias. Entre estas pesquisas encontram-se: análise econômica e ambiental da implantação de um centro de distribuição urbano; identificação e quantificação dos pesos dos atributos que os varejistas levam em consideração para receber mercadorias durante o período noturno através de uma pesquisa de preferência declarada; entendimento das origens e destinos de fluxos de carga na área central de Belo Horizonte e avaliação da ocupação de vagas para carga e descarga (CORREIA; GUERRA; OLIVEIRA, 2012; OLIVEIRA; BRAGA; ALVES, 2010; OLIVEIRA; DIAS; HOFFMAND, 2011).

Outra cidade estudada foi Fortaleza (CE), onde Prata e Arruda (2007) realizaram um diagnóstico de sua distribuição urbana de mercadorias, identificando motivos para não existir um planejamento deste tipo de transporte e sugerindo possíveis iniciativas para uma melhoria nesta área.

Além dos estudos acima citados, foi identificado um grupo de pesquisadores, órgãos públicos e operadores logísticos que criaram o Centro de Logística Urbana do Brasil (CLUB) em 2011, com o intuito de difundir o conhecimento teórico e prático sobre logística urbana no país através de encontros temáticos e grupos de discussão com a participação de diversos atores envolvidos neste tema. Esse tipo de grupo de discussão é muito importante para os avanços do assunto no país.

No aspecto de regulamentações, algumas cidades possuem restrições de circulação de veículos de carga em certas áreas. A primeira cidade a implantar essa iniciativa foi São Paulo ao regulamentar o veículo urbano de carga (VUC) e o veículo leve de carga (VLC) através do Decreto nº 37.185 de 20 de novembro de 1997 (SANCHES JUNIOR, 2008). Conforme este decreto, a definição de VUC é um veículo com capacidade útil de carga superior a 1.500 kg, mas largura máxima de 2,20 m e comprimento máximo de 5,50m; o VLC pode ter comprimento de até 6,30m. A partir de 2007, um novo decreto entrou em vigor, extinguindo o termo VLC e considerando como VUC as duas categorias de veículos anteriormente estabelecidas (SÃO PAULO, 2007).

Em complementação ao decreto de 1997 que já instituía áreas e horários de restrições de circulações de caminhões; o decreto de 2007 definiu também o termo polos geradores de tráfego e seus horários de carga e descarga.

Outras cidades que possuem restrições semelhantes a estas são Curitiba e Belo Horizonte.

Além dessas regulamentações, foi estabelecido o Plano Nacional de Mobilidade Urbana (PNMU), que institui através da Lei Nº 12.587 de 3 de janeiro de 2012 que todos os municípios com mais de 20.000 habitantes deverão incluir em até três anos um Plano de Mobilidade Urbana em seu Plano Diretor. O PNMU considera carga dentro dos aspectos de transporte urbano e de mobilidade urbana de acordo com as seguintes definições:

I - transporte urbano: conjunto dos modos e serviços de transporte público e privado utilizados para o deslocamento de pessoas e cargas nas cidades integrantes da Política Nacional de Mobilidade Urbana;

II - mobilidade urbana: condição em que se realizam os deslocamentos de pessoas e cargas no espaço urbano;

Conforme esta lei, o Plano de Mobilidade Urbana a ser elaborado pelas cidades deverá conter os princípios, os objetivos e as diretrizes da operação e o disciplinamento do transporte de carga na infraestrutura viária.

Em 2008, Curitiba, município no qual foi baseado este estudo de caso, publicou a Proposta Preliminar do Plano de Mobilidade Urbana e Transporte Integrado – PlanMob Curitiba, previsto na Lei Municipal nº 11.266 de 16 de dezembro de 2004 - Adequação do Plano Diretor de Curitiba ao Estatuto da Cidade.

O objetivo principal deste plano foi “estabelecer políticas, diretrizes e planos de ação, para o cenário de 2020, com revisões periódicas, relativos à mobilidade urbana, objetivando a promoção da cidadania e inclusão social, o aperfeiçoamento institucional, regulatório e da gestão, através de ações integradas de desenvolvimento urbano, de mobilidade e de proteção ao meio ambiente”.

O plano já considerou o sistema de transporte de cargas, apresentando um diagnóstico deste setor e algumas recomendações aos setores público e privado para um transporte mais seguro e sustentável.

2.7 Considerações finais sobre a logística urbana

Neste capítulo foi apresentado o conceito de logística urbana, sendo que alguns autores divergem e se complementam ao buscar sua definição. Todos os autores concordam que o conceito envolve a movimentação de mercadorias dentro do meio urbano devido as suas

necessidades econômicas. Há divergências na inclusão ou não de veículos de serviço, viagens por motivos de compras e de alguns produtos.

Posteriormente foram identificados motivos descrevendo a importância deste assunto devido ao seu papel importante no cotidiano das cidades e aos impactos que são gerados. Além disso, também foram definidos os agentes atuantes na distribuição urbana de mercadorias: embarcadores, população, transportadoras e administradores públicos.

O conceito de *City Logistics* foi definido e trata da aplicação de soluções para um planejamento integrado do sistema buscando a otimização das diversas atividades logísticas que compõe a distribuição urbana de mercadoria, envolvendo o setor público e privado em parcerias e colaborações com o objetivo de minimizar os impactos sociais, econômicos e ambientais.

Em seguida foram identificadas medidas de melhorias da logística urbana através de estudos realizados na área, sendo a iniciativa de implantação de um centro de distribuição mais detalhada por ser central nesta dissertação.

Por último foram apresentados estudos e projetos no âmbito internacional e no Brasil acerca deste assunto. Os estudos referentes a este tema não acompanharam o crescimento da movimentação urbana de cargas, ao contrário do transporte de pessoas que já é um assunto tratado em diversos estudos e projetos (RENAN E GARRIDO, 2002).

Pôde-se verificar que a Europa é o local com mais estudos e onde mais dessas medidas foram implementadas, por lá existir uma maior preocupação com os centros urbanos em comparação aos Estados Unidos. Os poucos estudos identificados nesse último país se concentram na região de Nova Iorque.

Também é bastante notável como no Brasil este assunto ainda é pouco estudado, apesar do número de estudos encontrar-se em evolução. Sanches Junior (2008) resume a evolução destes estudos no mundo e no Brasil e mostra como o país está defasado neste tema, como pode ser visto na Figura 2.4.

Foram identificados trabalhos acadêmicos no Brasil buscando ferramentas de avaliação de medidas para auxiliar no problema da última milha e um estudo buscando avaliar o que os administradores públicos entendem sobre o conceito de logística urbana. Também foram levantadas pesquisas para as cidades de Belo Horizonte e Fortaleza, assim como regulamentações existentes quanto à distribuição urbana de mercadorias.

Na Figura 2.4 pode-se notar que ainda há áreas para o desenvolvimento de melhorias na distribuição urbana de mercadorias no mundo. Sanches Junior (2008) acredita que apenas a partir de 2020 as medidas estarão implantadas a ponto de somente serem monitoradas ou aprimoradas, sendo que isso ocorreria no Brasil apenas em 2040.

	Década 70 (sec. XX)	Década 80 (sec. XX)	Década 90 (sec. XX)	Década 00 (sec. XXI)	Década 10 (sec. XXI)	Década 20 (sec. XXI)	Década 30 (sec. XXI)
Europa	Já realizado			Em andamento	Previsão		
	<ul style="list-style-type: none"> • Primeiras regulamentações das atividades da carga urbana (restrições de acesso) 		<ul style="list-style-type: none"> • Processo de urbanização e emergência dos problemas de mobilidade. • Início da compreensão do problema do transporte de carga. • Surge o conceito de <i>City Logistics</i>. 	<ul style="list-style-type: none"> • Definição das diretrizes da carga urbana. • Início do processo de coleta de dados das atividades de carga urbana, padronização das informações entre as cidades, visando o planejamento das atividades da movimentação da carga urbana 	<ul style="list-style-type: none"> • Desenvolver e implantar soluções de logística de carga urbana 	<ul style="list-style-type: none"> • Monitorar e aprimorar 	<ul style="list-style-type: none"> • Monitorar e aprimorar
Brasil	Já realizado				Previsão		
			<ul style="list-style-type: none"> • Primeiras regulamentações das atividades da carga urbana (restrições de acesso) 	<ul style="list-style-type: none"> • Processo de urbanização e emergência dos problemas de mobilidade. • Início da compreensão do problema do transporte de carga. • Surge o conceito de <i>City Logistics</i>. 	<ul style="list-style-type: none"> • Definição das diretrizes da carga urbana. • Início do processo de coleta de dados das atividades de carga urbana, padronização das informações entre as cidades, visando o planejamento das atividades da movimentação da carga urbana 	<ul style="list-style-type: none"> • Desenvolver e implantar soluções de logística de carga urbana 	

Figura 2.4 – Resumo da evolução da logística urbana e perspectivas para a Europa e Brasil
Fonte: Sanches Junior, 2008

3 PROBLEMAS DE LOCALIZAÇÃO-ROTEIRIZAÇÃO

Como observado no capítulo anterior, a implantação de centros de distribuição urbanos pode trazer benefícios para os setores público e privado como, por exemplo, a diminuição do tráfego urbano e de emissões de poluentes, uma vez que a consolidação de mercadorias nessas instalações permite uma maior ocupação dos veículos que atendem os estabelecimentos de uma cidade.

Para implantação dessa medida, é necessário quantificar e determinar os melhores locais para essas instalações, o que pode ser modelado como um problema de localização-roteirização.

Segundo Lin et al. (2009), o problema de localização-roteirização (*location routing problem – LRP*) pode ser definido como determinar os locais onde os depósitos devem ser instalados e os roteiros dos veículos, minimizando os custos totais de implantação e de distribuição de mercadorias aos consumidores, dado um conjunto de clientes com demanda conhecida e um conjunto de depósitos candidatos. Cada cliente é associado a um depósito e cada rota deve começar e terminar em um mesmo depósito. Além disto, um custo fixo é determinado para a abertura de cada instalação e um custo de distribuição é associado à rota percorrida pelos veículos.

Deste modo, problemas de localização-roteirização combinam dois problemas clássicos da literatura: localização de instalações e roteirização de veículos. Esses tipos de problemas estão correlacionados e são essenciais para um sistema de distribuição (MARTINEZ-SALAZAR et al., 2014).

A localização de um estabelecimento, em geral, pode influenciar o sucesso ou o fracasso do empreendimento. Os modelos de localização de instalações são elaborados para quantificar, indicar a melhor localização, dimensionar e definir a demanda de cada estabelecimento (DASKIN, 1995), sendo esse um problema estudado na comunidade acadêmica há muitos anos (YOSHIZAKI; MONTIBELLER, 2011; BALLOU, 2006).

Problemas de roteirização de veículos (PRV) envolvem identificar roteiros para veículos que devem atender a demanda de um grupo determinado de consumidores com menor custo possível. Cada roteiro deve iniciar e terminar em um depósito e somente é possível visitar cada consumidor uma vez única vez (SOLOMON, 1987).

A correlação existente entre esses dois problemas já foi apontada por diversos autores, sendo que foi comprovado que estudá-los independentemente pode levar a resultados subótimos. No

entanto, antigamente não era possível tratar esse tipo de problema devido à tecnologia não estar tão bem desenvolvida, mas isso vem sendo cada vez mais estudado (PRODHON; PRINS, 2014; DREXL; SCHNEIDER, 2013). Apesar disso, Nagy e Salhi (2007) identificaram outros motivos para que alguns autores ainda tratem esses modelos de forma separada:

- Há situações em que problema de localização não precisam considerar roteirização.
- Alguns autores acreditam que identificar a localização de uma instalação é um problema estratégico, enquanto a roteirização é um problema tático. Porém, outros autores já provaram que o uso de LRP pode diminuir custos a longo prazo, mesmo quando há a possibilidade de rotas serem alteradas.
- O LRP é conceitualmente mais difícil que um problema clássico de localização.

3.1 Tipos de problemas de localização-roteirização

Segundo Prodhon e Prins (2014), antigamente, muitos estudos consideravam o problema de localização-roteirização com depósitos sem limite de capacidade. Ainda segundo levantamentos bibliográficos feitos por esses autores e, também, por Nagy e Salhi (2007), restrições de capacidade tem sido consideradas nos últimos anos, conforme a Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Tipos de artigos desenvolvidos em modelos de localização-roteirização em 2007 a 2013

Tipo de modelo	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	total
LRP com veículos sem limite de capacidade	1	0	0	1	0	1	1	4
LRP com CDs sem limite de capacidade	0	1	0	0	1	1	2	5
CLRP	2	1	1	2	4	2	6	18
LRP com 2 níveis de CDs	1	0	1	1	1	4	0	8
LRP com objetivos especiais ou múltiplos	1	1	0	1	1	3	0	7
LRP com mais de um período de análise	0	1	0	1	1	1	0	4

Fonte: Adaptado com base em Prodhon e Prins (2013)

Os modelos estudados também consideram outros tipos de restrições, sendo que Drexel e Schneider (2013) identificaram e classificaram as características dos tipos de problemas de localização-roteirização encontrados na literatura:

- Determinístico, estocástico ou *fuzzy data*: as informações relacionadas a este tipo de problema podem ser conhecidas (determinístico), podem ser dadas na forma de

distribuição probabilística (estocástico) ou através de parâmetros na forma de números *fuzzy* (*fuzzy data*).

- Discreto, contínuo ou em rede: os locais candidatos para implantação de instalações podem ser representados através de um conjunto de vértices (discreto), em algum ponto de um plano (contínuo) ou também em um vértice de uma rede ou grafo (em rede).
- Único ou múltiplos níveis: o sistema de distribuição pode ser feito através de um nível de centros distribuição, ou seja, ser transportado de um fornecedor para o cliente via apenas um centro. Como também, esse transporte pode ser feito por N níveis dessas instalações (*N-echelon*), de modo que o produto passaria por N centros até chegar a seu consumidor.
- Estático, dinâmico ou periódico: essa classificação é referente ao período de tempo analisado. Desse modo, problemas estáticos consideram um período único de planejamento e problemas dinâmicos possuem mais de um período de planejamento, além de nem toda informação ser conhecida a priori e só ser adquirida ao longo do decorrer do tempo. Já em problemas periódicos, toda a informação é conhecida inicialmente e a análise é feita para diversos períodos com o objetivo de identificar padrões de resultados.
- Objetivo único ou múltiplo: grande parte dos modelos considera apenas um único objetivo, como a minimização de custos ou distâncias. No entanto, alguns modelos possuem mais de um objetivo, incluindo maximização de nível de serviço ou receita.
- Entrega ou coleta: existem várias possibilidades de consideração de entregas ou de coletas no modelo:
 - Apenas entregas a partir dos centros de distribuição para os clientes;
 - Coletas de cliente para ser transportado até os centros de distribuição;
 - Coletas de produtos em clientes para entrega em outros consumidores;
 - Coleta e entrega no mesmo local.
- Problema generalizado (*Generalized LRP – GLRP*): neste tipo de modelo, os clientes são agrupados e seu objetivo é encontrar rotas que comecem e terminem em um depósito e que passem por um cliente de cada grupo apenas uma vez.
- *Prize-Collecting LRP* (PCLRP): nesse tipo de modelo, uma penalidade é inclusa para que haja possibilidade de que algum cliente não seja incluído em nenhuma rota.
- Entrega parcelada (*Split delivery LRP – SDLRP*): alguns modelos permitem que alguns clientes sejam visitados mais de uma vez para que toda sua demanda seja atendida.

- *Location Arc-Routing Problem (LARP)*: neste tipo de modelo, os serviços realizados ocorrem nos arcos e não em seus vértices.

Nagy e Salhi (2007) também indicaram outras características:

- Estrutura hierárquica: além das possibilidades já listadas anteriormente de diferentes níveis de centro de distribuição, existem extensões de modelo que permitem transporte entre fornecedores.
- Método de solução: os modelos de localização-roteirização podem ser resolvidos por métodos exatos de otimização incluindo relaxação ou introdução de variáveis, como por exemplo, eliminação de subciclos e rotas não permitidas. Também podem ser resolvidos através de heurísticas, metaheurísticas ou algoritmos híbridos, como descritos no item 3.2.
- Número de depósitos: a maioria dos estudos consideram modelos com múltiplos depósitos e geralmente assume-se que sua quantidade não é dada a priori. Porém também foram encontrados estudos em que os modelos localizam apenas um depósito, como por exemplo, o *travelling salesman location problem*.
- Número e tipos de veículos: a maior parte dos estudos considera um número não fixo de veículos e uma frota homogênea, apesar de terem sido identificados trabalhos que adotaram outras abordagens.
- Estrutura da rota: como já descrito anteriormente, grande parte dos modelos considera rotas que iniciam e terminam nos centros de distribuição e que passam por cada cliente uma única vez, mas existem estudos que consideram outras estruturas de rotas, com entregas e coletas de maneiras diferentes e viagens múltiplas.

3.2 Métodos de solução

Em suas pesquisas bibliográficas, Prodhon e Prins (2014) e Nagy e Salhi (2007) identificaram métodos de solução para os problemas de localização-roteirização, sendo estes:

- Métodos exatos para problemas determinísticos;
- Heurísticas;
- Metaheurísticas;
- Algoritmos híbridos (*matheuristics*);
- Problemas estocásticos e dinâmicos.

3.2.1 Métodos exatos para problemas determinísticos

Existem poucas publicações sobre métodos exatos para solução de problemas de localização-roteirização, por serem a combinação de dois problemas já NP-difíceis (PRODHON; PRINS, 2014). Por este mesmo motivo, métodos exatos são aplicados a problemas pequenos, com cerca de 40 locais candidatos a centros de distribuição ou 80 pontos de consumo (NAGY; SALHI, 2007). Esses autores também indicaram que os modelos resolvidos com métodos exatos utilizaram soluções com planos de corte, *branch-and-bound* e *branch-and-cut*.

3.2.2 Heurísticas

Nagy e Salhi (2007) classificaram as heurísticas de solução de problemas de localização-roteirização em 4 tipos:

- Métodos sequenciais: esses tipos de métodos resolvem o problema de localização minimizando a soma das distâncias entre o CD e os clientes e, depois, solucionam os problemas das rotas baseados no local encontrado para implantação do CD. Balakrishnan et al. (1987), Salhi e Rand (1989) e Salhi e Nagy (1999) indicaram que esse tipo de método encontra resultados subótimos; Nagy e Salhi (2007) já concluíram que o método é válido para comparação com outras heurísticas quando nenhuma outra avaliação está disponível.
- Métodos baseados em agrupamentos (*clustering*): esses tipos de métodos de solução consistem em dividir os clientes em grupos (*clusters*). Cada grupo pode representar um CD ou a rota de um veículo.
- Métodos iterativos: consistem em decompor o problema em dois, de modo que eles interajam entre si ao fornecer informações de um subproblema para o outro.
- Heurísticas hierárquicas: nestes tipos de heurísticas, o problema também é decomposto em dois subproblemas. No entanto, o problema principal é o de localização e a cada fase um subproblema de roteirização é resolvido. Nagy e Salhi (2007) acreditam que este método retrata melhor a realidade e também fornece os melhores resultados.

3.2.2.1 Métodos baseados em agrupamentos (*clustering*)

Nesta dissertação é adotado o método baseado em agrupamentos, utilizando o *software* comercial TransCAD, entre outros, para sua resolução. Cada grupo de clientes representa uma

rota de veículos. Deste modo, este item resume os tipos de modelos baseados em agrupamentos encontrados na literatura.

Prodhon e Prins (2014) classificam o método de agrupamento de pontos (*clustering*) como uma heurística construtiva. Segundo estes autores, o uso de metaheurísticas tem fornecido melhores resultados, mas adotar o método de agrupamento tem sido útil para achar soluções viáveis rapidamente para problemas com muitos clientes ou para inicializar algum algoritmo. O uso de um desses modelos neste trabalho possibilitou a verificação dessa afirmação.

A utilização deste procedimento para solução de problemas de localização-roteirização já tinha sido reconhecida por alguns autores desde a década de 60 (BARRETO et al., 2007).

Ao adotar o método de agrupamentos de pontos para inicializar a solução de um LRP (conhecido na literatura como *cluster-first route-second*), o procedimento pode continuar de duas maneiras: (i) localização do CD para cada grupo de clientes, e aplicação da roteirização para obter o roteiro de cada veículo; ou (ii) solução da roteirização para cada *cluster*, e então, obter a localização do CD.

O primeiro caso pode ser exemplificado pelo trabalho de Srivastava (1993). Esse autor analisa três tipos de soluções para resolver um modelo de localização-roteirização, sendo que um deles envolvia a montagem de *clusters*. Nessa solução, após a etapa de formação dos agrupamentos, o depósito era localizado como o ponto mais próximo ao centro do *cluster*, sendo que o número de instalações implantadas correspondia a quantidade de agrupamentos do problema. Depois, a roteirização era aplicada à cada *cluster*, para obter os roteiros de cada veículo.

Já Lopes et al. (2008) utiliza o segundo procedimento quando propõem uma ferramenta de suporte de decisão para problemas de localização-roteirização. Essa ferramenta adota quatro fases para sua resolução, sendo que a primeira fase também consiste no agrupamento dos clientes, porém a capacidade de cada *cluster* corresponde ao veículo adotado para o sistema de distribuição. Depois, são construídas as rotas para cada *cluster* e uma heurística de *3-optimal local search* é aplicada para melhoria das rotas obtidas. Com base nas distâncias e no tamanho dessas rotas são então localizados os depósitos que devem ser implantados segundo um modelo de localização cuja função objetivo minimiza o custo total de implantação dos depósitos e da distribuição.

Crainic et al. (2008) utiliza o método de montagem de *clusters* para resolução de problemas com dois níveis de centros de distribuição (*2-echelon problem*), como ilustra a Figura 3.1. O

primeiro nível de CDs é caracterizado por instalações maiores localizadas em áreas mais periféricas da cidade e que abastecem o segundo nível de CDs (satélites) que possuem menor capacidade e estão mais próximos às regiões centrais e comerciais.

Os autores ainda avaliaram diversas metaheurísticas para resolver esse problema com duas abordagens diferentes, sendo os clientes agrupados inicialmente em ambas: no primeiro caso, cada *cluster* é alocado a um satélite e a roteirização é calculada para cada um dos *clusters*; no segundo caso, é resolvido o PRV com múltiplos depósitos, onde o problema não trata de localizar um depósito que deve ser implantado, mas de alocar a demanda a instalações já existentes.

Figura 3.1 – Exemplo de um sistema de distribuição com dois níveis de CDs

Fonte: Próprio autor

Também foram encontrados modelos que invertem as etapas de agrupamento e roteirização, ou seja, consideram a separação dos clientes após a fase de construção das rotas (*route-first cluster second*), como exemplifica a Figura 3.2.

Figura 3.2 – (a) Exemplo de método de *cluster-first route-second*
 (b) Exemplo de método de *route-first cluster-second*
 Fonte: Prins, Lacomme e Prodhon (2014)

De acordo com Prins, Lacomme e Prodhon (2014), a utilização dessa abordagem tem crescido desde 2002. Isso se deve aos seguintes motivos:

- Possui um menor espaço de solução quando comparada com a aplicação de metaheurísticas, uma vez que busca um conjunto de grandes rotas em vez de um grande conjunto de soluções para o problema de roteirização capacitada;
- Suporta restrições adicionais de janelas de tempo, múltiplos depósitos não-capacitados e frota heterogênea e ilimitada de veículos, sem que haja aumento na complexidade do modelo.

3.2.3 Metaheurísticas

Para casos onde há limite de capacidade para os CDs mas o mesmo não acontece nos veículos, foram identificados estudos que utilizaram metaheurísticas como: busca-tabu (ALBAREDA-SAMBOLA et al., 2005), *iterated local search* (ILS) (DERBEL et al., 2010), combinação de um algoritmo genético com ILS (DERBEL et al., 2012) e *variable neighborhood search* (VNS) (JARBOUI et al., 2013), todos utilizando as mesmas instâncias para comparação. Entre esses quatro casos, o VNS conseguiu o melhor resultado, com uma diferença de 9,70% em relação à solução ótima com menor tempo computacional, como mostra a Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Comparação de performance de metaheurísticas para modelos de localização-roteirização com limite de capacidade de CDs e sem limite para veículos

Metaheurísticas	Diferença com limite inferior (%)	Tempo computacional (em segundos)	Computador
Busca-tabu	10,46	62,20	Sun Sparc 0.1
ILS	9,83	3,52	Pentium IV 3.20
GA+ILS	9,81	4,70	Pentium IV 3.20
VNS	9,70	1,17	Core 2 Duo 2.40

Fonte: Adaptado com base em Prodhon e Prins (2014)

Já para casos com limites de capacidade também nos veículos, verificou-se a utilização de metaheurísticas de *greedy randomized adaptive search procedure* (GRASP) (PRINS et al., 2006), combinação de GRASP com *evolutionary local search* (ELS) (DUHAMEL et al., 2010), *simulated annealing* (SA) (YU et al., 2010; JOKAR; SAHRAEIAN, 2012), *variable neighborhood descent* (VND) (JABAL-AMELI; ARYANEZHAD; GHAFARI-NASAB, 2011), *adaptive large-neighborhood search* (ALNS) (HEMMELMAYR; CORDEAU; CRAINIC, 2012) e colônias de formigas (MACO) (TING; CHEN, 2013).

Grande parte desses estudos testaram as mesmas instâncias de Tuzun e Burke (1999), Barreto (2004) e Prodhon (2006), o que permitiu a comparação de seus resultados. Os algoritmos que chegaram nas melhores soluções foram o de colônia de formigas, SA e ALNS (Tabela 3.3), sendo que o último encontrou a melhor solução para a instância de Tuzun e Burke (1999) e as terceiras melhores soluções nas demais instâncias (Prodhon e Prins, 2014).

Tabela 3.3 – Comparação de performance de metaheurísticas para modelos de localização-roteirização com limite de capacidade de CDs e veículos

Instâncias	Tuzun e Burke		Barreto		Prodhon		Computador
Metaheurísticas	Diferença com lim. inferior (%)	Tempo computacional (s)	Diferença com lim. inferior (%)	Tempo computacional (s)	Diferença com lim. inferior (%)	Tempo computacional (s)	
GRASP	3,16	163	1,62	20	3,50	97	Pentium IV 2.40
GRASP+ELS	0,97	607	0,07	188	0,97	258	Core 2 Quad 2.83
SA	1,16	826	0,29	161	0,31	422	Core 2 Quad 2.60
VND	5,59	-	4,17	-	-	-	Core 2 Duo 2.00
ALNS	0,11	830	0,15	177	0,30	451	AMD Opteron 2.20
MACO	0,91	202	0,07	49	0,26	191	Athlon XP 1.83

Fonte: Adaptado com base em Prodhon e Prins (2013)

3.2.4 Algoritmos híbridos (*matheuristics*)

Nos algoritmos híbridos, foram identificados estudos que utilizaram heurísticas com métodos exatos para a solução dos problemas. O primeiro algoritmo híbrido utilizado foi a *Lagranean relaxation-granular tabu search* (LRGTS) (PRINS et al., 2007; PRODHON; PRINS, 2014), onde, para cada iteração, os clientes de uma rota foram agregados em único grande consumidor e, então, o problema de localização do CD com limite de capacidade foi resolvido através da relaxação lagrangeana e de uma busca tabu granular.

A utilização de outros algoritmos híbridos também foi constatada:

- *2-phase hybrid granular tabu search* (2-phase HGTS) (ESCOBAR; LINFATI; TOTH, 2013): algoritmo similar ao de Prins et al. (2007), utilizando a busca tabu granular e programação linear inteira;
- GRASP + programação linear inteira (ILP) (CONTARDO; CORDEAU; GENDRON, 2013): em uma primeira fase é encontrado um conjunto de soluções viáveis através da heurística GRASP; depois, um modelo de localização-realocação é resolvido, sendo que para um conjunto de rotas e outro conjunto de clientes, o modelo acha uma solução ótima mudando a localização do CD e realocando os clientes;

- Procedimentos usando VLNS baseados em programação linear inteira (PIRKWIESER; RAIDL, 2010): parte do algoritmo, a construção da vizinhança, é realizada por um modelo de cobertura utilizando geração de colunas.

Todos os trabalhos utilizaram as mesmas instâncias descritas no item 3.2.3, possibilitando a comparação do seu desempenho.

O resultado obtido pela combinação de GRASP e programação linear inteira obteve os melhores resultados entre todos os algoritmos híbridos e é a melhor solução obtida para a instância de Prodhon quando comparada com as metaheurísticas da Tabela 3.3. Entretanto, o tempo computacional foi muito elevado quando comparado aos outros algoritmos devido ao grande número de problemas lineares envolvidos.

Em contrapartida, a combinação de VLNS com a programação linear inteira e LRGTS são os dois algoritmos mais rápidos, mesmo quando comparados às metaheurísticas descritas anteriormente, como mostra a Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Comparação de performance de algoritmos híbridos para modelos de localização-roteirização com limite de capacidade de CDs e veículos

Instâncias	Tuzun e Burke		Barreto		Prodhon		Computador
Algoritmos híbridos	Diferença com lim. inferior (%)	Tempo computacional (s)	Diferença com lim. inferior (%)	Tempo computacional (s)	Diferença com lim. inferior (%)	Tempo computacional (s)	
LRGTS	1,51	22	1,66	18	0,64	18	Pentium IV 2.40
2P-HGTS	0,82	392	0,78	105	0,43	176	Core 2 Duo 2.00
GRASP+ILP	0,34	2255	0,45	135	0,12	1129	Xeon 3.00
VLNS	-	-	-	-	0,77	7	Core 2 Quad 2.83

Fonte: Adaptado com base em Prodhon e Prins (2013)

3.2.5 Problemas estocásticos e dinâmicos

No levantamento bibliográfico realizado por Nagy e Salhi (2007) observou-se que, em todos os casos estudados, a única informação estocástica é a demanda dos clientes, sendo que na maioria desses casos também são considerados apenas um único CD e único um veículo. Esse tipo de problema é conhecido como *travelling salesman location problems*, para o qual dois métodos de solução foram encontrados. Em ambos os casos, o objetivo foi localizar o CD minimizando

a distância percorrida, porém em (i), para cada subgrupo de clientes, uma rota é construída, e em (ii) uma rota com todos os clientes é encontrada a priori e há dias em que a rota estabelecida pula clientes que não possuem demanda.

Para os problemas dinâmicos, o período de análise é dividido em um determinado número de partes, onde há variação de demanda entre elas. Para esses tipos de problemas também existem dois casos: (i) os CDs são localizados sequencialmente, sendo mais aplicado quando a demanda é crescente; ou (ii) os CDs são localizados no início do horizonte de análise e as rotas dos veículos mudam conforme a variação da demanda, sendo mais aplicado quando a demanda é flutuante (NAGY; SALHI, 2007).

3.3 Considerações finais sobre modelos de localização-roteirização

Neste capítulo, foi apresentada a definição de modelos de localização-roteirização, a classificação elaborada por Drexl e Schneider (2013) sobre as variantes existentes deste tipo de problema e os métodos de soluções encontrados na literatura.

Por tratar de um problema NP-difícil, soluções exatas são aplicadas apenas para instâncias pequenas, sendo que autores normalmente adotam heurísticas, metaheurísticas e algoritmos híbridos para resolvê-lo. Com o objetivo de comparar os resultados encontrados e a eficiência de sua solução, os autores utilizam as mesmas instâncias.

Algumas heurísticas utilizam o agrupamento de clientes (*clusters*) como parte da solução, sendo este o método adotado no modelo deste trabalho. Por ser uma ferramenta útil no início do procedimento de solução de problemas com muitos clientes (PRODHON; PRINS, 2014), o modelo foi aplicado em um estudo de caso com cenários envolvendo entre 30.000 e 65.000 pontos de atendimento.

4 MODELO APLICADO

O modelo proposto para esta dissertação tem como objetivo a localização de centros de distribuição onde cargas podem ser consolidadas, procurando diminuir o número de veículos circulando no meio urbano.

A abordagem adotada consiste nas etapas indicadas na Figura 4.1.

Figura 4.1 – Etapas do modelo proposto
Fonte: Próprio autor

Na primeira etapa, a partir de uma lista de estabelecimentos comerciais e suas respectivas demandas, foram montados os agrupamentos (*clusters*), com base no tamanho do veículo considerado para o sistema de distribuição de mercadorias. A Figura 4.2 ilustra este procedimento.

Figura 4.2 – Exemplo da primeira etapa: agrupamento dos clientes
Fonte: Próprio autor

Uma vez agrupados os clientes, foi obtida a distância total percorrida em cada *cluster* a partir de uma roteirização dos seus pontos, como ilustra a Figura 4.3.

Figura 4.3 – Exemplo da segunda etapa: roteirização de cada grupo de clientes
Fonte: Próprio autor

Também foi calculada a distância entre cada local candidato a centro urbano de distribuição e os agrupamentos. Para isso e para cada *cluster* foram obtidas as distâncias entre todos clientes e cada local candidato e adotou-se o menor valor entre eles, como indica a Figura 4.4.

Figura 4.4 – Exemplo da quarta etapa: cálculo da distância entre cada grupo de clientes e local candidato a CDU
Fonte: Próprio autor

Logo a distância total de roteiro considerada foi:

$$2 * \text{distância entre cluster e CD candidato} + \text{distância para percorrer o cluster}$$

As distâncias dos roteiros foram utilizadas para a montagem do modelo de programação linear inteira buscando a minimização do custo total de implantar os centros e de distribuir todas as mercadorias. O resultado deste modelo pode ser exemplificado pela Figura 4.5.

Figura 4.5 – Exemplo do resultado final

Fonte: Próprio autor

Na implantação do modelo, foram utilizados dois *softwares*: o TransCAD e o OpenSolver. Nos itens seguintes serão descritas as ferramentas utilizadas desses programas.

4.1 TransCAD

TransCAD é um Sistema de Informações Geográficas (SIG) produzido pela Caliper que também possui ferramentas para modelagem em transportes, como projeção de demanda por viagens, rotas de ônibus, caminho mínimo, roteirização e localização de instalações.

Nesta dissertação, para a localização de centros urbanos de distribuição foram utilizadas duas de suas ferramentas: agrupamento (*Clustering*) e roteirização (*Vehicle routing problem*).

4.1.1 *Clustering*

O problema tratado pela ferramenta de *Clustering* do TransCAD é o de agrupamento capacitado (*capacitated clustering problem – CCP*), que é um caso especial do problema de localização de instalações. O algoritmo de resolução é baseado no trabalho de Koskosidis e Powell (1992), conforme indicado pela Caliper.⁵

⁵ Comunicação entre a Caliper e o autor em 29 de abril de 2014: “The initial heuristics for these algorithms were based on the following work: [...] Clustering: Y.A. Koskosidis and W.B Powell, Clustering Algorithms for Consolidation of Customer Orders into Vehicle Shipments.”

Segundo Koskosidis e Powell (1992), o problema de agrupamento capacitado é definido como particionar um conjunto de n elementos em K veículos mutualmente exclusivos, restringindo o tamanho de cada grupo. A partição é feita de maneira a maximizar a homogeneidade entre os pontos de cada grupo e também, implicitamente, a heterogeneidade entre os grupos; um veículo é alocado para atender a demanda dos pontos de cada grupo.

Este problema é definido como:

$$\min F(y, g) \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} y_{ij} \quad (1a)$$

$$\text{sujeito a} \quad \sum_{i \in I} q_i y_{ij} \leq V, \forall j \in J, \quad (1b)$$

$$\sum_{j \in J} y_{ij} = 1, \forall i \in I \quad (1c)$$

$$y_{ij} \leq g_j, \forall i \in I, j \in J, \quad (1d)$$

$$\sum_{j \in J} g_j = K \quad (1e)$$

$$(y_{ij}, g_j) = (0, 1), \forall i \in I, j \in J \quad (1f)$$

Onde:

I : conjunto de clientes $i = 1, \dots, I$

J : conjunto de candidatos a sementes $j = 1, \dots, J$

K : conjunto de veículos $k = 1, \dots, K$

c_{ij} : custo de transporte entre os clientes i e j

q_i : demanda do cliente i

V : capacidade do veículo que atende o *cluster*

$y_{ij} \begin{cases} 1, \text{ caso o cliente } i \text{ estiver contido no } \textit{cluster} \text{ de semente } j \\ 0, \text{ em caso contrário} \end{cases}$

$g_j \begin{cases} 1, \text{ caso o cliente } j \text{ seja semente de um } \textit{cluster} \\ 0, \text{ em caso contrário} \end{cases}$

Neste modelo, a função objetivo minimiza o custo total de alocar os clientes em agrupamentos. A restrição (1b) limita o número de clientes alocado a um *cluster*, que é equivalente ao tamanho de um veículo, dado que o mesmo não deve ter sua capacidade excedida. A restrição (1c) assegura que um cliente deve estar em apenas um *cluster* de semente j . Enquanto a restrição (1d) previne que um cliente seja alocado a um *cluster* de semente j quando este não foi selecionado como semente. Já a restrição (1e) assegura que o modelo tenha K *clusters*. E por fim, a restrição (1f) indica o espaço de solução.

Dada a complexidade do problema, um algoritmo exato de otimização não é possível de para problemas muito grandes e, por isso, o TransCAD adota uma heurística para sua resolução. Ela está dividida em 4 fases, como mostra a Figura 4.6.

Figura 4.6 – Fases da heurística adotada para resolução do CCP
Fonte: Koskosidis e Powell, 1992

Segundo Koskosidis e Powell (1992), a primeira fase consiste em selecionar o conjunto inicial de sementes K , o que no TransCAD é feito aleatoriamente (CALIPER, 2012). Na segunda fase os clientes, que não são sementes, são alocados à semente mais próxima, respeitado o limite de capacidade; para isso, é calculada uma função de arrependimento (do inglês, *regret function*) que é definida pela diferença de custo entre a semente mais próxima e a segunda semente mais próxima para cada cliente i .

Os clientes são ordenados decrescentemente por essa função de custos e, posteriormente, são alocados à semente mais próxima possível com base em sua capacidade. Caso a capacidade da semente mais próxima de um cliente estoure, ele é alocado à semente seguinte. Ao final do processo, todos os clientes devem estar alocados a uma semente.

Uma vez realizado esse procedimento inicia-se a terceira fase, onde as sementes são realocadas, uma vez que nem sempre todas as sementes inicialmente selecionadas estão no “centro” do agrupamento. A realocação é feita selecionando o cliente que minimiza o custo total de distribuição quando o mesmo é a semente do agrupamento. Caso uma nova semente seja encontrada, o algoritmo volta para a segunda fase e há iteração entre essas fases até que não exista mais redução no custo.

A quarta fase consiste em trocas de clientes entre os agrupamentos e, caso haja diminuição no custo de distribuição, o algoritmo retorna às fases anteriores. O processo é repetido até que não seja possível melhorar o custo ou até que o número máximo de iterações seja atingido.

Para que o desempenho do algoritmo possa ser avaliado, são calculados os limites inferiores do problema. Isso é feito através de relaxação da restrição (1c), conforme mostram as equações seguintes:

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} y_{ij} + \sum_{i \in I} \pi_i (1 - \sum_{j \in J} y_{ij}) \quad (1g)$$

$$= \min \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (c_{ij} - \pi_i) y_{ij} + \sum_{i \in I} \pi_i \quad (1h)$$

sendo ainda sujeito às demais restrições; π corresponde ao multiplicador lagrangeano.

4.1.1.1 Dados de entrada

Os dados necessários para o uso da ferramenta de *clustering* são:

- Base geográfica onde estão localizados os pontos a serem agrupados;
- Número de grupos (*clusters*);
- Capacidade dos grupos (*clusters*), ou seja, o valor máximo do tamanho de um grupo. Esse é um dado opcional, mas ao impor um limite, o TransCAD adiciona elementos a um agrupamento até este valor de capacidade. Consequentemente, há casos onde os grupos podem se sobrepor, como por exemplo quando um ponto possuir uma demanda superior à disponível para um grupo e for alocado a um outro grupo, como mostra a Figura 4.7.

Figura 4.7 – Exemplo de sobreposição de *clusters* para CCP
Fonte: Próprio autor

- Número máximo de iterações: o procedimento é realizado até que não seja encontrada uma solução melhor ou até o número máximo de iterações indicado;
- Matriz de custo: a matriz de custo pode ser fornecida ou implicitamente calculada como de distâncias ou de tempo de viagem;
- Balanceamento dos grupos: é possível definir o balanceamento do agrupamento definindo o percentual máximo de diferença entre grupos, baseado em 3 critérios: número de elementos, tamanho dos grupos e custo médio. O valor de tolerância deste campo varia entre 0 e 100, mas também é permitido que os grupos não sejam balanceados.

A caixa de diálogo para entrada dessas informações no TransCAD pode ser vista na Figura 4.8.

Figura 4.8 – Caixa de diálogo para preenchimento dos dados de entrada para a ferramenta de *Clustering* do TransCAD
Fonte: Próprio autor

4.1.1.2 Dados de saída

Ao rodar o procedimento de *Clustering*, os resultados fornecidos pelo *software* TransCAD são:

- *Assignment table*: tabela listando os pontos de demanda, o agrupamento que pertencem (indicado pela semente do *cluster*) e o custo entre estes pontos e a semente de seus respectivos *clusters*, como ilustra a Figura 4.9.

ID1	Seed	TravelCost
5	69188	1.37
6	69188	1.34
7	69188	1.34
9	9335	1.33
13	9335	1.31
16	9335	1.25
24	9335	1.27
26	9335	1.27
31	9335	1.30
37	9335	1.35
41	9335	1.38
43	9335	1.38
85	69188	1.20
94	69188	1.20
96	9335	1.19
97	9335	1.19

Figura 4.9 – Tabela de resultados da ferramenta de *Clustering* do TransCAD (*Assignment table*)

Fonte: Próprio autor

- *Cluster table*: tabela listando os *clusters* obtidos (ID e sua respectiva semente), custos totais, número de elementos e o tamanho total (quando a capacidade é especificada), como exemplifica a Figura 4.10.

Cluster	Seed	TravelCost	[#Features]	Size
1	5428	450.60	198	4998.18
2	9054	157.30	247	4998.58
3	9335	329.90	211	4999.76
4	10242	150.62	85	4997.81
5	10367	752.57	280	4998.79
6	10426	590.03	273	4999.17
7	10926	7.60	9	4999.88
8	13111	314.22	194	4999.02
9	13593	321.48	374	4997.63
10	13606	183.87	219	4998.46
11	13637	84.21	165	4998.94
12	13783	1.96	8	4997.58
13	13811	166.56	324	4999.22
14	14649	323.99	296	4997.60
15	16911	262.13	116	4998.83
16	18971	221.78	217	4998.37
17	19191	45.22	59	4997.34
18	20980	271.55	354	4998.11
19	21283	136.91	135	4996.96
20	22272	225.30	271	4997.36
21	22935	242.38	371	4996.75

Figura 4.10 – Tabela de resultados da ferramenta de *Clustering* do TransCAD (*Cluster table*)

Fonte: Próprio autor

- Sumário do procedimento: nos arquivos de *log* do programa, um sumário é fornecido indicando os dados de entrada e os seguintes resultados (Figura 4.11):
 - Localização das tabelas descritas acima;
 - Nome da seleção das sementes: ao finalizar o procedimento o TransCAD produz um mapa indicando os *clusters* resultantes e a seleção de todas as sementes consideradas;
 - Número dos pontos de demanda considerados;
 - Custo total: somatória dos custos de cada agrupamento;
 - Tamanho do maior *cluster*;
 - Tamanho do menor *cluster*;
 - Tamanho médios dos *clusters*;
 - Desvio do tamanho dos *clusters*: este desvio é dado pela razão entre o tamanho do menor *cluster* e o tamanho médio dos *clusters* e pela razão entre o tamanho do maior *cluster* e o tamanho médio dos *clusters*;
 - Número de iterações realizadas.

Procedure Clustering on May 09, 2014 (08:03 PM)	
Inputs	
Cost Matrix	D:\Public\Transfer\00 Mestrado\logit\modelo\cenarios\MatrixCustoEstabKM-StraightLines.mtx (Kilometers)
View	ind com serv
Number of Clusters	315
Capacity	5000.000
Size Field	DemTotal
Maximum Iterations	1
Balancing	Size
Tolerance	15.00%
Outputs	
Assignment Table	D:\Public\Transfer\00 Mestrado\logit\modelo\cenarios\cenario30-adesao60\CLUST_assign.bin
Cluster Table	D:\Public\Transfer\00 Mestrado\logit\modelo\cenarios\cenario30-adesao60\CLUST_cluster.bin
Chosen Seeds Set	Seeds
Features clustered	37606
Total Cost	101441.75
Largest Size	4999.9
Smallest Size	4957.8
Average Size	4985.34
Deviation Range	-0.55% to 0.29%
# Iterations Performed	1
Chosen seeds are in set Seeds. Execution Time was 00:00:32.682.	

Figura 4.11 – Sumário dos resultados da ferramenta de *Clustering* do TransCAD

Fonte: Próprio autor

Apesar do TransCAD calcular os limites inferiores do problema, isso não é disponibilizado para o usuário do *software*, assim como a diferença entre o custo encontrado e o limite inferior.

Também não são indicados nos resultados os valores de custo a cada iteração e, para isso, é necessário executar o procedimento isoladamente para cada iteração, se a variação do custo ao longo do processo é desejada.

4.1.2 *Vehicle routing problem*

Segundo a Caliper,⁶ a roteirização no TransCAD é feita com um algoritmo derivado do trabalho de Solomon (1987), mas não foram encontradas referências que melhor descrevessem o método e que fossem aplicáveis à versão e às opções disponíveis da ferramenta utilizada⁷.

No trabalho de Solomon (1987) foram propostas seis heurísticas parametrizáveis generalizadas para problemas de roteirização capacitada de veículos com janelas de tempo: de economia, de vizinho mais próximo, de varredura e três variantes de inserção. Após testes em seis conjuntos de problemas, o estudo concluiu que a heurística de inserção (variante I) chegou ou se aproximou às melhores soluções na maior parte dos casos; os algoritmos baseados em economia foram descartados depois dos primeiros dois testes por em geral resultarem em um maior número de veículos.

Pelizaro (2000) reproduziu três dos seis conjuntos de testes no TransCAD, enquanto analisava a performance de procedimentos de roteirização em *softwares* comerciais. A Tabela 4.1 e a Tabela 4.2 apresentam a comparação dos resultados; da análise das distâncias obtidas conclui-se que o TransCAD tem comportamento semelhante às heurísticas de economia ou de inserção (variante I), mas o número de rotas sugere que o algoritmo proprietário seja mais próximo da última.

Tabela 4.1 – Comparação de resultados utilizando o TransCAD e heurísticas de Solomon: distância média

Problema	TransCAD	Heurísticas de Solomon (1987)						
		Economias	Economias com janela de tempo	Inserção-I	Inserção-II	Inserção-III	Vizinho mais próximo	Varredura
R1	1.447,5	1.498,9	1.517,2	1.436,7	1.638,7	1.651,7	1.600,1	1.499,7
C1	999,0	976,2	987,4	951,9	1.049,8	1.103,3	1.171,2	940,8
RC1	1.647,3			1.596,5	1.874,4	1.849,7	1.800,0	1.804,5

Fonte: Pelizaro (2000) e Solomon (1987)

⁶ Comunicação entre a Caliper e o autor em 29 de abril de 2014: “The initial heuristics for these algorithms were based on the following work: [...] Vehicle Routing: Marius M. Solomon, Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problem with Time Window Constraints.”

⁷ Carmo et al. (2003) menciona o uso da heurística de economia de Clarke e Wright para roteirização sem restrição de janela de tempo na versão 3.0 do TransCAD.

Tabela 4.2 – Comparação de resultados utilizando o TransCAD e heurísticas de Solomon: número médio de rotas

Problema	TransCAD	Heurísticas de Solomon (1987)						
		Economias	Economias com janela de tempo	Inserção-I	Inserção-II	Inserção-III	Vizinho mais próximo	Varredura
R1	14,1	16,6	15,1	13,6	14,5	14,1	14,5	14,6
C1	10,3	11,7	10,7	10,0	10,1	10,0	10,2	10,0
RC1	13,9			13,5	14,2	14,0	14,2	14,9

Fonte: Pelizaro (2000) e Solomon (1987)

4.1.2.1 Dados de entrada

Para utilizar a ferramenta de roteirização do TransCAD, são necessários dados do sistema de distribuição referentes a operação, depósitos, paradas, matriz de custos e frota utilizada, conforme mostram as tabelas e figuras a seguir.

A Tabela 4.3 e Figura 4.12 mostram as informações do sistema de distribuição que devem ser incluídas no modelo.

Tabela 4.3 – Dados de entrada de operação da ferramenta de *Vehicle Routing Problem* do TransCAD

Campo	Subcampos
Tipo de operação	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo de operação do sistema de distribuição, sendo que as opções são: <ul style="list-style-type: none"> ○ Entrega; ○ Coleta; ○ Entrega e coleta (em qualquer ordem); ○ Entrega e coleta (dando prioridade para realização de entregas e posteriormente as coletas).
Opções das rotas	<ul style="list-style-type: none"> • Número máximo de janelas de tempo; • Duração máxima das rotas; • Balanceamento das rotas: pode ser feito por tempo, distância ou número de paradas; • Também é permitido escolher se o veículo não deve retornar ao depósito no final de sua rota.

Fonte: Caliper (2012)

Figura 4.12 – Caixa de diálogo para preenchimento dos dados de entrada de operação para a ferramenta de *Vehicle Routing Problem* do TransCAD

Fonte: Próprio autor

Caso o modelo possibilite entrega e coleta no roteiro, é possível incluir parâmetros para espaço de manuseio dentro do veículo e de carregamento máximo.

Para indicar os dados referentes aos depósitos e paradas, deve-se inserir as informações no próprio banco de dados da base geográfica e indicar os respectivos campos como entrada, conforme mostram Tabela 4.4, Tabela 4.5, Figura 4.13 e Figura 4.14.

Tabela 4.4 – Dados necessários para a base georreferenciada de depósitos candidatos para utilização ferramenta de *Vehicle Routing Problem* do TransCAD

Campo	Descrição
ID	campo com a identificação do ponto
Node ID	nó da rede mais próximo ao depósito (caso a matriz de custo seja calculada com base em uma rede)
Name	campo contendo a denominação do ponto
Open time	horário inicial da operação dos veículos (saída do depósito)
Close time	horário limite que os veículos devem retornar ao depósito

Fonte: Caliper (2012)

Figura 4.13 – Caixa de diálogo para preenchimento dos dados de entrada de depósito para a ferramenta de *Vehicle Routing Problem* do TransCAD

Fonte: Próprio autor

Tabela 4.5 – Dados necessários para a base georreferenciada de paradas para utilização ferramenta de *Vehicle Routing Problem* do TransCAD

Campo	Descrição
ID	campo com a identificação do ponto
Node ID	nó da rede mais próximo ao depósito (caso a matriz de custo seja calculada com base em uma rede)
Name	campo contendo a denominação do ponto
Open time	horário inicial em que veículos podem chegar ao estabelecimento
Close time	horário final em que veículos podem chegar ao estabelecimento
Fixed time	Tempo mínimo de serviço no estabelecimento (em minutos)
Unit time	Tempo de serviço por unidade de demanda (em minutos)
Assigned depot	ID de um depósito específico, caso o mesmo atenda a demanda do estabelecimento. Se o campo for deixado em branco, o TransCAD escolherá o depósito
Vehicle allowed	Tipo de veículo permitido atender o estabelecimento
Delivery demand	Demanda para ser entregue no estabelecimento (não é necessário preencher caso seja selecionada apenas a operação de coleta)
Pickup demand	Demanda para ser coletada no estabelecimento (não é necessário preencher caso seja selecionada apenas a operação de entrega)

Fonte: Caliper (2012)

Figura 4.14 – Caixa de diálogo para preenchimento dos dados de entrada de paradas para a ferramenta de *Vehicle Routing Problem* do TransCAD
Fonte: Próprio autor

Também, é necessário criar uma matriz de custo que indique a distância e o tempo de viagem entre os clientes e os locais candidatos a CDs (Figura 4.15). Essa matriz pode ser calculada pelo próprio *software* em rede, caso a mesma esteja disponível, ou em linhas retas, ou seja, a menor distância entre dois pontos considerando a curvatura do planeta.

É importante ressaltar que, nesse momento, os roteiros são calculados apenas com os consumidores; assim, os locais candidatos especificados no TransCAD são, na verdade, qualquer um dos estabelecimentos do *cluster* analisado.

Figura 4.15 – Caixa de diálogo para preenchimento dos dados de entrada da matriz de custo para a ferramenta de *Vehicle Routing Problem* do TransCAD

Fonte: Próprio autor

O modelo utilizado pelo TransCAD permite a utilização de uma frota heterogênea. Dessa maneira, deve ser criada uma tabela com as informações seguintes para inserção no modelo, como mostra a Figura 4.16.

- *Depot ID*: campo de identificação do local candidato a depósito;
- *Type*: tipo do veículo a ser utilizado para o sistema de distribuição;
- *Cost*: custo de aluguel/compra/operação do veículo;
- *Number of vehicles*: quantidade disponível deste tipo de veículo;
- *Capacity*: capacidade do veículo (deve ser dado na mesma unidade de medida da demanda dos estabelecimentos).

Figura 4.16 – Caixa de diálogo para preenchimento dos dados de entrada da frota de veículos para a ferramenta de *Vehicle Routing Problem* do TransCAD

Fonte: Próprio autor

4.1.2.2 Dados de saída

Uma vez realizado o procedimento de roteirização, os resultados fornecidos pelo TransCAD são:

- *Route*: código de identificação da rota;
- *Vehicle type*: tipo de veículo utilizado para a rota;
- *Stop*: código de identificação da parada (campo *ID* da base georreferenciada das paradas);
- *Name*: denominação da parada (campo *Name* da base georreferenciada das paradas);
- *Node*: (campo *NodeID* da base georreferenciada das paradas);
- *Sequence*: sequência da rota, começando por 0 (depósito);
- *Open time*: horário inicial em que veículos podem chegar ao estabelecimento;
- *Due time*: horário final em que veículos podem chegar ao estabelecimento;
- *Arrival*: horário de chegada no estabelecimento visitado na rota;
- *Departure*: horário de saída do estabelecimento visitado na rota;
- *Wait*: tempo de espera no estabelecimento visitado na rota;

- *Service time*: tempo de serviço no estabelecimento visitado na rota, dado por: $(\text{tempo fixo}) + (\text{demanda}) * (\text{tempo por unidade de demanda})$;
- *Travel time*: tempo de viagem entre o ponto anterior até este estabelecimento;
- *Distance*: distância percorrida entre o ponto anterior até este estabelecimento;
- *Total distance*: distância acumulada na rota até este ponto;
- *Delivery*: quantidade entregue no estabelecimento;
- *Pickup*: quantidade coletada no estabelecimento;
- *Total load*: carregamento total do veículo até este ponto;
- *Stop type*: tipo de parada (depósito ou parada).

4.2 OpenSolver - Modelo de localização dos centros urbanos de distribuição

Os resultados obtidos nos procedimentos no TransCAD foram utilizados na montagem do modelo de localização dos centros urbanos de distribuição resolvido com o OpenSolver.

O OpenSolver é um módulo adicional para o Excel que consiste numa interface entre esse e *solvers* (*softwares* numéricos especializados) de problemas de programação linear e inteira da iniciativa de *software* aberto para pesquisa operacional *Computational Infrastructure for Operations Research* (COIN-OR) (MASON; DUNNING, 2010).⁸

Com esse módulo, modelos de programação inteira montados da planilha são resolvidos com o *solver* COIN-OR Branch-and-Cut (CBC), que por sua vez se baseia em dois outros projetos da COIN-OR: o solver de simplex CLP (para as versões com integralidade relaxada) e geradores de cortes da biblioteca CGL (para restrição das soluções relaxadas) (COIN-OR, 2014).

As variáveis de decisão e restrições são lidas a partir da própria planilha, sendo que o usuário indica as células que contém essas informações, como mostra a Figura 4.17. Além disso, o programa não contém limite de variáveis ou restrições.

⁸ A COIN-OR busca trazer as vantagens do *software* aberto, como a possibilidade dele ser lido, modificado, melhorado e corrigido por toda a comunidade científica, para a implementação de algoritmos e modelos de pesquisa operacional.

OpenSolver - Model

What is AutoModel?

AutoModel is a feature of OpenSolver that tries to automatically determine the problem you are trying to optimise by the observing the structure of the spreadsheet. It will turn its best guess into a Solver model, which you can then edit in this window and solve with OpenSolver or Solver. Note that you don't have to use this feature: the model can still be built manually. Please note that AutoModel will replace the model in this window, but won't save it to the sheet until you click Save Model.

Objective cell: ☐ maximise ☒ minimise ☐ target value:

Variable cells:

Constraints:

- \$L\$23:\$BMM\$32 bin
- \$L\$34:\$BMM\$34 = \$L\$36:\$BMM\$36
- \$L\$23:\$BMM\$23 <= \$BMN\$23
- \$L\$24:\$BMM\$24 <= \$BMN\$24
- \$L\$25:\$BMM\$25 <= \$BMN\$25
- \$L\$26:\$BMM\$26 <= \$BMN\$26
- \$L\$27:\$BMM\$27 <= \$BMN\$27
- \$L\$28:\$BMM\$28 <= \$BMN\$28
- \$L\$29:\$BMM\$29 <= \$BMN\$29
- \$L\$30:\$BMM\$30 <= \$BMN\$30
- \$L\$31:\$BMM\$31 <= \$BMN\$31
- \$L\$32:\$BMM\$32 <= \$BMN\$32
- \$BMN\$23:\$BMN\$32 bin**

bin

☒ Make unconstrained variable cells non-negative

Modify a constraint: select, make changes, then click "Update constraint".
Add a constraint: select "Add new constraint", enter the new constraint's details, then click "Add Constraint"

Shadow Prices: ☐ List constraints and shadow prices in a table with top-left cell:

☒ Show model after saving

Figura 4.17 – Caixa de diálogo para preenchimento dos dados de entrada do OpenSolver
Fonte: Próprio autor

O modelo adotado nesta dissertação segue as seguintes equações.

$$\min \alpha \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} d_{ij} x_{ij} + \beta \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ij} + \sum_{j \in J} f_j y_j, \quad (2a)$$

$$\text{sujeito a } \sum_{j \in J} x_{ij} = 1, \forall i \in I, \quad (2b)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ij} \leq K_j, \forall j \in J, \quad (2c)$$

$$x_{ij} \leq y_j, \forall i \in I, j \in J, \quad (2d)$$

$$x_{ij} = 0, 1, \forall i \in I, \forall j \in J \quad (2e)$$

$$y_j = 0, 1, j \in J \quad (2f)$$

Onde:

α : custo por unidade de distância percorrida;

d_{ij} : distância de percorrer o roteiro do *cluster* i até o local candidato j ;

β : custo de aquisição e manutenção do veículo e salário da equipe;

f_j : custo fixo de implantação do local candidato j ;

K_j : capacidade de veículos do local candidato j ;

y_j — $\begin{cases} 1, & \text{caso seja implantado o local candidato } j; \\ 0, & \text{em caso contrário.} \end{cases}$

x_{ij} — $\begin{cases} 1, & \text{caso alocado veículo para atender o } cluster\ i, \text{ partindo do local candidato } j; \\ 0, & \text{em caso contrário.} \end{cases}$

Este modelo tem como função objetivo (2a) minimizar o custo total de implantar os centros urbanos e de distribuir as mercadorias. A restrição (2b) garante o atendimento de todos *clusters* i , enquanto a restrição (2c) limita que o total de veículos que partem do local candidato j seja menor ou igual à sua capacidade K_j .

A restrição (2d) garante que um veículo é alocado para atendimento de um *cluster* i , partindo de um local candidato j , somente quando este local é escolhido para operação ($y_j = 1$). Por fim, as restrições (2e) e (2f) limitam o espaço de solução do modelo, caracterizando-o como um de programação linear inteira.

As distâncias dos roteiros possíveis incluindo os candidatos a CD, para cada *cluster*, foram calculadas antes da entrada no OpenSolver. Elas foram pré-computadas no Excel com os dados das fases anteriores do modelo.

5 ESTUDO DE CASO

O método desenvolvido foi aplicado sobre dados do município de Curitiba, procurando avaliar o modelo proposto de localização-roteirização baseado em *clustering* e sua implementação no TransCAD e OpenSolver. Este capítulo apresenta o estudo de caso e seus resultados.

5.1 Curitiba

Curitiba é um dos municípios mais importantes do Brasil. Em 2010, era o quarto maior contribuinte no produto interno bruto (PIB) do país (IBGE, 2010) e possuía a oitava maior população (IBGE, 2013). É a capital do estado do Paraná e o polo de um conjunto de 29 municípios que fazem parte da Região Metropolitana de Curitiba (RMC). Neste contexto, apresenta papel relevante na articulação de dinâmicas com sua Região Metropolitana (Figura 5.1), mantendo estreitas relações econômicas com municípios vizinhos.

Figura 5.1 – Região Metropolitana de Curitiba
Fonte: Próprio autor

Na escala estadual, conecta o interior ao litoral paranaense, onde está localizado o Porto de Paranaguá. Já na escala nacional, o município é atravessado pela BR-116, que conecta a Região Sul ao Sudeste do país, o que o torna complexo nó de transportes regionais, como mostra a Figura 5.2.

Figura 5.2 – Malha rodoviária de Curitiba
Fonte: DNIT (2013)

A cidade de Curitiba ocupa praticamente toda a área total do município, demonstrando que só é possível expansão urbana para os municípios vizinhos, como por exemplo São José dos Pinhais, Araucária e Pinhais.

Com uma população totalmente urbana e que tem aumentado de maneira significativa, como mostra a Tabela 5.1 e a Tabela 5.2, o transporte por mercadorias para atender seus habitantes deve acompanhar essa tendência. Como consequência disso, há um aumento de veículos trafegando na cidade, tanto de automóveis como de caminhões, gerando também maior emissão de gases poluentes e outros impactos ambientais.

Tabela 5.1 – População do município de Curitiba, Região Metropolitana de Curitiba e do Brasil e respectivo crescimento entre 1970 e 2010

Local	População (em mil habitantes)					Crescimento populacional (% ao ano)				
	1970	1980	1991	2000	2010	1970-1980	1980-1991	1991-2000	2000-2010	1970-2010
Curitiba	609	1.025	1.315	1.587	1.752	5,34%	2,29%	2,11%	0,99%	2,68%
RMC ¹	936	1.564	2.141	2.813	3.224	5,27%	2,90%	3,08%	1,37%	3,14%
Brasil	93.135	119.011	146.825	169.799	190.756	2,48%	1,93%	1,63%	1,17%	1,81%

(1) Considera os 29 municípios que atualmente pertencem na Região Metropolitana de Curitiba (RMC).
Fonte: IBGE (2013)

Tabela 5.2 – População urbana e rural de Curitiba, Região Metropolitana de Curitiba e do Brasil entre 1970 e 2010

Local	População (em mil habitantes)									
	1970		1980		1991		2000		2010	
	Urbano	Rural	Urbano	Rural	Urbano	Rural	Urbano	Rural	Urbano	Rural
Curitiba	585	24	1.025	-	1.315	-	1.587	-	1.752	-
RMC ¹	686	250	1.363	201	1.930	211	2.553	260	2.956	267
Brasil	52.097	41.038	80.437	38.574	110.991	35.834	137.954	31.845	160.926	29.830

(1) Considera os 29 municípios que atualmente pertencem na Região Metropolitana de Curitiba (RMC).

Fonte: IBGE (2013)

Por conta desses problemas, a cidade foi escolhida para a aplicação do método de localização de centros urbanos de distribuição desenvolvido nesta dissertação.

5.2 Dados adotados para o modelo

Para a montagem do modelo, foram identificados e/ou elaborados os dados listados abaixo e descritos nos itens a seguir.

- Demanda diária para os estabelecimentos que utilizarão o centro urbano de distribuição para receber suas mercadorias;
- Localização dos centros urbanos de distribuição candidatos;
- Custos diários para implantação desses CDs urbanos e para realizar a distribuição do sistema proposto;
- Rede viária de Curitiba para obter as distâncias entre os pontos.

5.2.1 Estimativa da demanda diária dos estabelecimentos

Para a estimativa da demanda, foram levantadas as quantidades de estabelecimentos por bairro e de empregos totais do município de Curitiba junto à Relação Anual de Informações Sociais - RAIS (2010) e Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba (IPPUC, 2014a).

Em ambas as fontes, os estabelecimentos estavam identificados segundo a Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE), que é a estrutura oficialmente utilizada pelo Sistema Estatístico Nacional, na produção de estatísticas por tipo de atividade econômica, e pela Administração Pública, na identificação da atividade econômica em cadastros e registros de pessoa jurídica (IBGE, 2007).

Cada atividade possui um código de 7 dígitos, também denominada de Subclasse, sendo esse dividido em 4 níveis: os primeiros 2 dígitos representam a Divisão, os 3 primeiros dígitos

representam o seu Grupo e os 5 primeiros dígitos representam a sua Classe; um nível maior de agregação compõe a Seção, que é o agrupamento de algumas divisões, conforme as características de suas atividades. A Tabela 5.3 exemplifica a estrutura descrita do código CNAE para a atividade de cultivo de arroz.

Tabela 5.3 – Estrutura do código CNAE

Nível de detalhamento	Código do nível de detalhamento	Descrição
Seção:	A	Agricultura, pecuária, produção florestal, pesca e aquicultura
Divisão:	01	Agricultura, pecuária e serviços relacionados
Grupo:	011	Produção de lavouras temporárias
Classe:	0111-3	Cultivo de cereais
Subclasse	0111-3/01	Cultivo de arroz

Fonte: IBGE (2007)

No entanto as informações identificadas na RAIS (2010) estavam agrupadas por classe, enquanto no IPPUC estavam classificadas conforme sua própria subclasse. Por isso, primeiro foi feita a caracterização do município de Curitiba da maneira mais agregada possível, sendo depois utilizadas no modelo informações na forma mais desagregada (classe para quantificação de empregos e subclasse para classificação de estabelecimentos).

5.2.1.1 Caracterização do município de Curitiba

De acordo com a RAIS (2010) e o IPPUC (2014a), há pouco menos de 235 mil estabelecimentos em Curitiba, gerando cerca de 848 mil empregos, como mostra a Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Estabelecimentos e empregos detalhados por seção em Curitiba em 2010

Seção	Descrição	Estabelecimentos	Empregos
A	Agricultura, pecuária, produção florestal, pesca e aquicultura	216	1.410
B	Indústrias extrativas	47	213
C	Indústrias de transformação	10.100	92.545
D	Eletricidade e gás	110	9.137
E	Água, esgoto, atividades de gestão de resíduos e descontaminação	235	10.330
F	Construção	7.840	43.306
G	Comércio; reparação de veículos automotores e motocicletas	66.203	153.511
H	Transporte, armazenagem e correio	6.482	36.690
I	Alojamento e alimentação	12.092	33.512
J	Informação e comunicação	5.721	27.598
K	Atividades financeiras, de seguros e serviços relacionados	4.406	25.204

Seção	Descrição	Estabelecimentos	Empregos
L	Atividades imobiliárias	1.905	3.433
M	Atividades profissionais, científicas e técnicas	12.090	23.506
N	Atividades administrativas e serviços complementares	10.670	93.206
O	Administração pública, defesa e segurança social	5	179.461
P	Educação	2.984	38.618
Q	Saúde humana e serviços sociais	4.751	43.010
R	Artes, cultura, esporte e recreação	1.679	5.765
S	Outras atividades de serviços	7.117	28.256
T	Serviços domésticos	11	120
U	Organismos internacionais e outras instituições extraterritoriais	0	19
	Sem identificação	80.124	-
	Total	234.788	848.850

Fonte: IPPUC (2014a) e RAIS (2010)

É importante indicar que cerca de 1/3 dos estabelecimentos listados pelo IPPUC (2014a) não listavam a sua natureza através do código CNAE e, portanto, os resultados apresentados podem apresentar alguma distorção.

Entre os estabelecimentos descritos acima, pode-se destacar as indústrias de transformação (C) e comércio e a reparação de veículos automotores e motocicletas (G), que geram maior movimentação de mercadorias devido à essência de suas atividades e alto número de empresas neste ramo, quando comparado com as outras atividades mostradas na Tabela 5.4. As indústrias de transformação representam cerca de 4% deste universo, gerando quase 11% dos empregos; o comércio e a reparação de veículos automotores e motocicletas abrangem 28% dessas atividades com pouco mais de 18% dos empregos.

Além disso, também estão relacionadas com a distribuição de mercadorias as empresas na seção de transporte, armazenagem e correio (H), que representam cerca de 3% e 4% das empresas e dos empregos de Curitiba, respectivamente.

Mais informações sobre as empresas nestas três seções indicam que cerca de 48% das indústrias de transformação são representadas por confecção de artigos do vestuário e acessórios (14), fabricação de produtos de metal, exceto máquinas e equipamentos (25) e manutenção, reparação e instalação de máquinas e equipamentos (33); o número de empresas é bem distribuído nas três divisões, como pode ser visto na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Estabelecimentos e empregos na seção C – Indústrias de transformação

Divisão	Descrição	Estabelecimentos	Empregos
10	Fabricação de produtos alimentícios	479	12.321
11	Fabricação de bebidas	25	2.209
12	Fabricação de produtos do fumo	1	483
13	Fabricação de produtos têxteis	228	1.349
14	Confecção de artigos do vestuário e acessórios	1.843	2.381
15	Preparação de couros e fabricação de artefatos de couro, artigos para viagem e calçados	191	1.088
16	Fabricação de produtos de madeira	282	2.297
17	Fabricação de celulose, papel e produtos de papel	500	3.613
18	Impressão e reprodução de gravações	1.185	2.597
19	Fabricação de coque, de produtos derivados do petróleo e de biocombustíveis	13	81
20	Fabricação de produtos químicos	139	2.910
21	Fabricação de produtos farmoquímicos e farmacêuticos	14	323
22	Fabricação de produtos de borracha e de material plástico	242	4.195
23	Fabricação de produtos de minerais não-metálicos	224	3.130
24	Metalurgia	76	1.749
25	Fabricação de produtos de metal, exceto máquinas e equipamentos	1.299	6.302
26	Fabricação de equipamentos de informática, produtos eletrônicos e ópticos	240	7.863
27	Fabricação de máquinas, aparelhos e materiais elétricos	94	9.404
28	Fabricação de máquinas e equipamentos	358	8.138
29	Fabricação de veículos automotores, reboques e carrocerias	129	12.213
30	Fabricação de outros equipamentos de transporte, exceto veículos automotores	22	78
31	Fabricação de móveis	334	2.113
32	Fabricação de produtos diversos	475	2.313
33	Manutenção, reparação e instalação de máquinas e equipamentos	1.707	3.395
Total		10.100	92.545

Fonte: IPPUC (2014a) e RAIS (2010)

No caso das empresas pertencentes à seção de comércio e de reparação de veículos automotores e motocicletas, há uma grande concentração de estabelecimentos varejistas, que compreendem quase 75% desta seção. O comércio por atacado (exceto veículos automotores e motocicletas) e o comércio e a reparação de veículos automotores e motocicletas representam aproximadamente 15% e 10%, respectivamente, como pode ser visto na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Estabelecimentos e empregos na seção G – Comércio, reparação de veículos automotores e motocicletas

Divisão	Descrição	Estabelecimentos	Empregos
45	Comércio e reparação de veículos automotores e motocicletas	7.486	20.846
46	Comércio por atacado, exceto veículos automotores e motocicletas	9.871	22.673
47	Comércio varejista	48.846	109.992
Total		66.203	153.511

Fonte: IPPUC (2014a) e RAIS (2010)

Quanto às empresas relacionadas com as atividades de transporte, armazenagem e correio, cerca de 60% desses estabelecimentos atuam no transporte terrestre e mais de 25% atuam no armazenamento e atividades auxiliares dos transportes. Com uma menor representatividade, pouco menos 15% das empresas trabalham com correio e outras atividades de entrega; as empresas que fazem transporte aquaviário e aéreo em Curitiba não somam nem 1% nesta seção, como mostra a Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Estabelecimentos e empregos na seção H – Transporte, armazenagem e correio

Divisão	Descrição	Estabelecimentos	Empregos
49	Transporte terrestre	3.769	27.168
50	Transporte aquaviário	9	3
51	Transporte aéreo	18	305
52	Armazenamento e atividades auxiliares dos transportes	1.780	4.877
53	Correio e outras atividades de entrega	906	4.337
Total		6.482	36.690

Fonte: IPPUC (2014a) e RAIS (2010)

5.2.1.2 Quantificação da demanda diária para o modelo adotado

Para aplicação do modelo proposto, foram considerados os estabelecimentos passíveis de utilização de um centro urbano de distribuição, que se beneficiariam de uma maior consolidação para receber mercadorias: comércio atacadista e varejista (exceto aqueles referentes a grande equipamentos e máquinas; postos de combustíveis; e comércio ambulante), hotéis e outros tipos de alojamentos e restaurantes, outros serviços de alimentação e bebidas e outros serviços de comida preparada, sendo que todos esses tipos de estabelecimentos estão listados na Tabela 5.8 na Tabela 5.11, somando quase 65 mil empresas e 160 mil empregos.

Tabela 5.8 – Tipos de estabelecimentos considerados no estudo de caso - comércio atacadista

Grupo	Descrição	Estabelecimentos	Empregos
463	Comércio atacadista especializado em produtos alimentícios, bebidas e fumo	1.157	5.802
464	Comércio atacadista de produtos de consumo não-alimentar	1.115	5.939
465	Comércio atacadista de equipamentos e produtos de tecnologias de informação e comunicação	181	804
467	Comércio atacadista de madeira, ferragens, ferramentas, material elétrico e material de construção	511	1.312
468	Comércio atacadista especializado em outros produtos	593	3.812
469	Comércio atacadista não-especializado	152	1.388
Total		3.709	19.057

Fonte: IPPUC (2014a) e RAIS (2010)

Tabela 5.9 – Tipos de estabelecimentos considerados no estudo de caso - comércio varejista

Grupo/ Atividade	Descrição	Estabelecimentos	Empregos
4711301	Comércio varejista de mercadorias em geral, com predominância de produtos alimentícios - hipermercados	17	18.475
	Comércio varejista de mercadorias em geral, com predominância de produtos alimentícios - supermercados	195	
4711302	Comércio varejista de mercadorias em geral, com predominância de produtos alimentícios - minimercados, mercearias e armazéns	2.357	3.513
4712100	Lojas de departamentos ou magazines	25	1.748
4713001	Lojas de variedades, exceto lojas de departamentos ou magazines	55	
4713002			
472	Comércio varejista de produtos alimentícios, bebidas e fumo	6.587	10.528
474	Comércio varejista de material de construção	4.620	12.192
475	Comércio varejista de equipamentos de informática e comunicação; equipamentos e artigos de uso doméstico	11.206	15.536
	Comércio varejista de artigos culturais, recreativos e esportivos	4.373	5.924
476	Comércio varejista de produtos farmacêuticos, perfumaria e cosméticos e artigos médicos, ópticos e ortopédicos	3.563	9.868
477			

Grupo/ Atividade	Descrição	Estabelecimentos	Empregos
478	Comércio varejista de produtos novos não especificados anteriormente e de produtos usados	15.243	28.474
	Total	48.241	106.258

Fonte: IPPUC (2014a) e RAIS (2010)

Tabela 5.10 – Tipos de estabelecimentos considerados no estudo de caso - alojamento

Grupo	Descrição	Estabelecimentos	Empregos
551	Hotéis e similares	415	3.769
559	Outros tipos de alojamento não especificados anteriormente	304	323
	Total	719	4.092

Fonte: IPPUC (2014a) e RAIS (2010)

Tabela 5.11 – Tipos de estabelecimentos considerados no estudo de caso - alimentação

Grupo	Descrição	Estabelecimentos	Empregos
561	Restaurantes e outros serviços de alimentação e bebidas	10.649	24.383
562	Serviços de catering, bufê e outros serviços de comida preparada	724	5.037
	Total	11.373	29.420

Fonte: IPPUC (2014a) e RAIS (2010)

Como as tabelas levantadas junto ao IPPUC apenas listavam esses estabelecimentos por bairro, os locais foram distribuídos espacialmente para o modelo de maneira aleatória respeitando os limites dos bairros, como mostra a Figura 5.3.

Figura 5.3 – Localização dos estabelecimentos considerados no estudo de caso
Fonte: Próprio autor

Para estimar a demanda desses locais para captação do centro urbano de distribuição, foram adotados os fatores calculados por Henriot e Routhier (2010) a partir de pesquisas realizadas na França para montagem do modelo FRETURB.

Essas pesquisas foram feitas durante a década de 90, sendo que Henriot e Routhier (2010) consideraram que os resultados que possuem melhor qualidade foram os realizados em Bordeaux, onde foram entrevistados cerca de 1.500 estabelecimentos em diversos ramos de atividade. Desses locais, 541 eram pequenas empresas, sendo que estas são as mais propensas a utilizar um centro de distribuição por não terem demanda suficiente para ocupar totalmente um caminhão com suas mercadorias.

Dessas entrevistas, 459 foram consideradas como válidas para a obtenção dos fatores para estimativa de demanda que foram utilizados nesta dissertação, indicadas na Tabela 5.12.

Tabela 5.12 – Peso movimentado por funcionário (kg) por tipo de estabelecimento

Tipo de estabelecimento	Peso movimentado por funcionário (kg/semana)
Hipermercado	1.560

Tipo de estabelecimento	Peso movimentado por funcionário (kg/semana)
Loja de departamento especializado	466
Supermercado	580
Mini mercado	535
Vestuário, calçados e artigos de couro	152
Açougue	395
Alimentação	553
Padarias e confeitarias	554
Cafés, hotéis e restaurantes	64
Farmácia	101
Construção	161
Móveis	192
Livrarias e papelerias	479
Outros	115
Comércio ambulante	451

Fonte: Henriot e Routhier (2010)

Vale ressaltar que estes fatores foram adotados para estimar a demanda dos estabelecimentos de Curitiba, apesar de se reconhecer a diferença entre as duas cidades e a época de realização da pesquisa em Bordeaux, como indica a Tabela 5.13, sendo que isto foi realizado procurando obter uma estimativa da demanda para a aplicação e análise do modelo proposto para a localização de centros de distribuição.

Tabela 5.13 – Comparação das características das cidades de Bordeaux e Curitiba

Características	Detalhamento	Bordeaux	Curitiba
Ano de referência		1995	2010
População (hab.)		750.000	1.751.907
Empregos	Pequenas lojas de varejo	36.975	48.241
	Grandes lojas de varejo	8.053	
	Total	283.200	848.850
Estabelecimentos	Pequenas lojas de varejo	8.262	106.258
	Grandes lojas de varejo	107	
	Total	36.713	234.788

Fonte: Henriot e Routhier (2010); IBGE (2013), IPPUC (2014a) e RAIS (2010)

Como o modelo adotado foi elaborado com dados de valores diários, considerou-se também uma conversão de 1 semana em 6 dias operacionais.

Além dos fatores de estimativa de demanda, cada tipo de estabelecimento foi classificado pelos tipos de produtos que podem ser movimentados, sendo estes:

- Alimentos;

- Bebidas;
- Vestuário, calçados e têxteis;
- Construção;
- Limpeza;
- Tintas e vernizes;
- Eletrodomésticos e eletrônicos e;
- Outros.

A Tabela 5.14 exemplifica o resumo para cada tipo de estabelecimento de Curitiba descrito por seu respectivo código CNAE, a classificação adotada para aplicação dos fatores de Henriot e Routhier (2010) e a classificação pelos tipos de produtos movimentados. A tabela completa referente a estes dados pode ser vista no Apêndice A.

Tabela 5.14 – Estimativa de demanda, número médio de funcionários e participação de tipo de produto movimentado por tipo de estabelecimento considerado no estudo de caso

Código CNAE	Descrição	Demanda (kg/func. semana)	Número médio de funcionários	Classificação ¹	Tipo de produto movimentado (%)										Total
					Alimentos	Bebidas	Vestuário, calçados e têxteis	Construção	Limpeza	Tintas e vernizes	Farmacêuticos	Máquinas e veículos	Eletrodomésticos e eletrônicos	Outros tipos	
4631100	Comércio atacadista de leite e laticínios	1560	1,75	hipermercado	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
4632001	Comércio atacadista de cereais e leguminosas beneficiados	1560	0,95	hipermercado	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
4632002	Comércio atacadista de farinhas, amidos e féculas	1560	0,95	hipermercado	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
4633801	Comércio atacadista de frutas, verduras, raízes, tubérculos, hortaliças e legumes frescos	1560	4,43	hipermercado	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
4633802	Comércio atacadista de aves vivas e ovos	1560	4,43	hipermercado	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
4759801	Comércio varejista de artigos de tapeçaria, cortinas e persianas	115	1,24	outros	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
4711302	Comércio varejista de mercadorias em geral, com predominância de produtos alimentícios - supermercados	580	87,15	supermercado	60%	10%	0%	0%	5%	0%	0%	0%	10%	15%	100%
4712100	Comércio varejista de mercadorias em geral, com predominância de produtos alimentícios - minimercados, mercearias e armazéns	535	1,49	minimercados	75%	10%	0%	0%	5%	0%	0%	0%	0%	10%	100%
5510801	Hotéis	64	9,08	cafês, hotéis, restaurantes	70%	10%	0%	0%	10%	0%	0%	0%	0%	10%	100%

Baseado em Henriot e Routhier (2010)
Fonte: Próprio autor

5.2.2 Localização dos candidatos a centros urbanos de distribuição

Para selecionar os locais candidatos para implantação de centro de distribuição em Curitiba foram adotados os seguintes critérios:

- Um centro de distribuição por bairro;
- Número de estabelecimentos por bairro;
- Espacialização dos centros pelo território do município;
- 10 locais candidatos a CD.

A Tabela 5.15 mostra os 20 bairros que possuem maior quantidade de estabelecimentos selecionados para o modelo. Foram escolhidos os 7 primeiros bairros dessa lista como candidatos e, para os 3 locais restantes, a seleção foi feita para melhor espacializar os candidatos pelo território do município.

Uma vez que as áreas mais periféricas ao norte e ao sul não apresentavam nenhum local candidato, foram escolhidos os bairros de Bacacheri (1.234 estabelecimentos), Santa Felicidade (1.160 estabelecimentos) e Campo de Santana (243 estabelecimentos).

Tabela 5.15 – Vinte bairros com maior quantidade de estabelecimentos considerados no estudo de caso

Ranking	Bairro	Quantidade
1	Centro	8.684
2	Boqueirão	3.134
3	Portão	2.647
4	Sítio Cercado	2.620
5	Cidade Industrial	2.459
6	Água Verde	2.210
7	Rebouças	1.976
8	Cajuru	1.710
9	Hauer	1.699
10	Xaxim	1.681
11	Batel	1.489
12	Novo Mundo	1.470
13	Pinheirinho	1.381
14	Uberaba	1.355
15	Bacacheri	1.234
16	Santa Felicidade	1.160
17	Bairro Alto	1.132
18	Alto Boqueirão	1.105
19	Tatuquara	1.086

Ranking	Bairro	Quantidade
20	Bigorriho	1.079

Fonte: Baseado em IPPUC (2014a)

A Figura 5.4 ilustra os 10 bairros elencados como potenciais para implantar o CD urbano.

Figura 5.4 – Localização dos CDUs candidatos para o estudo de caso

Fonte: Próprio autor

5.2.3 Custos diários

O modelo de localização elaborado tem como função objetivo minimizar o custo total de implantar os centros de distribuição e distribuir as mercadorias. Os custos envolvidos e seus valores são descritos nos itens seguintes.

Como apresentado no item 5.2.1.2, a base considerada para o modelo é diária e, assim como a demanda, os custos foram calculados para esta mesma medida.

Para aplicação do modelo proposto também foram adotados 5 tipos de centros de distribuição, variando seu tamanho como mostra a Tabela 5.16. Isso possibilitou considerar, nos cenários simulados, situações que ocorrem em regiões urbanas onde há baixa disponibilidade de áreas e

custos elevados para construir CDUs próximos aos centros comerciais, de forma que nestes locais as instalações têm tamanhos menores; nas áreas mais periféricas da cidade, esses locais podem dispor de áreas maiores.

Tabela 5.16 – Tipos de CDUs considerados

CDU Tipo	Nº de viagens por dia	Área total (m²)	Área construída (m²)	Nº func. CD (operação)
1	100	4.000	2.000	80
2	125	5.000	2.500	100
3	250	10.000	5.000	200
4	375	15.000	7.500	300
5	500	20.000	10.000	400

Fonte: Próprio autor

Também foi considerado que o CD opera 300 dias/ano e 24 horas/dia, possibilitando recebimento noturno de caminhões maiores que possuam dificuldade de transitar durante o dia na malha viária da cidade.

5.2.3.1 Custos fixos

Para a estimativa dos custos fixos de cada tipo dos CDUs foram considerados os seguintes componentes:

- Custo de aluguel do terreno;
- Custo de construção do centro urbano de distribuição;
- Salário dos funcionários do centro urbano de distribuição;
- Custos fixos de caminhão (veículo e salário dos motoristas e ajudantes).

Como descrito no item 5.2.2, foram selecionados 10 locais candidatos para a implantação de CDUs. Para cada um desses pontos, foram atribuídos os tipos de CDs da Tabela 5.16, conforme sua localização. Para locais em regiões mais próximos ao Centro foram consideradas instalações menores, enquanto locais mais periféricos possibilitaram instalações maiores.

Para identificar o custo do aluguel do terreno nesses locais, tentou-se levantar valores no mercado mas poucas informações estavam disponíveis. Foram portanto adotados os valores indicados na Tabela 5.17, mantendo a proporção dos custos encontrados no mercado. Esta tabela também aponta os tipos de CDs atribuídos para cada local candidato.

Tabela 5.17 – Locais candidatos para implantação de CDU e respectivos tipos e custos de aluguel

Bairro	Tipo CDU	Aluguel (R\$/m²/mês)
Centro	1	20
Boqueirão	3	5
Rebouças	1	10
Portão	2	10
Sítio Cercado	3	5
CIC	5	5
Água Verde	2	10
Bacacheri	4	5
Campo de Santana	5	5
Santa Felicidade	4	5

Fonte: Próprio autor

Para a construção do CDU foi adotado um custo de R\$1.000/m² (baseado no valor levantado em SINAPI, 2013). No entanto, sabe-se que a amortização desse tipo de investimento tem prazo muito longo e, desta forma, foi adotado custo diário tendendo a $C = \text{taxa de amortização} \times \text{investimento}$; a taxa de amortização foi adotada em 0,033% ao dia, o que equivale a uma taxa de 10% ao ano. Os custos de construção obtidos para cada tipo de CDU são mostrados na Tabela 5.18.

Tabela 5.18 – Custos de construção estimados por tipo de CDU

CDU Tipo	Área total (m²)	Área construída (m²)	Custo de construção CDU (R\$/dia)
1	4.000	2.000	666,67
2	5.000	2.500	833,33
3	10.000	5.000	1.666,67
4	15.000	7.500	2.500,00
5	20.000	10.000	3.333,33

Fonte: Próprio autor

Para dimensionamento dos números de funcionários foi considerado o fator de 0,02 funcionários/m², divididos em 3 turnos. Além disso, foi considerado também que há um supervisor, que lida com equipes de 15 funcionários de operação do CD, e um gerente. Os salários adotados para cada tipo de funcionário foram levantados informalmente junto a uma transportadora local e estão indicados na Tabela 5.19; o total pago em salários em cada tipo de CDU é apresentado na Tabela 5.20.

Tabela 5.19 – Estimativa de salário por tipo de funcionário do CDU

Tipo de funcionário	Salário (R\$/mês)
Operação	1.000
Supervisor	3.000
Gerente	20.000

Fonte: Próprio autor

Tabela 5.20 – Total de funcionários e salário total estimados por tipo de CDU

CD Tipo	Nº func. CD			Salário total (R\$/dia)
	Operação	Supervisor	Gerente	
1	80	6	1	10.226,67
2	100	7	1	12.220,00
3	200	14	1	22.706,67
4	300	20	1	32.933,33
5	400	27	1	43.420,00

Fonte: Próprio autor

A equipe de cada veículo é formada por um motorista e um ajudante para descarga das mercadorias nos estabelecimentos. Os salários para cada um deles também foram levantados com a mesma transportadora e são indicados na Tabela 5.21.

Tabela 5.21 – Estimativa de salário do motorista e ajudante

Tipo de funcionário	Salário (R\$/mês)
Motorista	1.500
Ajudante	1.000
Total da equipe	2.500

Fonte: Próprio autor

Para todo o pessoal envolvido no sistema de distribuição proposto foram considerados encargos sociais e contribuições fiscais equivalentes à 100% do salário, além de 13 salários por ano.

Os custos fixos do veículo foram obtidos no Guia do Transportador Rodoviário de Cargas, como mostra a Tabela 5.22. Foi adotado o valor médio de R\$2.180,42 por veículo, sobre o qual foi aplicado ainda um fator de 50% referente a custos adicionais para aquisição de novos veículos para renovação de frota.

Tabela 5.22 – Custos fixos de caminhões leves

Tipo de caminhão leve		Custos fixos mensais				Total
		Depreciação a	Remuneração de capital	Licenciam.+ Seg. obrigatório+ IPVA	Seguro do casco	
8-160 E DELIVERY (E5) - BAÚ	VW	665,03	551,27	221,38	619,87	2.057,56
Accelo 815 2p (E5) - Carga Seca	MBB	613,84	567,92	228,96	686,88	2.097,60
Accelo 1016 2p (E5) - BAÚ IsoTerm	MBB	962,65	728,73	291,60	874,81	2.857,79
8700 (E5) - BAÚ	Agrale	912,17	532,41	210,43	547,13	2.202,13
Accelo 1016 (E5) - Carga Seca	MBB	683,35	594,06	238,98	621,36	2.137,74
VERTIS 90V18 4x2 (E5) - BAÚ	IVECO	652,03	509,51	204,15	571,61	1.937,30
Cargo 816 (E5) BAÚ	FORD	731,82	509,59	203,18	528,27	1.972,86
Média		745,84	570,50	228,38	635,70	2.180,42

Nota: Os dados acima têm como base o preço dos insumos pesquisados na região de São Paulo (08/04/2014)
 Fonte: GuiaTRC, 2014

Por fim, a Tabela 5.23 resume todos os custos considerados e a Tabela 5.24 indica os custos para cada local candidato.

Tabela 5.23 – Resumo dos custos considerados para o estudo de caso

Custo	Composição	Valor
Aluguel do terreno	Variável conforme bairro	(Tabela 5.17)
Construção	Custo de construção CD (R\$/m²)	1.000
	Taxa de amortização (construção CD)	10%
Salário dos funcionários do CD	Operação (R\$/ mês)	1.000
	Supervisor (R\$/ mês)	3.000
	Gerente (R\$/ mês)	20.000
Custo fixo do veículo	Salário da equipe por veículo (R\$/mês)	2.500
	Veículo (R\$/mês)	2.180,42
	Custos de aquisição do caminhão (% dos custos fixos)	50%
Outros	Encargos sociais e contribuições fiscais	100%
	Outros custos do CD	5%

Fonte: Próprio autor

Tabela 5.24 – Custos fixos por local candidato

Bairro	Tipo CDU	Capacidade (viagens/dia)	Custo fixo (terreno) (R\$/dia)	Custo fixo (construção CD) (R\$/dia)	Custo fixo (funcionário) (R\$/dia)	Custos fixos subtotais (R\$/dia)
Centro	1	100	3.200	667	10.227	14.798
Boqueirão	3	250	2.000	1.667	22.707	27.692

Bairro	Tipo CDU	Capacidade (viagens/dia)	Custo fixo (terreno) (R\$/dia)	Custo fixo (construção CD) (R\$/dia)	Custo fixo (funcionário) (R\$/dia)	Custos fixos subtotais (R\$/dia)
Rebouças	1	100	1.600	667	10.227	13.118
Portão	2	125	2.000	833	12.220	15.806
Sítio Cercado	3	250	2.000	1.667	22.707	27.692
Cic	5	500	4.000	3.333	43.420	53.291
Água Verde	2	125	2.000	833	12.220	15.806
Bacacheri	4	375	3.000	2.500	32.933	40.355
Campo de Santana	5	500	4.000	3.333	43.420	53.291
Santa Felicidade	4	375	3.000	2.500	32.933	40.355

Fonte: Próprio autor

5.2.3.2 Custos de distribuição

Foi adotado o valor médio de R\$ 0,8634/km para os custos de distribuição, obtido no Guia do Transportador Rodoviário de Cargas e mostrado na Tabela 5.25.

Tabela 5.25 – Custos operacionais variáveis

Tipo de caminhão leve			Custos variáveis por km					
			Manutenção	Pneus, câmaras e recapagens	Combustível	ARLA 32	Óleo de carter	Lavagens e graxas
8-160 E								
DELIVERY (E5) - BAÚ	VW		0,1845	0,0835	0,4445	0,0282	0,0067	0,1000
Accelo 815 2p (E5) - Carga Seca	MBB		0,1804	0,0835	0,4405	0,0279	0,0100	0,1000
Accelo 1016 2p (E5) - BAÚ	MBB		0,2328	0,0765	0,4351	0,0276	0,0086	0,1000
IsoTerm								
8700 (E5) - BAÚ	Agrale		0,2231	0,0835	0,4511	0,0286	0,0106	0,1000
Accelo 1016 (E5) - Carga Seca	MBB		0,2438	0,0918	0,4274	0,0271	0,0081	0,1000
VERTIS 90V18 4x2 (E5) - BAÚ	IVECO		0,1559	0,0835	0,4536	0,0288	0,0075	0,0999
Cargo 816 (E5) BAÚ	FORD		0,1920	0,0918	0,4312	0,0273	0,0067	0,1000
Média			0,2018	0,0849	0,4405	0,0279	0,0083	0,1000

Nota: Os dados acima têm como base o preço dos insumos pesquisados na região de São Paulo (08/04/2014)

Fonte: GuiaTRC, 2014

5.2.4 Rede viária

Foi levantada junto ao IPPUC (2014b) a base georreferenciada da rede viária de Curitiba, como mostra a Figura 5.5; os dados disponíveis são mostrados na Tabela 5.26.

Figura 5.5 – Rede viária de Curitiba
Fonte: Baseado em IPPUC, 2014b

Tabela 5.26 – Estrutura dos dados da base geográfica da rede viária

Campo	Descrição	Tipo
Objectid	Código de identificação da via	Inteiro
Chave	Chave de identificação da via (CodVia-NoInicio-NoFim)	Alfanumérico
CodVia	Código viário	Alfanumérico
NoInicio	Número inicial do trecho	Alfanumérico
NoFim	Número final do trecho	Alfanumérico
Status	Status da via (oficial/não oficial)	Alfanumérico
NMVia	Nome da via	Alfanumérico
NMVia_Ante	Nome antigo da via	Alfanumérico
Sist_Viari	Classificação do sistema viário	Alfanumérico
Sist_Via_1	Fonte da classificação do sistema viário	Alfanumérico
Status_Den	Status da denominação da via	Alfanumérico
Shape_Len	Extensão da via em metros	Real

Fonte: Baseado em IPPUC, 2014b

Para utilização do modelo, a rede não foi modificada, exceto pela correção de alguns problemas de conectividades, como exemplifica a Figura 5.6; foram adotados os dados de distância do campo “Shape_Len”.

Figura 5.6 – Problemas de conectividade da rede viária
Fonte: IPPUC 2014b e Google Earth

Apesar da base conter informações quanto à classificação do sistema viário, não foi adotado nenhum tipo de hierarquização para escolha de vias na etapa de roteirização.

Como pôde ser observado na Tabela 5.26, não existia nenhuma informação quanto à direção das vias; desse modo também considerou-se que todo o sistema é mão dupla.

5.3 Cenários simulados

Para avaliar o modelo, foram montados cenários variando o percentual de demanda de cada estabelecimento e a adesão do mercado à utilização do CD para recepção de suas mercadorias.

Conforme descrito no item 5.2.1.2, os produtos movimentados pelos pontos de demanda foram classificados em 8 tipos. No entanto, alguns tipos de mercadorias apresentam dificuldades de serem transportados e armazenados, como por exemplo produtos químicos que podem contaminar e danificar outros produtos, além de alguns serem considerados perigosos e precisarem ser movimentados separadamente; alguns alimentos também apresentam restrições, precisando ser mantidos refrigerados ou congelados e somente podendo ser movimentados por centros com áreas específicas para isso.

Também foi considerado que muitas empresas são partes de grandes cadeias que já possuem uma estrutura de distribuição incluindo CDs próprios, reduzindo a possibilidade de utilizarem um novo centro para a movimentação de suas mercadorias.

Por essas razões, foram definidos diferentes cenários variando os níveis de demanda disponível para o modelo proposto em 30%, 60% e 100%, sendo alguns produtos excluídos da análise pelas dificuldades em sua movimentação, como mostra a Tabela 5.27.

Tabela 5.27 – Participação de cada tipo de produto para os níveis de demanda considerados

Tipo de produto	Cenário 30%	Cenário 60%	Cenário 100%
Alimentos	30%	60%	100%
Bebidas	30%	60%	100%
Vestuário, calçados e têxteis	30%	60%	100%
Construção	30%	60%	100%
Limpeza	30%	60%	100%
Tintas e vernizes	0%	0%	0%
Farmacêuticos	0%	0%	0%
Máquinas e veículos	0%	0%	0%
Eletrodomésticos e eletrônicos	30%	60%	100%
Outros tipos	30%	60%	100%

Fonte: Próprio autor

Os níveis de adesão de mercado adotados na dissertação foram baseados em Correia et al. (2012), que realizaram uma pesquisa de preferência declarada (PD) para avaliar a adesão dos estabelecimentos comerciais em utilizar um centro urbano de distribuição para receber seus produtos em Belo Horizonte. Para a PD, Correia et al. (2012) montaram cenários considerando os seguintes atributos:

- **Custo:** uma das consequências da implantação de um CD é o aumento de custo pelo acréscimo de mais um estágio na cadeia de suprimentos;
- **Prestação de serviço:** considera-se que a um CD proporciona melhoria na prestação de serviços por apresentar maior flexibilidade operacional nas entregas, como por exemplo, fracionamento do pedido ou redução do número de entregas;
- **Confiabilidade:** admite-se que a existência de um CD melhore a pontualidade das entregas para os estabelecimentos;
- **Estoque x exposição:** com a implantação de um CD, permite-se uma maior área de exposição nos estabelecimentos, uma vez que o CD pode servir como ponto de armazenagem.

Essa pesquisa foi realizada com 25 estabelecimentos comerciais, onde foram aplicados 100 roteiros de entrevista, e resultou em 4 cenários de adesão do mercado:

- Cenário com 100% de adesão: onde o uso de um CD é obrigatório e regulamentado pela administração pública local;
- Cenário com 82% de adesão: onde a adesão não é obrigatória, mas possui subsídios do governo para diminuir os custos econômicos do sistema implantado;
- Cenário com 60% de adesão: onde não há incentivos governamentais no esquema;
- Cenário com 47% de adesão: representando o cenário pessimista, onde não há adesão da maioria dos estabelecimentos ao sistema.

Esses níveis de adesão foram aplicados no modelo sobre a quantidade de estabelecimentos por bairros, ou seja, no cenário com 47% de adesão do mercado todos os bairros tiveram 47% de seus estabelecimentos utilizando o CD. Como a seleção dos estabelecimentos foi feita aleatoriamente, esta estratificação permitiu que não houvesse um desbalanceamento na quantidade de estabelecimentos entre os bairros.

Combinando os diferentes cenários de demanda e adesão, foram montados os 12 cenários que foram avaliados no modelo, como mostra a Tabela 5.28.

Tabela 5.28 – Cenários simulados no modelo proposto

Cenário	Nível de demanda	Nível de adesão
cen30-ad47	30%	47%
cen30-ad60	30%	60%
cen30-ad82	30%	82%
cen30-ad100	30%	100%
cen60-ad47	60%	47%
cen60-ad60	60%	60%
cen60-ad82	60%	82%
cen60-ad100	60%	100%
cen100-ad47	100%	47%
cen100-ad60	100%	60%
cen100-ad82	100%	82%
cen100-ad100	100%	100%

Fonte: Próprio autor

A Tabela 5.29 resume as demandas totais obtidas para cada cenário proposto. Para isso, também foram desconsiderados os estabelecimentos com demanda superior a capacidade do veículo adotado, uma vez que estes locais poderiam ser abastecidos com caminhões com lotação total.

Tabela 5.29 – Demanda por cenário simulado

Cenário	Demanda total (kg/dia)	Quantidade de estabelecimentos
cen30-ad47	1.229.656	29.444
cen30-ad60	1.570.383	37.606
cen30-ad82	2.174.741	51.408
cen30-ad100	2.645.559	62.743
cen60-ad47	2.009.463	29.355
cen60-ad60	2.559.500	37.491
cen60-ad82	3.540.766	51.248
cen60-ad100	4.305.494	62.548
cen100-ad47	3.349.105	29.355
cen100-ad60	4.265.833	37.491
cen100-ad82	5.901.276	51.248
cen100-ad100	9.203.716	62.548

Fonte: Próprio autor

5.4 Resultados obtidos

Os itens seguintes descrevem os resultados obtidos para as etapas de agrupamento dos pontos (*clustering*), cálculo da distância de cada agrupamento por roteirização (*vehicle routing problem*) e do modelo de localização dos CDs urbanos.

Para a aplicação do modelo proposto, foram utilizados os dois computadores indicados pela Tabela 5.30.

Tabela 5.30 – Características dos computadores utilizados

Características	SVR-016	CON072
Processador	Intel® Xeon® CPU E5-2420 @ 2,4 GHz	Intel® Core™ i7-3612QM CPU @ 3,1 GHz
Memória	32GB	8GB
Sistema operacional	Windows Server 2008 R2 Enterprise	Windows 7 (64-bit)

Fonte: Próprio autor

5.4.1 Clustering

Como o número de *clusters* é um dado de entrada, para avaliar o comportamento e o desempenho dessa ferramenta do TransCAD foram feitas simulações com diferentes números de *clusters* para os dois cenários limites: (i) com 30% da demanda e 47% de adesão e (ii) com

100% da demanda e 100% de adesão. Para os outros cenários, foram simuladas apenas as situações com menor número de *clusters* necessários.

Também foi considerado que:

- A capacidade dos agrupamentos é equivalente ao tamanho do veículo adotado para o sistema de distribuição. Assim, cada agrupamento representa o conjunto de clientes a ser visitado em cada rota. A frota desse sistema é homogênea para todos os locais candidatos e o veículo adotado tem capacidade de 5 toneladas.
- Como o TransCAD não mostra ao usuário os resultados a cada iteração realizada, foi necessário executar esses procedimentos diversas vezes, sendo:
 - Para os dois cenários em análise, foram rodadas 1, 2, 3, 4, 5, 10 e 100 iterações;
 - Para o restante dos cenários, foram rodadas 1, 10 e 100 iterações.
- A matriz de custo utilizada foi elaborada com base na distância em linha reta entre os estabelecimentos.
- Para o balanceamento dos grupos, foi adotado que o tamanho dos mesmos devem ter no máximo 15% de diferença.

Os resultados obtidos para todos os cenários simulados com 100 iterações são mostrados na Tabela 5.31, enquanto tabelas mais detalhadas são apresentadas no Apêndice B.

Em um único cenário (cen100-ad82) o custo ótimo foi alcançado com apenas 2 iterações e, por isso, o mesmo cenário foi rodado com um *cluster* adicional para análise de sensibilidade.

Tabela 5.31 – Resumo dos resultados por cenário simulado

Cenário	<i>Clusters</i>	Quantidade de estabelecimentos	Custo total (km)	Tamanho médio dos <i>clusters</i> (kg)	Desvio (tamanho dos <i>clusters</i>)
cen30-ad47	246	29.444	45.514	4.998,6	-2,09% a 0,03%
cen30-ad47	260	29.444	15.575	4.729,5	-21,70% a 5,72%
cen30-ad47	300	29.444	12.989	4.098,9	-53,59% a 16,53%
cen30-ad47	350	29.444	11.429	3.513,3	-84,03% a 40,35%
cen30-ad47	400	29.444	10.226	3.074,1	-78,20% a 62,63%
cen30-ad60	315	37.606	52.717	4.985,3	-14,91% a 0,29%
cen30-ad82	436	51.408	63.637	4.987,9	-14,93% a 0,24%
cen30-ad100	530	62.743	77.218	4.991,6	-14,91% a 0,17%
cen60-ad47	403	29.355	33.890	4.986,3	-15,00% a 0,28%
cen60-ad60	513	37.491	39.521	4.989,3	-14,91% a 0,21%
cen60-ad82	709	51.248	49.680	4.994,0	-14,69% a 0,12%
cen60-ad100	862	62.548	58.513	4.994,8	-14,98% a 0,10%
cen100-ad47	671	29.355	28.814	4.991,2	-14,89% a 0,18%

Cenário	Clusters	Quantidade de estabelecimentos	Custo total (km)	Tamanho médio dos clusters (kg)	Desvio (tamanho dos clusters)
cen100-ad60	854	37.491	36.522	4.995,1	-13,40% a 0,10%
cen100-ad82	1181*	51.248	93.952	4.996,9	-1,80% a 0,06%
cen100-ad82	1182	51.248	40.879	4.992,6	-14,42% a 0,15%
cen100-ad100	1437	62.548	51.302	4.993,6	-14,71% a 0,13%
cen100-ad100	1450	62.548	30.913	4.948,8	-100% a 1,03%
cen100-ad100	1500	62.548	17.113	4.783,9	-20,77% a 4,52%
cen100-ad100	1600	62.548	12.925	4.484,9	-100% a 11,49%
cen100-ad100	1700	62.548	12.255	4.221,1	-97,44% a 18,44%

(*) Para o cenário com 100% da demanda e 82% de adesão e com 1.181 *clusters*, o resultado ótimo foi obtido com 2 iterações.

Fonte: Próprio autor

Para os casos em que foram simuladas diferentes quantidades de *clusters* (cen30-ad47 e cen100-ad100), pode-se verificar que o custo resultante diminui em função do aumento de agrupamentos (Figura 5.7), uma vez que um cenário com mais *clusters* gera menos ligações entre as sementes e o restante dos pontos.

Entretanto, o desvio do tamanho dos agrupamentos também aumenta, dado que a ocupação dos veículos deve diminuir para atender o mesmo volume de demanda. Uma comparação mais detalhada destes casos pode ser vista no item 5.4.1.1.

Figura 5.7 – Variação dos custos em função do aumento da quantidade de *clusters* para

(a) Cenário com 30% de demanda e 47% de adesão do mercado

(b) Cenário com 100% de demanda e 100% de adesão do mercado

Fonte: Próprio autor

O maior custo obtido foi de 93.952 km no cenário com 100% da demanda, 82% de adesão e 1.181 *clusters*, porém isso ocorreu possivelmente porque poucos rearranjos de estabelecimentos foram possíveis devido à carga média por veículo estar muito próxima da sua capacidade.

O segundo maior custo obtido foi para o cenário com 30% da demanda e 100% de adesão: 77.218 km. Isso ocorreu pois este cenário possui a maior quantidade de clientes visitados.

Já o cenário que apresentou o menor custo possuía 100% de demanda e 47% de adesão de mercado, resultando em 28.814 km. Conclui-se que isto tenha ocorrido por este cenário ter a menor quantidade de estabelecimentos (29.555 clientes). Apesar do cenário com 60% de demanda e 47% de adesão ter o mesmo número de paradas e um menor volume de demanda, o custo obtido foi mais alto (33.890 km) por ele ter um menor número de *clusters*, aumentando a distância percorrida entre as sementes e os outros pontos.

Para ilustração dos resultados obtidos nesta etapa, a Figura 5.8 mostra os agrupamentos resultantes do cenário com 30% da demanda, 47% de adesão e 246 *clusters* (100 iterações).

Figura 5.8 – Resultado do procedimento de *Clustering* para o cenário com 30% de demanda e 47% de adesão do mercado

Fonte: Próprio autor

5.4.1.1 Comparação dos resultados com variação da quantidade de número de *clusters*

Neste item é feita uma análise entre os resultados obtidos para o cenário com 30% de demanda e 47% de adesão, onde foram simuladas alternativas para o número de *clusters*: 246, 260, 300, 350 e 400.

Como já descrito anteriormente, o TransCAD não indica os resultados de iterações intermediárias e foram necessárias sete simulações (1, 2, 3, 4, 5, 10 e 100 iterações) para o levantamento dos dados necessários.

Para efeito de comparação, estes mesmos casos foram simulados para o cenário com 100% de demanda e 100% de adesão, cuja análise pode ser vista no Apêndice B.

Custos

Para o caso com o mínimo número de *clusters* possível (246 *clusters*), pode-se notar que os custos por agrupamento foram muitos próximos para a 1ª e a 2ª iteração, entre a 3ª a 5ª iteração e também para a 10ª e 100ª iterações, como representado pelas três curvas da Figura 5.9a. Ao decorrer das iterações, notou-se uma diminuição na quantidade de *clusters* com custos superiores a 250 km e um aumento da quantidade de *clusters* com custos inferiores a 25 km.

Já para o cenário com 400 *clusters*, devido a existência de maior possibilidade de trocas de clientes entre *clusters*, notou-se grande quantidade de *clusters* com custos abaixo de 25 km; com o decorrer das iterações o número de *clusters* com maiores custos também diminui, para a formação de agrupamentos com custos menores, como pode ser visto na Figura 5.9b.

Figura 5.9 – Variação da quantidade de *clusters* por faixa de custo ao decorrer das iterações para
(a) Cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 246 *clusters*
(b) Cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 400 *clusters*

Fonte: Próprio autor

Quantidade de elementos

No cenário com 246 *clusters*, a quantidade de elementos por agrupamento é bem variável, mostrando-se flutuante entre as iterações simuladas, sendo que para todos os limites de iterações há maior concentração de *clusters* com poucos elementos (<25 clientes) ou com bastante elementos (>200 clientes), como mostra a Figura 5.10a.

Já no cenário com 400 *clusters*, nota-se que em todas iterações há bastante *clusters* com até 100 clientes, mostrando variação significativa apenas nessa quantidade de estabelecimentos na obtenção do menor custo entre as iterações, como indica a Figura 5.10b.

Figura 5.10 – Variação da quantidade de *clusters* por faixa de quantidade de elementos nos *clusters* ao decorrer das iterações para (a) Cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 246 *clusters*
(b) Cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 400 *clusters*

Fonte: Próprio autor

Tamanho dos clusters

No cenário com 246 *clusters* não houve variação no número de ocorrências entre as classes apresentadas na Figura 5.11a, pois por ser a quantidade mínima de agrupamentos necessários a ferramenta não possibilita muitas trocas de clientes entre os *clusters* no decorrer das iterações. Por este mesmo motivo, pode-se notar também que a maior parte dos *clusters* estão muito próximos de sua capacidade.

Já para o cenário com 400 *clusters*, há uma maior concentração de *clusters* próximos ao seu tamanho médio (3.074 km), como pode ser visto na Figura 5.11b. Ao longo das iterações, pode-se notar maior variação nos *clusters* de maiores tamanhos para trocas de clientes que possam diminuir o custo total deste modelo.

Figura 5.11 – Variação da quantidade de *clusters* por faixa de tamanho dos *clusters* ao decorrer das iterações para (a) Cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 246 *clusters* (b) Cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 400 *clusters*
Fonte: Próprio autor

Resultados gerais

Os resultados obtidos no *clustering* são indicados da Tabela 5.32 à Tabela 5.36 e da Figura 5.12 à Figura 5.16. Pode-se notar que para todas as situações, apesar de não ter alcançado o custo mínimo possível, o modelo convergia para isso. Mesmo sem se conhecer o limite inferior do problema, observa-se que com 100 iterações o modelo já convergia mais lentamente tendendo ao seu mínimo.

Os custos totais tendem a diminuir com o aumento na quantidade de *clusters*, uma vez que há menos clientes por agrupamento e, conseqüentemente, menos ligações entre sementes e o restante dos pontos.

Tabela 5.32 – Resumo dos resultados para o cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 246 *clusters*

# Rodada	1	2	3	4	5	6	7
Custo total (em km)	83.130	82.990	54.768	54.766	54.766	49.246	45.514
Maior <i>cluster</i>	5.000,0	5.000,0	5.000,0	5.000,0	5.000,0	5.000,0	5.000,0
Menor <i>cluster</i>	4.995,2	4.877,8	4.995,1	4.898,6	4.898,6	4.994,4	4.894,3
Tamanho médio dos <i>clusters</i>	4.998,6	4.998,6	4.998,6	4.998,6	4.998,6	4.998,6	4.998,6
Desvio	-0,07% a 0,03%	-2,42% a 0,03%	-0,07% a 0,03%	-2,00% a 0,03%	-2,00% a 0,03%	-0,08% a 0,03%	-2,09% a 0,03%
Máximo número de iterações	1	2	3	4	5	10	100
Número de iterações simuladas	1	2	3	4	5	10	100
Tempo computacional	0:00:12	0:03:15	0:06:21	0:09:01	0:12:58	0:05:20	0:57:50
Computador	CON-072	CON-072	CON-072	CON-072	CON-072	CON-072	CON-072

Fonte: Próprio autor

Figura 5.12 – Variação do custo em função das iterações para o cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 246 *clusters*
Fonte: Próprio autor

Tabela 5.33 – Resumo dos resultados para o cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 260 *clusters*

# Rodada	1	2	3	4	5	6	7
Custo total (em km)	61.005	38.741	29.033	22.266	20.279	18.488	15.575
Maior <i>cluster</i>	4.998,4	4.995,7	4.998,5	4.996,5	4.987,6	4.968,7	5.000,0
Menor <i>cluster</i>	3.545,7	4.019,7	4.020,0	1.679,5	4.590,0	4.339,4	3.703,0
Tamanho médio dos <i>clusters</i>	4.729,5	4.729,5	4.729,5	4.729,5	4.729,5	4.729,5	4.729,5
Desvio	-25,03% a 5,69%	-15,01% a 5,63%	-15,00% a 5,69%	-64,49% a 5,65%	-2,95% a 5,46%	-8,25% a 5,06%	-21,70% a 5,72%
Máximo número de iterações	1	2	3	4	5	10	100
Número de iterações simuladas	1	2	3	4	5	10	100
Tempo computacional	0:00:59	0:05:15	0:08:10	0:11:36	0:13:28	0:10:17	1:41:36
Computador	CON-072	CON-072	CON-072	CON-072	CON-072	SVR-016	SVR-016

Fonte: Próprio autor

Figura 5.13 – Variação do custo em função das iterações para o cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 260 *clusters*
Fonte: Próprio autor

Tabela 5.34 – Resumo dos resultados para o cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 300 *clusters*

# Rodada	1	2	3	4	5	6	7
Custo total (em km)	40.047	22.534	18.318	15.225	14.603	13.736	12.989
Maior <i>cluster</i>	4.920,3	4.834,3	4.892,1	4.776,3	4.776,3	4.892,0	4.776,3
Menor <i>cluster</i>	2.137,4	2.687,7	3.196,4	2.921,9	1.263,9	1.851,2	1.902,4
Tamanho médio dos <i>clusters</i>	4.098,9	4.098,9	4.098,9	4.098,9	4.098,9	4.098,9	4.098,9
Desvio	-47,85% a 20,04%	-34,43% a 17,94%	-22,02% a 19,35%	-28,71% a 16,53%	-69,16% a 16,53%	-54,84% a 19,35%	-53,59% a 16,53%
Máximo número de iterações	1	2	3	4	5	10	100
Número de iterações simuladas	1	2	3	4	5	10	100
Tempo computacional	0:03:31	0:06:39	0:10:32	0:13:48	0:18:20	0:15:48	1:34:54
Computador	CON-072	CON-072	CON-072	CON-072	CON-072	SVR-016	SVR-016

Fonte: Próprio autor

Figura 5.14 – Variação do custo em função das iterações para o cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 300 *clusters*
Fonte: Próprio autor

Tabela 5.35 – Resumo dos resultados para o cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 350 *clusters*

# Rodada	1	2	3	4	5	6	7
Custo total (em km)	31.147	17.890	15.545	13.282	12.845	12.188	11.429
Maior <i>cluster</i>	4.942,6	4.892,1	4.892,1	4.864,0	4.864,0	4.892,1	4.930,9
Menor <i>cluster</i>	1.605,6	1.228,1	565,6	602,7	602,7	602,7	561,1
Tamanho médio dos <i>clusters</i>	3.513,3	3.513,3	3.513,3	3.513,3	3.513,3	3.513,3	3.513,3
Desvio	-54.30% a 40.68%	-65.04% a 39.25%	-83.90% a 39.25%	-82.85% a 38.45%	-82.85% a 38.45%	-82.85% a 39.25%	-84.03% a 40.35%
Máximo número de iterações	1	2	3	4	5	10	100
Número de iterações simuladas	1	2	3	4	5	10	100
Tempo computacional	0:04:55	0:07:34	0:11:14	0:14:34	0:18:45	0:16:18	1:37:19
Computador	CON-072	CON-072	CON-072	CON-072	CON-072	SVR-016	SVR-016

Fonte: Próprio autor

Figura 5.15 – Variação do custo em função das iterações para o cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 350 *clusters*
 Fonte: Próprio autor

Tabela 5.36 – Resumo dos resultados para o cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 400 *clusters*

# Rodada	1	2	3	4	5	6	7
Custo total (em km)	24.488	15.911	13.617	12.535	11.839	11.078	10.226
Maior <i>cluster</i>	4.942,6	4.966,8	4.942,6	4.864,0	4.701,7	4.818,4	4.999,4
Menor <i>cluster</i>	1.009,1	872,3	1.000,6	1.140,8	648,1	1.020,8	670,1
Tamanho médio dos <i>clusters</i>	3.074,1	3.074,1	3.074,1	3.074,1	3.074,1	3.074,1	3.074,1
Desvio	-67.17% a 60.78%	-71.62% a 61.57%	-67.45% a 60.78%	-62.89% a 58.22%	-78.92% a 52.94%	-66.79% a 56.74%	-78.20% a 62.63%
Máximo número de iterações	1	2	3	4	5	10	100
Número de iterações simuladas	1	2	3	4	5	10	100
Tempo computacional	0:04:28	0:08:15	0:09:07	0:15:24	0:18:22	0:19:13	2:07:13
Computador	CON-072	CON-072	CON072	CON072	CON072	SVR-016	SVR-016

Fonte: Próprio autor

Figura 5.16 – Variação do custo em função das iterações para o cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 400 *clusters*
 Fonte: Próprio autor

5.4.2 Vehicle routing problem

A roteirização no TransCAD foi realizada para obter os roteiros com as menores distâncias entre os pontos dos *clusters* montados na etapa anterior do modelo. Para isso, foram considerados que:

- O sistema de distribuição só opera com entregas aos estabelecimentos;
- Como não foi analisado o tempo de viagem das rotas, não foram estipuladas janelas de tempo para os locais candidatos a CDUs e paradas, como também não foram impostos limites para a duração das rotas e tempo de serviço para atendimento dos estabelecimentos;
- Nenhum cliente tinha um CD pré-determinado para seu atendimento e também não foi imposta nenhuma restrição de veículos;
- A matriz de custo (distância) foi calculada com base na rede viária da cidade de Curitiba;
- Como mencionado no item 5.4.1, frota considerada é homogênea e composta por veículos com capacidade de 5 toneladas;
- A quantidade de veículos adotada foi a suficiente para a alocação de um veículo a cada *cluster*.

Em alguns cenários *clusters* diferentes apresentavam a mesma semente, mas não é possível no TransCAD diferencia-los já que a identificação do *cluster* é o próprio ID da semente; mesmo

nestes casos foi calculado apenas um roteiro por semente, restando esse problema como algo a ser explorado em estudos que sucederem este trabalho.

Como para cada cenário foi necessário rodar essa ferramenta na mesma quantidade do número de *clusters*, foi criada uma rotina no TransCAD para sua automatização com GISDK (*GIS Developer's Kit*). A Figura 5.17 indica o pseudocódigo da rotina desenvolvida, sendo que sua versão detalhada pode ser vista no Apêndice D.

```

0  ROTINA VRP-CLUSTERS
1  abre tabela de clusters
2  para cada cluster faça
3      lista ID dos estabelecimentos considerados no cenário
4      lista nós da rede mais próximos de cada ID
5      lista distância entre os estabelecimentos considerados no cenários e respectivos nós na
        rede (dist_acesso)
6  fim
7  constrói a rede para matriz de custo (arquivo .net)
8  monta a matriz de distância com base no arquivo criado na etapa anterior e todos os nós da
        rede listados (dist_noi_noj)
9  checa se há sementes repetidas na lista de clusters
10 gera arquivo de texto com as sementes repetidas
11 //monta a matriz de custo entre os estabelecimentos, onde:
12 para cada cluster faça
13     para cada i=estabelecimento do cluster faça
14         para cada j=estabelecimento do cluster faça
15             dist_i_j=dist_acesso_i+dist_noi_noj+dist_acesso_j
16         fim
17     fim
18 //monta a tabela de veículos, onde:
19 para cada depósito faça
20     cria tabela com 1 tipo de veículo de capacidade de 5 toneladas e frota de 1 veículo
21     fim
22 roda procedimento de roteirização (output=arquivos com roteiros)
23 se elementos do clusters <=2
24     gera arquivo de texto com dist_i_j
25     fim
26 calcula distância entre todos os pontos do clusters e cada local candidato a CDU
27 gera arquivo de texto registrando o cluster, o local candidato a CDU e a menor distância
        calculada
28 fim
29 fim do algoritmo

```

Figura 5.17 – Rotina simplificada para roteirização dos *clusters* no TransCAD

Fonte: Próprio autor

Um resumo dos resultados obtidos nesta fase do modelo pode ser visto na Tabela 5.37.

Tabela 5.37 – Distância total para cada cenário simulado

Cenário	Quantidade de <i>clusters</i>	Distância (km)			Diferença	
		Iteração 1	Iteração 10	Iteração 100	it1-it10	it10-it100
cen30-ad47	246	8.544	7.848	7.651	8%	3%
cen30-ad47	260	8.506	6.463	6.171	24%	5%
cen30-ad47	300	8.779	5.930	5.824	32%	2%
cen30-ad47	350	7.523	5.385	5.288	28%	2%
cen30-ad47	400	6.538	4.839	4.641	26%	4%
cen30-ad60	315	11.048	9.031	8.939	18%	1%
cen30-ad82	436	10.740	8.356	8.472	22%	-1%
cen30-ad100	530	9.630	8.078	7.627	16%	6%
cen60-ad47	403	8.517	7.119	6.393	16%	10%
cen60-ad60	513	7.236	6.418	5.920	11%	8%
cen60-ad82	709	6.537	5.989	5.989	8%	0%
cen60-ad100	862	6.931	5.154	5.460	26%	-6%
cen100-ad47	671	5.458	4.701	4.264	14%	9%
cen100-ad60	854	5.197	4.550	4.238	12%	7%
cen100-ad82	1181*	4.682	4.662	4.662	0%	0%
cen100-ad82	1182	4.878	3.815	3.676	22%	4%
cen100-ad100	1437	5.131	3.757	3.355	27%	11%
cen100-ad100	1450	5.606	3.090	3.056	45%	1%
cen100-ad100	1500	5.990	2.597	2.473	57%	5%
cen100-ad100	1600	6.170	2.379	2.287	61%	4%
cen100-ad100	1700	5.283	2.313	2.249	56%	3%
Média					25%	4%

(*) Para o cenário com 100% da demanda e 82% de adesão e com 1.181 *clusters*, o resultado ótimo foi obtido com 2 iterações.

Fonte: Próprio autor

A distância total é maior para os cenários rodados com apenas uma iteração na etapa de formação dos *clusters*, e este valor cai para o caso com maior número de iterações, sendo que isso não ocorreu em apenas dois cenários (cen30-ad82 e cen60-100), indicados na Tabela 5.37 com diferenças negativas.

Os resultados dos dados da fase de *clustering* com 10 iterações são bem melhores quando comparados com os de apenas 1 iteração, sendo que no caso mais extremo a diferença foi de cerca de 61% para o cenário com 100% de demanda, 100% de adesão de mercado e 1600 *clusters*. A média da diferença desses cenários é de aproximadamente 25%.

Essa diferença cai quando são comparados os resultados com os dados da fase de *clustering* com 10 e 100 iterações, sendo que a média foi inferior a 5%. O caso com maior diferença foi de 11 % para o cenário com 100% de demanda, 100% de adesão e 1437 *clusters*.

Devido em parte à utilização de matrizes de distâncias diferentes para o agrupamento dos pontos (distância em linha reta) e para a roteirização (distância em rede), pode-se notar que não há uma correlação entre os resultados obtidos, como mostra a Figura 5.18 e a Tabela 5.38.

Figura 5.18 – Variação do custo total (distância total) obtida na fase de *clustering* e na fase de roteirização
Fonte: Próprio autor

Tabela 5.38 – Comparação entre as distâncias totais obtidas na fase *clustering* e roteirização

Cenário	Quantidade de <i>clusters</i>	Distância VRP (km)	Distância <i>clustering</i> (km)	Demanda total (kg)	Quantidade de estabelecimentos
cen100-ad100	1437	3.355	51.302	9.203.716	62.548
cen100-ad47	671	4.264	28.814	3.349.105	29.355
cen100-ad60	854	4.238	36.522	4.265.833	37.491
cen100-ad82	1181*	4.662	93.952	5.901.276	51.248
cen30-ad100	530	7.627	77.218	2.645.559	62.743
cen30-ad47	246	7.651	45.514	1.229.656	29.444
cen30-ad60	315	8.939	52.717	1.570.383	37.606
cen30-ad82	436	8.472	63.637	2.174.741	51.408
cen60-ad100	862	5.460	58.513	4.305.494	62.548
cen60-ad47	403	6.393	33.890	2.009.463	29.355
cen60-ad60	513	5.920	39.521	2.559.500	37.491
cen60-ad82	709	5.989	49.680	3.540.766	51.248

Fonte: Próprio autor

O cálculo dos roteiros pelo método adotado foi realizado em cerca de 13 minutos para os menores cenários, chegando a quase uma hora para o maior cenário (com 1700 *clusters*), como indica a Tabela 5.39. Um dos cenários demorou quase duas horas, mas é provável que isso seja

resultado de alguma causa externa que limitou a performance do computador durante aquela rodada.

A variação dos tempos computacionais em função da quantidade de *clusters* dos cenários considerados pode ser visualizada na Figura 5.19.

Tabela 5.39 – Tempo computacional da simulação dos cenários

Cenário	Quantidade de <i>clusters</i>	Quantidade de estabelecimentos	Tempo computacional (minutos)		
			Iteração 1	Iteração 10	Iteração 100
cen30-ad47	246	29.444	12.7	13.1	14.7
cen30-ad47	260	29.444	15.0	14.3	14.4
cen30-ad47	300	29.444	12.9	12.2	12.4
cen30-ad47	350	29.444	13.8	15.0	15.2
cen30-ad47	400	29.444	16.6	16.9	16.1
cen30-ad60	315	37.606	16.1	15.3	15.2
cen30-ad82	436	51.408	29.1	27.0	28.1
cen30-ad100	530	62.743	33.2	31.9	32.2
cen60-ad47	403	29.355	21.1	18.1	18.0
cen60-ad60	513	37.491	25.2	22.5	23.1
cen60-ad82	709	51.248	33.2	32.1	32.0
cen60-ad100	862	62.548	38.8	39.7	39.2
cen100-ad47	671	29.355	30.1	25.9	25.9
cen100-ad60	854	37.491	35.3	32.3	32.2
cen100-ad82	1181	51.248	46.1	43.9	-
cen100-ad82	1182	51.248	45.1	44.4	43.0
cen100-ad100	1437	62.548	51.0	52.0	52.1
cen100-ad100	1450	62.548	56.9	50.8	49.3
cen100-ad100	1500	62.548	60.5	51.2	50.4
cen100-ad100	1600	62.548	56.0	52.4	55.8
cen100-ad100	1700	62.548	56.3	58.0	118.9

Fonte: Próprio autor

Figura 5.19 – Variação do tempo computacional em função da quantidade de *clusters* de cada cenário simulado
Fonte: Próprio autor

Para ilustrar o procedimento dessa fase do modelo, a Figura 5.20 indica a rota calculada para um dos *clusters* do cenário com 30% de demanda e 47% de adesão de mercado (246 *clusters* e 100 iterações).

Figura 5.20 – Rota de um *cluster* do cenário cen30-ad47-cl246-it100
Fonte: Próprio autor

5.4.3 Localização dos CDs

Após a obtenção das distâncias dos roteiros de cada *cluster* e a sua distância até cada local candidato a CDU, estes dados foram colocados em planilhas do *software* Microsoft Excel para cálculo dos roteiros incluindo a ida e a volta a cada CDU, considerando a equação seguinte.

roteiro (CD – cluster) =

*2 * distância entre cluster e CD candidato + distância para percorrer o cluster*

Com base nestes dados e nos custos indicados no item 5.2.3, foi elaborado o modelo de localização dessas instalações no OpenSolver, como ilustra a Figura 5.21.

Figura 5.21 – Exemplo do modelo de planilha utilizado para montar o modelo de localização dos CDUs
Fonte: Próprio autor

Também foi adotada uma tolerância de 5% entre a solução encontrada e o limite inferior estimado e não foi imposto limite de tempo.

Os resultados obtidos nos cenários são apresentados a seguir, sendo que o item 5.4.3.1 descreve e analisa os resultados gerais do modelo e o item 5.4.3.2 contém a análise conforme os resultados observados do modelo utilizando as informações oriundas das diversas iterações realizadas de cada cenário na fase de *clustering*.

5.4.3.1 Resultados gerais

O resumo dos resultados obtidos pode ser visto na Tabela 5.40, onde são mostradas as iterações que deram o menor custo total para cada cenário simulado. No Apêndice C constam os resultados detalhados desta fase para todos os cenários.

Tabela 5.40 – Resultado para cada cenário considerando iteração que obteve menor custo total

Cenário	Quantidade de <i>clusters</i>	<i>Clusters</i> sem sementes repetidas	Iteração	Custo total (R\$/dia)	Custo por tonelada movimentada (R\$/dia/t)	Distância total (km)	Número de CDUs abertos
cen30-ad47	246	246	10	123.299	100,27	11.727	1
cen30-ad47	260	260	100	139.121	113,14	9.224	2
cen30-ad47	300	300	100	153.395	124,75	9.657	2
cen30-ad47	350	350	100	174.463	141,88	9.394	3
cen30-ad47	400	400	100	203.165	165,22	12.388	2
cen30-ad60	315	315	100	161.027	102,54	12.459	2
cen30-ad82	436	436	10	224.064	103,03	15.092	4
cen30-ad100	530	530	100	269.301	101,79	19.787	2
cen60-ad47	403	403	10	206.943	102,98	11.916	3
cen60-ad60	513	513	100	259.994	101,58	17.747	2
cen60-ad82	709	709	10	344.994	97,43	20.220	3
cen60-ad100	862	855	1	415.164	96,43	28.276	2
cen100-ad47	671	664	1	327.933	97,92	18.571	3
cen100-ad60	854	847	1	409.333	95,96	22.317	3
cen100-ad82	1181*	1159	10	560.957	95,06	27.518	4
cen100-ad82	1182	1182	100	567.065	95,41	25.335	4
cen100-ad100	1437	1407	1	682.484	74,15	34.441	5
cen100-ad100	1450	1420	1	689.565	74,92	39.624	5
cen100-ad100	1500	1468	1	704.030	76,49	36.791	5
cen100-ad100	1600	1565	1	752.028	81,71	32.880	7
cen100-ad100	1700	1687	3	802.545	87,20	29.778	6

Fonte: Próprio autor

Conforme já era esperado, o custo total de implantação dos CDUs e de distribuição das mercadorias cresce conforme a quantidade de *clusters* aumenta (Figura 5.22), dado que a frota necessária para atender os estabelecimentos aumenta e são necessários mais CDUs.

Figura 5.22 – Variação do custo total em função da quantidade de *clusters* dos cenários de menor custo

Fonte: Próprio autor

Isso indica que o ideal é ter a maior ocupação dos veículos possível, porém, na distribuição urbana, ela nem sempre é limitada pelo peso das mercadorias, mas por seu volume. Pelas situações onde foram simuladas diferentes quantidades de *clusters*, pode ser verificado que para o cenário com 30% de demanda e 47% de adesão de mercado o custo do caso com 400 *clusters* é aproximadamente 65% superior ao caso com 246 *clusters* (Tabela 5.41), tendo o modelo indicado a necessidade de um CDU a mais para a primeira alternativa, na qual o tamanho médio dos agrupamentos corresponde a cerca de 62% da capacidade de um veículo adotado.

Já no cenário com 100% de demanda e adesão de mercado, o custo do sistema com 1700 *clusters* foi de cerca de 18% superior ao caso com 1437 *clusters*, sendo que o modelo também indicou a necessidade de um CDU a mais para o primeiro caso, no qual o tamanho médio de seus *clusters* é de quase 85% capacidade do veículo considerado.

Tabela 5.41 – Comparação dos resultados dos cenários simulados com diferentes quantidades de *clusters*

Cenário	Quantidade de <i>clusters</i>	Variação da quantidade de <i>clusters</i>	Tamanho médio dos <i>clusters</i> (kg)	Variação do tamanho médio dos <i>clusters</i>	Custo total (R\$/dia)	Variação do custo total
cen30-ad47	246	62,6%	4998,6	-38,5%	123.299	64,8%
	400		3074,1		203.165	
cen100-ad100	1437	18,3%	4993,6	-15,5%	682.484	17,6%
	1700		4221,1		802.545	

Fonte: Próprio autor

Como também pode ser observado na Tabela 5.40, os custos obtidos nos cenários simulados variam entre aproximadamente 74 e 165 reais/dia por tonelada movimentada. A Figura 5.23 indica que para os cenários com a quantidade mínima de *clusters*, essa variação diminui para cerca de 74 a 100 reais/dia por tonelada, enquanto que no restante dos cenários os custos aumentam conforme a quantidade de *clusters* adotada.

Figura 5.23 – Custos diários por tonelada movimentada dos cenários simulados

Fonte: Próprio autor

Considerando apenas os resultados apresentados na Tabela 5.42, o CDU de Rebouças é implantado em 15 dos 21 cenários, seguido logo pelo localizado no Boqueirão, que foi implantado em 14 cenários.

Tabela 5.42 – Ocorrências de cada CDU nos cenários de menor custo

CDU	Ocorrências
Rebouças	15
Boqueirão	14
Bacacheri	12
CIC	7
Sítio Cercado	6
Santa Felicidade	5
Centro	4
Portão	4
Água Verde	3
Campo de Santana	0

Fonte: Próprio autor

O CDU de Rebouças é do tipo 1, com capacidade de apenas 100 viagens por dia, mostrando que o modelo apresentado indicou que seria bom localizar a instalação próximo ao centro da cidade, onde há uma maior quantidade de clientes. A diferença entre esse estabelecimento e o daquele localizado no próprio centro é que este último apresenta um custo maior de aluguel.

Já o CDU de Boqueirão é de médio porte (tipo 3), com capacidade de 250 viagens por dia. Ele consta em mais resultados do que o candidato localizado em Portão e Água Verde por

apresentar maior capacidade, o que compensa os custos mais elevados que os nos outros dois bairros, e por ter mais clientes próximos, sendo o segundo bairro com mais estabelecimentos considerados no modelo como mostrou a Tabela 5.15 do item 5.2.2.

O CDU de Campo de Santana não consta em nenhum dos resultados, pois apesar de ter uma capacidade maior que os candidatos mais próximos aos centros, tem custo mais elevado em função de maior área e mais funcionários.

Considerando todos os cenários simulados, foi verificado que na maioria dos casos quando o resultado indica a implantação de dois ou mais CDUs, apenas um deles fica ocioso; isso apenas não ocorreu em 7 das 102 rodadas, sendo em 4 delas o resultado implantar apenas um CDU.

5.4.3.2 Comparação dos resultados observados do modelo utilizando as informações oriundas das diversas iterações realizadas de cada cenário na fase de *clustering*

Os resultados apontaram que em apenas 8 dos 21 casos, o cenário de menor custo é aquele simulado com os dados de *clustering* obtidos com maior número de iterações. Como indica a Tabela 5.43, mesmo nestes casos, os custos obtidos com os dados das outras iterações são próximos ao mínimo encontrado, sendo que a maior diferença foi de 2,4% para o cenário de 30% de demanda e 60% de adesão.

Isso ainda não considera a situação cuja a diferença foi de 2,6%, para o cenário com 100% de demanda, 47% de adesão e 1450 *clusters*, pois o menor custo possível já pôde ser obtido com apenas uma iteração.

Tabela 5.43 – Comparação dos resultados de menor custo com os de outras iterações da fase de *clustering*

Cenário	Cenário com menor custo		Iteração 100		Iteração 10		Iteração 1	
	Iteração	Custo (R\$/dia)	Custo (R\$/dia)	Dif. com menor custo	Custo (R\$/dia)	Dif. com menor custo	Custo (R\$/dia)	Dif. com menor custo
cen30-ad47-clt246	10	123.299	125.914	2.1%	123.299	0.0%	123.589	0.2%
cen30-ad47-cl260	100	139.121	139.121	0.0%	139.344	0.2%	140.804	1.2%
cen30-ad47-cl300	100	153.395	153.395	0.0%	153.480	0.1%	155.597	1.4%
cen30-ad47-cl350	100	174.463	174.463	0.0%	174.501	0.0%	175.944	0.8%
cen30-ad47-cl400	100	203.165	203.165	0.0%	203.226	0.0%	204.403	0.6%
cen30-ad60	100	161.027	161.027	0.0%	163.483	1.5%	164.969	2.4%
cen30-ad82	10	224.064	224.271	0.1%	224.064	0.0%	226.657	1.1%
cen30-ad100	100	269.301	269.301	0.0%	269.632	0.1%	270.853	0.6%
cen60-ad47	10	206.943	207.667	0.3%	206.943	0.0%	208.895	0.9%
cen60-ad60	100	259.994	259.994	0.0%	260.215	0.1%	260.280	0.1%

Cenário	Cenário com menor custo		Iteração 100		Iteração 10		Iteração 1	
	Iteração	Custo (R\$/dia)	Custo (R\$/dia)	Dif. com menor custo	Custo (R\$/dia)	Dif. com menor custo	Custo (R\$/dia)	Dif. com menor custo
cen60-ad82	10	344.994	345.498	0.1%	344.994	0.0%	346.201	0.3%
cen60-ad100	1	415.164	415.619	0.1%	415.815	0.2%	415.164	0.0%
cen100-ad47	1	327.933	328.618	0.2%	330.998	0.9%	327.933	0.0%
cen100-ad60	1	409.333	410.241	0.2%	410.616	0.3%	409.333	0.0%
cen100-ad82	10	560.957	560.957	0.0%	560.957	0.0%	560.994	0.0%
cen100-ad82	100	563.051	567.065	0.7%	567.923	0.9%	563.051	0.0%
cen100-ad100-cl1437	1	682.484	689.209	1.0%	691.955	1.4%	682.484	0.0%
cen100-ad100-cl1450	1	689.565	690.880	0.2%	707.901	2.6%	689.565	0.0%
cen100-ad100-cl1500	1	704.030	709.686	0.8%	712.615	1.2%	704.030	0.0%
cen100-ad100-cl1600	1	752.028	755.127	0.4%	757.154	0.7%	752.028	0.0%
cen100-ad100-cl1700	3	802.545	815.127	1.5%	813.093	1.3%	806.880	0.5%

Fonte: Próprio autor

Essa diferença entre custos para diferentes iterações também pode ser explicada pelo fato do esquema de CDUs ser diferente para um mesmo cenário. Por exemplo, no cenário com 30% de demanda, 47% de adesão e 246 *clusters*, foram obtidos dois esquemas como resultado, em função do número de iterações. Para 1, 2, 3 e 10 iterações, apenas o CDU de Boqueirão é aberto; para 4, 5 e 100 iterações, os CDUs de Portão e Água Verde são abertos, conforme indica a Tabela 5.44, que também mostra quantos viagens são necessárias em cada local.

Tabela 5.44 – Comparação dos resultados de localização dos CDUs utilizando os dados das diferentes iterações da fase de *clustering* para o cenário cen30-ad47-cl246

Iteração	Custo total (R\$/dia)	Distância total (km)	Clusters sem sementes repetidas	Quantidade de viagens por CDU aberto		
				Boqueirão	Portão	Água Verde
1	123.589	12.062	246	246	-	-
2	123.554	12.021	246	246	-	-
3	123.824	12.335	246	246	-	-
4	126.605	11.015	246	-	121	125
5	126.605	11.015	246	-	121	125
10	123.299	11.727	246	246	-	-
100	125.914	10.215	246	-	121	125

Fonte: Próprio autor

Já para este mesmo cenário com 260 *clusters*, essa situação não ocorre; para todas iterações, apenas os CDUs de Boqueirão e Rebouças são abertos, utilizando a mesma frota de veículos, como mostra a Tabela 5.45.

Tabela 5.45 – Comparação dos resultados de localização dos CDUs utilizando os dados das diferentes iterações da fase de *clustering* para o cenário cen30-ad47-cl260

Iteração	Custo total (R\$/dia)	Distância total (km)	Clusters sem sementes repetidas	Quantidade de viagens por CDU aberto	
				Boqueirão	Rebouças
1	140.804	11.173	260	160	100
2	140.434	10.744	260	160	100
3	140.072	10.325	260	160	100
4	139.500	9.662	260	160	100
5	139.417	9.566	260	160	100
10	139.344	9.481	260	160	100
100	139.121	9.224	260	160	100

Fonte: Próprio autor

Alguns casos foram simulados com um número menor de *clusters*, pois o TransCAD utilizou a mesma semente para alguns agrupamentos, não sendo possível diferenciar os pontos de cada *cluster*. Nessas situações, os *clusters* de mesma semente foram tratados com um grande agrupamento e sendo atendido por apenas um veículo.

Ter simulado alguns casos com um número menor de *clusters*, em função do reuso de uma mesma semente pelo TransCAD para grupos diferentes, pode ter gerado um menor custo para dados da fase de *clustering* com menor quantidade de iterações, como exemplifica a Tabela 5.46. Nela, o menor custo obtido foi de 409.033 reais por dia com os dados de uma iteração, sendo que o número de *clusters* considerados foi inferior às outras iterações. Porém, em todos os casos em que isso ocorreu, o resultado também indicou esquemas de CDUs diferentes, como mostra a mesma tabela.

No entanto, essa situação nem sempre foi observada, como indica a Tabela 5.47, onde no cenário com 60% de demanda e 60% de adesão do mercado, o resultado obtido com os dados de uma iteração apresentou um custo maior apesar da menor quantidade de *clusters*.

Tabela 5.46 – Comparação dos resultados de localização dos CDUs utilizando os dados das diferentes iterações da fase de *clustering* para o cenário cen100-ad60

Iteração	Custo total (R\$/dia)	Distância total (km)	Clusters sem sementes repetidas	Quantidade de viagens por CDU aberto			
				Boqueirão	Sítio Cercado	CIC	Bacacheri
1	409.333	22.317	847	250	225		372
10	410.616	23.411	854	-	-	479	375
100	410.241	20.552	854	250	229		375

Fonte: Próprio autor

Tabela 5.47 – Comparação dos resultados de localização dos CDUs utilizando os dados das diferentes iterações da fase de *clustering* para o cenário cen60-ad60

Iteração	Custo total (R\$/dia)	Distância total (km)	Clusters sem sementes repetidas	Quantidade de viagens por CDU aberto	
				Rebouças	CIC
1	260.280	18.883	511	100	411
10	260.215	18.002	513	100	413
100	259.994	17.747	513	100	413

Fonte: Próprio autor

5.5 Considerações finais sobre os resultados do estudo de caso

O uso do modelo proposto por esta dissertação foi bem sucedido quando aplicado no estudo de caso, sendo que nos diversos cenários simulados os resultados mostraram que poderiam ser implantados de 1 (cen30-ad47-cl246) a 7 (cen30-ad47-cl1600) CDUs, onde os custos totais variaram entre 123 mil e 803 mil reais por dia para implantação das instalações e distribuição das mercadorias.

A primeira iteração de *clustering* no maior dos problemas levou aproximadamente 22 minutos e, nos demais casos, entre 4 e 10 minutos. Verificou-se que as primeiras dez iterações produzem soluções com custo no máximo 3% superior ao obtido com mais iterações; em dois terços dos casos a melhor solução foi obtida com dez ou menos iterações. Considerando esse número de iterações a aplicação de todas as fases do método requer no máximo 210 minutos, quando para 100 iterações são necessários até 720 minutos. Obviamente outras aplicações deste modelo exigem nova análise de sensibilidade em relação ao número de iterações.

De acordo com o modelo, o CDU mais indicado é de pequeno porte e bem próximo à região central, onde há uma grande concentração de estabelecimentos que devem ser atendidos. Ele é seguido de um de médio porte localizado no bairro com o segundo maior número de estabelecimentos, também não muito distante da região central (7 km). Apesar de ter mais capacidade (500 veículos), o local mais afastado não foi selecionado em nenhum cenário.

6 CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi desenvolver, aplicar e analisar um modelo de localização-roteirização de centros urbanos de transferência de carga utilizando o TransCAD e um *software* de solução problemas de programação linear, além de mostrar a relevância da logística urbana e da implantação dos centros de distribuição.

Para isso, primeiramente foi realizada uma revisão bibliográfica referente à logística urbana, onde a implantação desses centros urbanos de distribuição é considerada uma boa medida de melhoria por trazer benefícios para os diversos agentes envolvidos. Porém, devido a obstáculos à sua implantação, como o receio de compartilhamento de informações entre as empresas e o aumento do custo com a etapa de viagem adicional, fica evidente a necessidade de instaurar uma cultura de maior comunicação entre as partes, para que haja cooperativismo entre as empresas, além da conscientização e da promoção dos benefícios e conceitos de logística urbana e *City Logistics*. A interferência do setor público também é relevante para a implantação das melhorias na distribuição urbana de mercadorias adequadas às características de suas cidades.

Em seguida foram apresentados modelos de localização-roteirização encontrados na literatura, descrevendo seus conceitos e métodos de solução. Um dos modelos identificados é baseado em agrupamento de pontos, seguindo os procedimentos de agrupar os clientes, obter as rotas para visitá-los e, com base nessas informações, localizar onde devem ser implantados CDUs. Esse método é denominado de *cluster-first route-second* e foi o adotado no modelo proposto nesta dissertação, como mostrado na Figura 6.1.

Na literatura, foi verificada a utilização de outra ferramenta do TransCAD (*Facility Location*) para localização de CDs e roteirização de seus veículos (CARRARA, 2007; ASSIS, 2011). Para roteirização o TransCAD é mais comumente utilizado; Pelizaro (2000) comparou sua performance em conjuntos de testes sintéticos e reais com o *software* concorrente Delivery, chegando à conclusão de que o primeiro chega a soluções mais próximas das melhores conhecidas.

Após a proposição do modelo, foram apresentados os dados para sua aplicação em um estudo de caso no município de Curitiba. Para isso foram montados cenários variando níveis de demanda e adesão de mercado, resultando entre 30.000 e 65.000 estabelecimentos e entre 1.200 e 9.200 toneladas de demanda diária.

Figura 6.1 – Etapas do modelo proposto
Fonte: Próprio autor

Foi possível implementar o modelo com *softwares* difundidos ou de fácil acesso. O estudo de caso permitiu ainda validar o modelo proposto por esta dissertação.

Os *softwares* TransCAD e OpenSolver podem ser utilizados como ferramentas de apoio por instituições públicas para quantificar e localizar onde devem ser implantados CDUs para consolidação de mercadorias como medida para melhorar a logística urbana.

Instâncias de problemas tão grandes quanto as do estudo testado podem ser resolvidas em tempo hábil, corroborando a tese de Prodhon e Prins (2014) sobre a aplicabilidade de heurísticas de agrupamento em encontrar soluções rapidamente ou para inicializar outro algoritmo em problemas com muitos clientes.

Em função do método de *cluster-first route-second*, o submodelo de programação linear inteira de localização pôde ser concebido de forma simples e foi de fácil solução com *branch-and-cut*, sem a necessidade de heurísticas mais especializadas.

A extensiva literatura evidencia a importância da logística urbana e da necessidade de avanços, entre eles a criação de centros de distribuição no âmbito das cidades. A implantação desses centros de distribuição pode ser uma das medidas que contribuiria para a melhoria da qualidade de vida em cidades como Curitiba.

Pretende-se que a proposição e análise do método apresentado para localização de centros urbanos de distribuição, aplicável a grande número de estabelecimentos, contribua ao processo de melhoria da logística urbana e para consequentes benefícios à qualidade de vida nas cidades

brasileiras. A vontade e a capacidade de articulação política e institucional são preponderantes para que esse avanço se realize, mas a confiança na existência de técnica que possa ser aplicada em sua consecução é um fator relevante para que o processo possa se desenvolver efetivamente.

6.1 Continuidade do trabalho

Espera-se que os procedimentos e as análises deste trabalho possibilitem o desenvolvimento de novos estudos nesta área. Antecipando esses estudos são feitas as seguintes considerações para melhoria do método.

A demanda estimada adotada neste trabalho foi parcialmente baseada em um estudo realizado na França em 1995, pela inexistência de trabalhos mais recentes ou no Brasil. Isso indica a necessidade de pesquisas quanto a movimentação de mercadorias (em peso e volume) por tipo e porte de estabelecimentos no país.

Quanto ao modelo desenvolvido, a fase de agrupamento de clientes poderia ser realizada dividindo os estabelecimentos em duas classes ou mais: os locais mais próximos ao centro da cidade, onde normalmente as vias são mais estreitas e mais congestionadas e não há muita disponibilidade para estacionamento, agrupados para atendimento por um veículo de menor capacidade; os pontos localizados em áreas mais periféricas agrupados para atendimento por caminhões sucessivamente maiores.

O processo de *clustering* não considera se é possível atender todos os pontos de um *cluster* durante uma única jornada de trabalho (alguns *clusters* possuíam mais de 50 clientes); esse descolamento da realidade fez com que o custo tenha sido por vezes subestimado. Isso poderia ser tratado na fase de roteirização. Ainda na fase de *clustering* é possível estudar o uso de outras medidas de custo, como distâncias na rede ou tempo de viagem.

Por fim, deve-se estudar em detalhe o tempo computacional gasto e a configuração do OpenSolver, pois foi observado que em alguns cenários a solução final foi obtida em 25% do tempo, sendo o restante gasto na atualização do limite inferior do problema até que a tolerância imposta fosse atingida.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBAREDA-SAMBOLA, M.; DÍAZ, J. A.; FERNÁNDEZ, E. A compact model and tight bounds for a combined location routing problem. **Computers & Operations Research**, v.32, issue 3, p.407–428, 2005.
- ALLEN, J.; THORNE, G.; BROWNE, M. Best Urban Freight Solutions. **Good Practice Guide on Urban Freight Transport**. European Community, 2007
- ALLEN, J.; ANDERSON, S.; BROWNE, M.; JONES, P. **A framework for considering policies to encourage sustainable urban freight traffic and goods/service flows**. Londres: Transport Studies Group. University of Westminster, 2000
- ANDERSON, S.; ALLEN, J.; BROWNE, M. *Urban logistics: how can it meet policy makers' sustainability objectives?* **Journal of Transport Geography**, v. 13, issue 1. p. 71-81, 2005.
- BALAKRISHNAN, A.; WARD, J. E.; WONG, R.T. Integrated facility location and vehicle routing models: Recent work and future prospects. **American Journal of Mathematical and Management Sciences**, v.7, issue1-2, p. 35-61, 1987.
- BALLOU, R. H. **Gerenciamento da cadeia de suprimentos/Logística empresarial** (5ª ed.). Porto Alegre: Bookman, 2006.
- BARRETO, S. S. **Análise e modelização de problemas de localização-distribuição**.2004. 340p. Tese (Doutorado) – Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 2004.
- BARRETO, S.; FERREIRA, C.; PAIXÃO, J.; SANTOS, B. S. Using clustering analysis in a capacitated location-routing problem. **European Journal of Operational Research**, v.179, issue 3. p. 968-977, 2007.
- BOUDOUIN, D. **Methodological Guide: Urban Logistics Spaces**, La Documentation Française, Paris, França, 2012. 116p.
- BRASIL. Plano Nacional De Mobilidade Urbana. Lei Nº 12.587 de 03 de Janeiro de 2012. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12587.htm>. Acesso: 06/07/2013.
- Caliper (2012) **Routing and logistics with TransCAD 6.0 User's Guide**. Newton, MA, USA.
- CARMO, E.; GOMES, H.; BARROS NETO, J. Roteamento de veículos no transporte rodoviário de cargas: uma aplicação para a distribuição de jornais, 2003. Disponível em: <<http://www.din.uem.br/sbpo/sbpo2003/pdf/arq0120.pdf>>. Acesso em:10/05/2014.
- COIN-OR 2014. Disponível em < <http://www.coin-or.org/projects/Cbc.xml> >. Acesso em: 02/04/2014.
- COMISSÃO EUROPEIA. **5th RTD Framework Programme**, 1998. Disponível em <http://cordis.europa.eu/fp5/src/gp1_i1.htm>. Acesso em: 03 de junho de 2013.
- CONSIGNITY. 2013. Disponível em <<http://www.consignity.fr/>>. Acesso em: 03 de junho de 2013.
- CONTARDO, C.; CORDEAU, J. F.; GENDRON, B. **A branch-and-cut-and-price algorithm for the capacitated location-routing problem**. CIRRELT – Centre Interuniversitaire de Recherche sur les Réseaux d'Entreprise, la Logistique et le Transport, Université de Montréal, Canada, 2011.
- CORREIA, V. A.; GUERRA, A. L. E OLIVEIRA, L. K. Centros de distribuição urbano de mercadorias. In: PRATA, B. A.; OLIVEIRA, L. K.; PEREIRA NETO, W. A. (Orgs). **Logística Urbana: Fundamentos e aplicações**. Curitiba: CRV, 2012. p.35-77.
- COST 321. **Urban goods transport, Final report of the action**. Transport Research, European Commission Directorate General Transport, Bélgica, 1998
- CRAINIC, T.G. **City Logistics**. CIRRELT – Centre Interuniversitaire de Recherche sur les Réseaux d'Entreprise, la Logistique et le Transport. Université de Montréal, Canada, 2008
- CRAINIC, T.G.; MANCINI, S.; PERBOLI, G. E TADEI, R. **Clustering-based heuristics for the two-echelon vehicle routing problem**. CIRRELT – Centre Interuniversitaire de Recherche sur les Réseaux d'Entreprise, la Logistique et le Transport, Université de Montréal, Canada, 2008.
- CRAINIC, T.G; RICCIARDI, N. E STORCHI, G. **Models for Evaluating and Planning City Logistics Systems**. CIRRELT – Centre Interuniversitaire de Recherche sur les Réseaux d'Entreprise, la Logistique et le Transport, Université de Montréal, Canada, 2009
- CURITIBA. Lei Municipal 11.266, de 16 de dezembro de 2004. Dispõe sobre a adequação do Plano Diretor de Curitiba ao Estatuto da Cidade – Lei Federal nº 10.257/2001, para orientação e controle do desenvolvimento integrado do município. Disponível em <<http://leismunicipais.com.br/a/pr/c/curitiba/lei-ordinaria/2004/1126/11266/lei-ordinaria-n-11266-2004-dispoe-sobre-a-adequacao-do-plano-diretor-de-curitiba-ao-estatuto-da-cidade-lei-federal-n-10257-01-para-orientacao-e-controle-do-desenvolvimento-integrado-do-municipio-2004-12-16.html>>. Acesso em 04 de fevereiro de 2013.

- CURITIBA. Proposta Preliminar do Plano de Mobilidade Urbana e Transporte Integrado (2008). Disponível em <http://www.ippuc.org.br/visualizar.php?doc=http://admsite.ippuc.org.br/arquivos/documentos/D35/D35_033_BR.pdf>. Acesso em 05 de junho de 2013.
- DABLANC, L. **Entre police et servisse: L'action publique sur le transport de marchandises em ville. Le cas des métropoles de Paris et New York**. 1997. 450p. Tese (Doutorado) - Ecole nationale des ponts et chaussées, Marne-la-Vallée, França, 1997
- DABLANC, L. **Freight transport for development toolkit – urban transport**. Washington: The International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank, 2009.
- DANTZIG, G.B.; RAMSER, J.H. The truck dispatching problem. **Management Science**, v.6, issue 1, p. 80-91, 1959.
- DASKIN, M. S. **Networks and discrete location: Models, algorithms and applications**. New York: Wiley 1995.
- DERBEL, H.; JARBOUI, B.; HANAFI, S.; CHABCHOUB, H. Genetic algorithm with iterated local search for solving a location-routing problem. **Expert Systems with Applications**, v.39, issue 3, p. 2865–2871, 2012.
- DERBEL, H.; JARBOUI, B.; HANAFI, S.; CHABCHOUB, H. An Iterated Local Search for Solving A Location-Routing Problem. **Electronic Notes in Discrete Mathematics**, v.36, p. 875-882, 2010.
- DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Mapa multimodal do Paraná**, 2013. Disponível em <<http://www.dnit.gov.br/mapas-multimodais/mapas-multimodais/mapas-multimodais/mapas-multimodais/pr.pdf>>. Acesso em: 08/05/2013.
- DREXL, M. E SCHNEIDER, M. **A Survey of Location-Routing Problems**, 2013. Disponível em: <<http://logistik.bwl.uni-mainz.de/Dateien/LM-2013-03.pdf>>. Acesso em: 21/03/2014.
- DUHAMEL, C.; LACOMME, P.; PRINS, C.; PRODHON, C. A GRASP x ELS approach for the capacitated location-routing problem. **Computers & Operations Research**, v.37, issue 11, p. 1912-1923, 2010.
- DUTRA, N. G. S. **O Enfoque de “City Logistics” na Distribuição Urbana de Encomendas**. 2004. 212p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.
- EGGER, D. E RUESCH, M. Best Urban Freight Solutions, Best Practice Handbook Year 3 (2002), European Community, 2002
- ESCOBAR, J. W.; LINFATI, R.; TOTH, P. A two-phase hybrid heuristic algorithm for the capacitated location-routing problem. **Computers & Operations Research**, v.40, issue 1, p. 70-79, 2013.
- GuiaTRC. Guia do Transportador Rodoviário de Cargas. Central de custos e preços (2014). Disponível em <www.guiadotrc.com.br/truckinfo/caminhao_leve.xls>. Acesso em: 08/05/2014.
- HEMMELMAYR, V. C.; CORDEAU, J. F.; CRAINIC, T. G. An adaptive large neighborhood search heuristic for two-echelon vehicle routing problems arising in City Logistics. **Computers & Operations Research**, v.39, issue 12, p. 3215-3228, 2012.
- HENRIOT, F.; ROUTHIER, J. L. Scenarios of commercial zoning to reduce impacts of freight movement in the city. In: **PROCEEDINGS OF THE 12TH WORLD CONFERENCE ON TRANSPORT RESEARCH - WCTR**, July 11-15, 2010. Lisboa, Portugal.
- HOLGUIN-VERAS, J.; LIST, G. F.; MEYBURG, A. H.; OZBAY, K.; PAASWELL, R. E.; TENG, H. E YAHALOM, S. **An Assessment of methodological alternatives for a regional freight model in the NYMTC Region**. New York: Region II University Transportation Research Center, 2001.
- HOLGUIN-VERAS, J.; OZBAY, Z.; KORNHAUSER, A.; SHORRIS, A. E UKKUSURI, S. **Integrative freight demand management in the New York City Metropolitan Area**. New York, 2010.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Classificação Nacional de Atividades Econômicas Versão 2.0**. Rio de Janeiro, 2007. Disponível em <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/classificacoes/cnae2.0/cnae2.0.pdf>>. Acesso em: 31/03/2014.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Dados do Censo Demográfico**. 2013 Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/popul/default.asp?t=3&z=t&o=25&u1=1&u2=1&u3=1&u4=1&u5=1&u6=1>>. Acesso em 10 de março de 2013.
- IBGE.. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Contas Nacionais número 39. Produto Interno Bruto dos Municípios. 2010**. Disponível em: <ftp://ftp.ibge.gov.br/Pib_Municipios/2010/pibmunic2010.pdf>. Acesso em 10 de março de 2013.
- IPPUC. Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba. **Bases georreferenciadas em shape**. (2014b) Disponível em: <<http://ippuc.org.br/geodownloads/geo.htm>>. Acesso em 31/03/2014.
- IPPUC. Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba. **Curitiba em dados**. Tabelas de atividades econômicas (estabelecimentos) liberadas pela prefeitura em 2010. (2014a). Disponível em:

- <http://curitibaemdados.ippuc.org.br/Curitiba_em_dados_Pesquisa.htm>. Acesso em: 31/03/2014.
- JABAL-AMELI, M.; ARYANEZHAD, M.; GHAFARI-NASAB, N. A variable neighborhood descent based heuristic to solve the capacitated location-routing problem. **International Journal of Industrial Engineering Computations**, v.2, issue 1, p. 141-154, 2011.
- JARBOUI, B.; DERBEL, H.; HANAFI, S.; MLADENOVIC, N. Variable neighborhood search for location routing, **Computers & Operations Research**, v.40, issue 1, p. 47-57, 2013.
- JOKAR, A.; SAHRAEIAN, R. A Heuristic Based Approach to Solve a Capacitated Location-routing Problem. **Journal of Management and Sustainability**, v.2, issue 2, p. 219-226, 2012.
- KOSKOSIDIS, Y. A.; POWELL, W. B. Clustering algorithms for consolidation of customer orders into vehicle shipments. **Transportation Research Part B**, v.26B, issue 5, p.365-379, 1992.
- KUEHN, A. A., HAMBURGER, M. J. A heuristic program for locating warehouses. **Management Science**, v.9, issue 4, p. 643-666, 1963.
- LIN, S. W.; YU, V. F.; LEE, W.; TING, C. J. Solving the Location Routing Problem Based on a Simulated Annealing Heuristic. In: **POMS 20TH ANNUAL CONFERENCE**, 2009. Orlando, Florida U.S.A.
- LOPES, R. B.; BARRETO, S.; FERREIRA, C.; SANTOS, B. S. A decision-support tool for a capacitated location-routing problem. **Decision Support Systems**, v.46, issue 1, p. 366-375, 2008.
- MARTÍNEZ-SALAZAR, I. A.; MOLINA, J.; ÁNGEL-BELLO, F.; CABALLERO, T. G. R. Solving a bi-objective transportation location routing problem by metaheuristic algorithms. **European Journal of Operational Research**, v.234, Issue 1, p. 25-36, 2014.
- MASON, A. J.; DUNNING, I. OpenSolver: Open source optimization for Excel. In: **PROCEEDINGS OF THE 45TH ANNUAL CONFERENCE OF THE ORSNZ**, 2010. Auckland, Nova Zelândia.
- MUÑUZURI, J.; CORTÉS, P.; GUADIX, J.; ONIEVA, L. City logistics in Spain: Why it might never work. **Cities**, v. 29, issue 2, p. 133-141, 2011.
- NAGY, G.; SALHI, S. Location-routing: Issues, models and methods. **European Journal of Operational Research**, v.177, issue 2, p. 649-672, 2007.
- OLIVEIRA, L. K. **Modelagem para Avaliar a Viabilidade da Implantação de um Sistema de Distribuição de Pequenas Encomendas dentro dos Conceitos de City Logistics**. 2007. 142p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.
- OLIVEIRA, L. K.; BRAGA, A. S.; ALVES, B. R. Relevant attributes in overnight goods delivery: Researchers', transporters' and retailers' preference in urban distribution. In: **12TH WORLD CONFERENCE ON TRANSPORT RESEARCH – WCTR**, 2010. Lisboa, Portugal.
- OLIVEIRA, L. K.; DIAS, E. G.; HOFFMAND, D. Diagnóstico do uso das vagas de carga e descarga e identificação dos principais fluxos logísticos na Região Central de Belo Horizonte – Relatório final. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.
- OLIVEIRA, L. K.; NUNES, N. T. R.; NOVAES, A. G. N. Assessing model for adoption of new logistical services: An application for small order of goods distribution in Brazil. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 2, issue 3, p. 6286-6296, 2010.
- PELIZARO, C. **Avaliação de desempenho do algoritmo de um programa comercial para roteirização de veículos**. 2000. 156p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.
- PIRKWIESER, S.; RAIDL, G. R. Variable Neighborhood Search Coupled with ILP-Based Very Large Neighborhood Searches for the (Periodic) Location-Routing Problem. In: BLES, M. J.; BLUM, C.; RAIDL, G.; ROLI, A.; SAMPELS, M. (Eds.), **Hybrid Metaheuristics**, Lecture Notes in Computer Science 6373, Springer Berlin Heidelberg, 2010, p. 174-189.
- PRATA, B. A.; ARRUDA, J. B. F. Avaliação do transporte de cargas na cidade de Fortaleza sob o enfoque da logística urbana: Diagnóstico e proposição de intervenções. In: **XXI CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES – ANPET**, 2007. Rio de Janeiro.
- PRINS, C.; LACOMME, P.; PRODHON, C. Order-first split-second method for vehicle routing problems: a review. **Transportation Research Part C**, v.40, p.179-200, 2014.
- PRINS, C.; PRODHON, C.; RUIZ, A.; SORIANO, P.; WOLFLER-CALVO, R. Solving the capacitated location-routing problem by a cooperative Lagrangean relaxation-granular tabu search heuristic. **Transportation Science**, v.41, issue 4, p. 470-483, 2007.
- PRINS, C.; PRODHON, C.; WOLFLER-CALVO, R. Solving the capacitated location-routing problem by a GRASP complemented by a learning process and a path relinking, **4OR: A Quarterly Journal of Operations Research**, v.4, issue 3, p 221-238, 2006.
- PRODHON, C. **Le Problème de Localisation-Routage**. 2006. 186p. Tese (Doutorado) - Université de

- Technologie de Troyes, Troyes, França, 2006.
- PRODHON, C.; PRINS, C.; A survey of recent research on location-routing problems. **European Journal of Operational Research**, v.238, Issue 1, p. 1-17, 2014, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2014.01.005>.
- Quak, H. **Sustainability of urban freight transport: Retail distribution and local regulations in cities**. Erasmus Research Institute of Management (ERIM), Erasmus School of Economics, Erasmus University Rotterdam, 2008.
- RAIS (2010) **Relação Anual de Informações Sociais**. Ministério do Trabalho. Brasília, DF.
- RENAN, A. C.; GARRIDO, R. A. **Modeling freight demand and shipper behavior: State of the art, directions for the future. 2002**. Disponível em <<http://www.its.uci.edu/its/publications/papers/CLIFS/UCI-ITS-LI-WP-02-2.pdf>>. Acesso em 26 de junho de 2013.
- RUSSO, F.; COMI, A. A classification of city logistics measures and connected impacts. **Procedia Social and Behavioral Sciences**, v. 2, issue 3, p. 6355–6365, 2010.
- RUSSO, F.; COMI, A. City sustainability and urban freight transport: environmental evidences from the cities. In **PROCEEDINGS OF THE 4TH NATIONAL URBAN FREIGHT CONFERENCE (NUF)**, p. 10-14, 2011, Long Beach, CA, USA.
- SALHI, S.; NAGY, G. Consistency and robustness in location-routing. **Studies in Locational Analysis**, v.13, p. 3-19, 1999.
- SALHI, S.; RAND, G.K. The effect of ignoring routes when locating depots. **European Journal of Operational Research**, v.39, issue 2, p. 150-156, 1989.
- SANCHES JUNIOR, P. F. **Logística de carga urbana: uma análise da realidade brasileira**. 2008. 238p. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.
- SÃO PAULO, Decreto nº 37.185, de 20 de novembro de 1997. Dispõe sobre o trânsito de caminhões nas vias do Município de São Paulo e nas Zonas de Máxima Restrição de Circulação - ZMRC, e dá outras providências.
- SÃO PAULO, Decreto nº 48.338, de 10 de maio de 2007. Estabelece normas para o trânsito de caminhões e para operações de carga e descarga em estabelecimentos situados no Município de São Paulo.
- SOGARIS. 2015. Disponível em <http://www.sogaris.fr/en/pfl_marseille.php>. Acesso em 10 de janeiro de 2015.
- SOLOMON, M. Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. **Operations Research**, v.35, issue 2, p. 254-265, 1987.
- SRIVASTAVA, R. Alternate solution procedures for the location-routing problem. **Omega**, v.21, issue 4, p. 497–506, 1993.
- SUGAR. **City Logistics Best Practices: a Handbook for Authorities**. Sustainable Urban Goods Logistics Achieved by Regional and Local Policies – SUGAR. Bologna, Itália, 2011.
- TANIGUCHI, E. Concept and best practices of city logistics. In: INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM, 2012. Leipzig, Alemanha.
- THOMPSON, R. G.; TANIGUCHI, E. Modelling City Logistics. In: BREWER, A. M.; BUTTON, K. J.; HENSHER, D. A. (eds.) **Handbook of Logistics and Supply Chain Management, Volume 2**. Emerald, Inc, 2008.
- TING, C.J.; CHEN, C. H. A multiple ant colony optimization algorithm for the capacitated location routing problem. **International Journal of Production Economics**, v.141, issue 1, p. 34-44, 2013.
- TUZUN, D.; BURKE, L. A Two-Phase Tabu Search Approach to the Location Routing Problem. **European Journal of Operational Research**, v.116, issue 1, p. 87-99, 1999.
- YOSHIZAKI, H.; MONTIBELLER, G. A framework for locating logistics facilities with optimization and multi-criteria value analysis. In: TAKAHASHI, R.H.C.; DEB, K.; WANNER, E.F.; GRECO, S. (eds.). **Evolutionary Multi-Criterion Optimization**. v. 6576, 2011. p 505-519.
- YU, V. F.; LIN, S. W.; LEE, W.; TING, C. J. A simulated annealing heuristic for the capacitated location routing problem. **Computers & Industrial Engineering**, v.58, issue 2, p. 288-299, 2010.

APÊNDICE A DADOS PARA ESTIMATIVA DA DEMANDA DOS ESTABELECIMENTOS DE CURITIBA

Este apêndice apresenta a tabela com os dados para estimativa da demanda, cujo uma parte foi apresentada no corpo principal da dissertação na Tabela 5.14.

Para melhor visualização, foram adotadas as seguintes abreviações para os tipos de mercadorias consideradas:

- Alim: alimentos;
- Beb: bebidas;
- Vest: vestuário, calçados e têxteis;
- Const: construção;
- Limp: limpeza;
- Tint: tintas e vernizes;
- Farm: farmacêuticos;
- Máq: máquinas e veículos;
- Eletr: eletrodomésticos e eletrônicos;
- Outr: outros tipos.

Tabela A.1 – Estimativa de demanda, número médio de funcionários e participação de tipo de produto movimentado por tipo de estabelecimento considerado no estudo de caso

Código CNAE	Descrição	Demanda (kg/func. semana)	Número médio de empregos	Classificação ¹	Tipo de produto movimentado (%)										
					Alim.	Beb.	Vest.	Const.	Limp.	Tint.	Farm.	Maq.	Eletr.	Outr.	Total
4631100	Comércio atacadista de leite e laticínios	1560	1,75	hipermercado	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
4632001	Comércio atacadista de cereais e leguminosas beneficiados	1560	0,95	hipermercado	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
4632002	Comércio atacadista de farinhas, amidos e féculas	1560	0,95	hipermercado	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
4632003	Comércio atacadista de cereais e leguminosas beneficiados, farinhas, amidos e féculas, com atividade de fracionamento e acondicionamento associada	1560	0,95	hipermercado	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
4633801	Comércio atacadista de frutas, verduras, raízes, tubérculos, hortaliças e legumes frescos	1560	4,43	hipermercado	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
4633802	Comércio atacadista de aves vivas e ovos	1560	4,43	hipermercado	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
4633803	Comércio atacadista de coelhos e outros pequenos animais vivos para alimentação	1560	4,43	hipermercado	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
4634601	Comércio atacadista de carnes bovinas e suínas e derivados	1560	6,54	hipermercado	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
4634602	Comércio atacadista de aves abatidas e derivados	1560	6,54	hipermercado	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
4634603	Comércio atacadista de pescados e frutos do mar	1560	6,54	hipermercado	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
4635401	Comércio atacadista de água mineral	1560	6,32	hipermercado	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
4635402	Comércio atacadista de cerveja, chope e refrigerante	1560	6,32	hipermercado	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
4635403	Comércio atacadista de bebidas com atividade de fracionamento e acondicionamento associada	1560	6,32	hipermercado	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
4635499	Comércio atacadista de bebidas não especificadas anteriormente	1560	6,32	hipermercado	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
4636202	Comércio atacadista de cigarros, cigarrilhas e charutos	1560	5,30	hipermercado	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	100%
4637101	Comércio atacadista de café torrado, moído e solúvel	1560	1,55	hipermercado	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
4637103	Comércio atacadista de óleos e gorduras	1560	1,55	hipermercado	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
4637104	Comércio atacadista de pães, bolos, biscoitos e similares	1560	1,55	hipermercado	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
4637105	Comércio atacadista de massas alimentícias	1560	1,55	hipermercado	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
4637106	Comércio atacadista de sorvetes	1560	1,55	hipermercado	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
4637107	Comércio atacadista de chocolates, confeitos, balas, bombons e semelhantes	1560	1,55	hipermercado	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
4637199	Comércio atacadista especializado em outros produtos alimentícios não especificados anteriormente	1560	1,55	hipermercado	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	100%
4639701	Comércio atacadista de produtos alimentícios em geral	1560	14,98	hipermercado	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
4639702	Comércio atacadista de produtos alimentícios em geral, com atividade de fracionamento e acondicionamento associada	1560	14,98	hipermercado	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
4641901	Comércio atacadista de tecidos	1560	7,45	hipermercado	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	100%
4641902	Comércio atacadista de artigos de cama, mesa e banho	1560	7,45	hipermercado	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
4641903	Comércio atacadista de artigos de armarinho	1560	7,45	hipermercado	0%	0%	80%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	20%	100%
4642701	Comércio atacadista de artigos do vestuário e acessórios, exceto profissionais e de segurança	1560	1,70	hipermercado	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
4642702	Comércio atacadista de roupas e acessórios para uso profissional e de segurança do trabalho	1560	1,70	hipermercado	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
4643501	Comércio atacadista de calçados	1560	1,36	hipermercado	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
4643502	Comércio atacadista de bolsas, malas e artigos de viagem	1560	1,36	hipermercado	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
4644301	Comércio atacadista de medicamentos e drogas de uso humano	1560	26,46	hipermercado	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	100%

136

Código CNAE	Descrição	Demanda (kg/func. semana)	Número médio de empregos	Classificação ¹	Tipo de produto movimentado (%)										
					Alim.	Beb.	Vest.	Const.	Limp.	Tint.	Farm.	Maq.	Eletr.	Outr.	Total
4646002	Comércio atacadista de produtos de higiene pessoal	1560	5,53	hipermercado	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	100%
4647801	Comércio atacadista de artigos de escritório e de papelaria	1560	4,57	hipermercado	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	100%
4647802	Comércio atacadista de livros, jornais e outras publicações	1560	4,57	hipermercado	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	100%
4649401	Comércio atacadista de equipamentos elétricos de uso pessoal e doméstico	1560	2,24	hipermercado	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	100%
4649402	Comércio atacadista de aparelhos eletrônicos de uso pessoal e doméstico	1560	2,24	hipermercado	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	100%
4649403	Comércio atacadista de bicicletas, triciclos e outros veículos recreativos	1560	2,24	hipermercado	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	100%
4649404	Comércio atacadista de móveis e artigos de colchoaria	1560	2,24	hipermercado	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	100%
4649405	Comércio atacadista de artigos de tapeçaria; persianas e cortinas	1560	2,24	hipermercado	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	100%
4649406	Comércio atacadista de lustres, luminárias e abajures	1560	2,24	hipermercado	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	100%
4649407	Comércio atacadista de filmes, CDs, DVDs, fitas e discos	1560	2,24	hipermercado	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	100%
4649408	Comércio atacadista de produtos de higiene, limpeza e conservação domiciliar	1560	2,24	hipermercado	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
4649408	Comércio atacadista de produtos de higiene, limpeza e conservação domiciliar	1560	2,24	hipermercado	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
4649409	Comércio atacadista de produtos de higiene, limpeza e conservação domiciliar, com atividade de fracionamento e acondicionamento associada	1560	2,24	hipermercado	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
4649410	Comércio atacadista de jóias, relógios e bijuterias, inclusive pedras preciosas e semipreciosas lapidadas	1560	2,24	hipermercado	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	100%
4649499	Comércio atacadista de outros equipamentos e artigos de uso pessoal e doméstico não especificados anteriormente	1560	2,24	hipermercado	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	100%
4651601	Comércio atacadista de equipamentos de informática	1560	3,84	hipermercado	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	100%
4651602	Comércio atacadista de suprimentos para informática	1560	3,84	hipermercado	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	100%
4652400	Comércio atacadista de componentes eletrônicos e equipamentos de telefonia e comunicação	1560	5,46	hipermercado	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	100%
4671100	Comércio atacadista de madeira e produtos derivados	1560	1,80	hipermercado	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	100%
4672900	Comércio atacadista de ferragens e ferramentas	1560	2,39	hipermercado	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
4673700	Comércio atacadista de material elétrico	1560	5,23	hipermercado	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
4674500	Comércio atacadista de cimento	1560	-	hipermercado	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
4679601	Comércio atacadista de tintas, vernizes e similares	1560	3,14	hipermercado	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	100%
4679602	Comércio atacadista de mármore e granitos	1560	3,14	hipermercado	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
4679603	Comércio atacadista de vidros, espelhos e vitrais	1560	3,14	hipermercado	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
4679604	Comércio atacadista especializado de materiais de construção não especificados anteriormente	1560	3,14	hipermercado	0%	0%	0%	90%	0%	0%	0%	0%	0%	10%	100%
4679604	Comércio atacadista especializado de materiais de construção não especificados anteriormente	1560	3,14	hipermercado	0%	0%	0%	90%	0%	0%	0%	0%	0%	10%	100%
4679699	Comércio atacadista de materiais de construção em geral	1560	3,14	hipermercado	0%	0%	0%	70%	0%	10%	0%	0%	0%	20%	100%
4681801	Comércio atacadista de álcool carburante, biodiesel, gasolina e demais derivados de petróleo, exceto lubrificantes, não realizado por transportador retalhista (TRR)	1560	4,08	hipermercado	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	100%
4681802	Comércio atacadista de combustíveis realizado por transportador retalhista (TRR)	1560	4,08	hipermercado	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	100%
4681803	Comércio atacadista de combustíveis de origem vegetal, exceto álcool carburante	1560	4,08	hipermercado	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	100%

[illegible]

140

Código CNAE	Descrição	Demanda (kg/func. semana)	Número médio de empregos	Classificação ¹	Tipo de produto movimentado (%)										
					Alim.	Beb.	Vest.	Const.	Limp.	Tint.	Farm.	Maq.	Eletr.	Outr.	Total
4789099	Comércio varejista de outros produtos não especificados anteriormente	115	2,08	outros	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	100%
4789099	Comércio varejista de outros produtos não especificados anteriormente	115	2,08	outros	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	100%
4789099	Comércio varejista de outros produtos não especificados anteriormente	115	2,08	outros	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	100%
4789099	Comércio varejista de outros produtos não especificados anteriormente	115	2,08	outros	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	100%
4789099	Comércio varejista de outros produtos não especificados anteriormente	115	2,08	outros	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	100%
4789099	Comércio varejista de outros produtos não especificados anteriormente	115	2,08	outros	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	100%
4789099	Comércio varejista de outros produtos não especificados anteriormente	115	2,08	outros	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	100%
4789099	Comércio varejista de outros produtos não especificados anteriormente	115	2,08	outros	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	100%
4789099	Comércio varejista de outros produtos não especificados anteriormente	115	2,08	outros	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	100%
4789099	Comércio varejista de outros produtos não especificados anteriormente	115	2,08	outros	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	100%
5510801	Hotéis	64	9,08	cafês, hotéis, restaurantes	70%	10%	0%	0%	10%	0%	0%	0%	0%	10%	100%
5510801	Hotéis	64	9,08	cafês, hotéis, restaurantes	70%	10%	0%	0%	10%	0%	0%	0%	0%	10%	100%
5510802	Apart-hotéis	64	9,08	cafês, hotéis, restaurantes	70%	10%	0%	0%	10%	0%	0%	0%	0%	10%	100%
5510803	Motéis	64	9,08	cafês, hotéis, restaurantes	70%	10%	0%	0%	10%	0%	0%	0%	0%	10%	100%
5590601	Albergues, exceto assistenciais	64	1,06	cafês, hotéis, restaurantes	70%	10%	0%	0%	10%	0%	0%	0%	0%	10%	100%
5590603	Pensões (alojamento)	64	1,06	cafês, hotéis, restaurantes	70%	10%	0%	0%	10%	0%	0%	0%	0%	10%	100%
5611201	Restaurantes e similares	64	2,24	cafês, hotéis, restaurantes	80%	10%	0%	0%	5%	0%	0%	0%	0%	5%	100%
5611201	Restaurantes e similares	64	2,24	cafês, hotéis, restaurantes	80%	10%	0%	0%	5%	0%	0%	0%	0%	5%	100%
5611201	Restaurantes e similares	64	2,24	cafês, hotéis, restaurantes	80%	10%	0%	0%	5%	0%	0%	0%	0%	5%	100%
5611202	Bares e outros estabelecimentos especializados em servir bebidas	64	2,24	cafês, hotéis, restaurantes	75%	15%	0%	0%	5%	0%	0%	0%	0%	5%	100%
5611203	Lanchonetes, casas de chá, de sucos e similares	64	2,24	cafês, hotéis, restaurantes	80%	10%	0%	0%	5%	0%	0%	0%	0%	5%	100%
5611203	Lanchonetes, casas de chá, de sucos e similares	64	2,24	cafês, hotéis, restaurantes	80%	10%	0%	0%	5%	0%	0%	0%	0%	5%	100%
5620101	Fornecimento de alimentos preparados preponderantemente para empresas	64	6,96	cafês, hotéis, restaurantes	80%	10%	0%	0%	5%	0%	0%	0%	0%	5%	100%
5620101	Fornecimento de alimentos preparados preponderantemente para empresas	64	6,96	cafês, hotéis, restaurantes	80%	10%	0%	0%	5%	0%	0%	0%	0%	5%	100%
5620101	Fornecimento de alimentos preparados preponderantemente para empresas	64	6,96	cafês, hotéis, restaurantes	80%	10%	0%	0%	5%	0%	0%	0%	0%	5%	100%
5620102	Serviços de alimentação para eventos e recepções - bufê	64	6,96	cafês, hotéis, restaurantes	75%	15%	0%	0%	5%	0%	0%	0%	0%	5%	100%
5620103	Cantinas - serviços de alimentação privativos	64	6,96	cafês, hotéis, restaurantes	80%	10%	0%	0%	5%	0%	0%	0%	0%	5%	100%
5620104	Fornecimento de alimentos preparados preponderantemente para consumo domiciliar	64	6,96	cafês, hotéis, restaurantes	80%	10%	0%	0%	5%	0%	0%	0%	0%	5%	100%
5620104	Fornecimento de alimentos preparados preponderantemente para consumo domiciliar	64	6,96	cafês, hotéis, restaurantes	80%	10%	0%	0%	5%	0%	0%	0%	0%	5%	100%
5620104	Fornecimento de alimentos preparados preponderantemente para consumo domiciliar	64	6,96	cafês, hotéis, restaurantes	80%	10%	0%	0%	5%	0%	0%	0%	0%	5%	100%

Fonte: Próprio autor

(1) Baseado em Henriot e Routhier, 2010

Nota: Alim: alimentos; Beb: bebidas; Vest: vestuário, calçados e têxteis; Const: construção; Limp: limpeza; Tint: tintas e vernizes; Farm: farmacêuticos; Máq: máquinas e veículos; Eletr: eletrodomésticos e eletrônicos; Outr: outros tipos.

APÊNDICE B RESULTADOS OBTIDOS NA FASE DE *CLUSTERING*

Este apêndice apresenta os resultados obtidos na fase de *clustering* para todos os cenários e iterações simuladas, indicando as seguintes informações:

- Quantidade de *clusters*;
- Quantidade de pontos de demanda;
- Demanda total (em kg);
- Custo total (em km);
- Tamanho do maior *cluster* (em kg);
- Tamanho do menor *cluster* (em kg);
- Tamanho médio dos *clusters* (em kg);
- Desvio;
- Máximo número de iterações;
- Número de iterações simuladas;
- Tempo computacional;
- Computador utilizado.

Cenário com 30% de demanda e 60% de adesão do mercado

- 315 *clusters*
- 37.606 pontos de demanda
- Demanda total 1.570.383 kg

Tabela B.1 – Resumo dos resultados para o cenário com 30% de demanda e 60% de adesão do mercado

# Rodada	1	2	3
Custo total (km)	101.442	62.028	52.717
Maior <i>cluster</i> (kg)	4.999,9	5.000,0	5.000,0
Menor <i>cluster</i> (kg)	4.957,8	4.237,7	4.242,0
Tamanho médio dos <i>clusters</i> (kg)	4.985,3	4.985,3	4.985,3
Desvio	-0.55% a 0.29%	-15.00% a 0.29%	-14.91% a 0.29%
Máximo número de iterações	1	10	100
Número de iterações simuladas	1	10	100
Tempo computacional	0:00:33	0:31:06	5:01:59
Computador	CON072	CON072	CON072

Fonte: Próprio autor

Figura B.1 – Variação do custo em função das iterações para o cenário com 30% de demanda e 60% de adesão do mercado

Fonte: Próprio autor

Cenário com 30% de demanda e 82% de adesão do mercado

- 436 *clusters*
- 51.408 pontos de demanda
- Demanda total 2.174.741 kg

Tabela B.2 – Resumo dos resultados para o cenário com 30% de demanda e 82% de adesão do mercado

# Rodada	1	2	3
Custo total (km)	165.771	75.249	63.637
Maior <i>cluster</i> (kg)	5.000,0	5.000,0	5.000,0
Menor <i>cluster</i> (kg)	4.942,2	4.241,7	4.243,2
Tamanho médio dos <i>clusters</i> (kg)	4.987,9	4.987,9	4.987,9
Desvio	-0.92% a 0.24%	-14.96% a 0.24%	-14.93% a 0.24%
Máximo número de iterações	1	10	100
Número de iterações simuladas	1	10	100
Tempo computacional	0:01:00	0:38:11	6:26:52
Computador	CON072	CON072	CON072

Fonte: Próprio autor

Figura B.2 – Variação do custo em função das iterações para o cenário com 30% de demanda e 82% de adesão do mercado

Fonte: Próprio autor

Cenário com 30% de demanda e 100% de adesão do mercado

- 530 *clusters*
- 62.743 pontos de demanda
- Demanda total 2.645.559 kg

Tabela B.3 – Resumo dos resultados para o cenário com 30% de demanda e 100% de adesão do mercado

# Rodada	1	2	3
Custo total (km)	136.033	86.116	77.218
Maior <i>cluster</i> (kg)	5.000,0	5.000,0	5.000,0
Menor <i>cluster</i> (kg)	4.956,5	4.243,3	4.247,2
Tamanho médio dos <i>clusters</i> (kg)	4.991,6	4.991,6	4.991,6
Desvio	-0.70% a 0.17%	-14.99% a 0.17%	-14.91% a 0.17%
Máximo número de iterações	1	10	100
Número de iterações simuladas	1	10	100
Tempo computacional	0:01:29	0:42:06	4:07:07
Computador	CON072	CON072	SVR-016

Fonte: Próprio autor

Figura B.3 – Variação do custo em função das iterações para o cenário com 30% de demanda e 100% de adesão do mercado

Fonte: Próprio autor

Cenário com 60% de demanda e 47% de adesão do mercado

- 403 *clusters*
- 29.355 pontos de demanda
- Demanda total 2.009.463 kg

Tabela B.4 – Resumo dos resultados para o cenário com 60% de demanda e 47% de adesão do mercado

# Rodada	1	2	3
Custo total (km)	71.159	39.745	33.890
Maior <i>cluster</i> (kg)	4.999,9	5.000,0	5.000,0
Menor <i>cluster</i> (kg)	4.968,6	4.239,4	4.238,5
Tamanho médio dos <i>clusters</i> (kg)	4.986,3	4.986,3	4.986,3
Desvio	-0.35% a 0.27%	-14.98% a 0.28%	-15.00% a 0.28%
Máximo número de iterações	1	10	100
Número de iterações simuladas	1	10	100
Tempo computacional	0:00:23	0:07:55	1:01:51
Computador	CON072	CON072	CON072

Fonte: Próprio autor

Figura B.4 – Variação do custo em função das iterações para o cenário com 60% de demanda e 47% de adesão do mercado

Fonte: Próprio autor

Cenário com 60% de demanda e 60% de adesão do mercado

- 513 *clusters*
- 37.491 pontos de demanda
- Demanda total 2.559.500 kg

Tabela B.5 – Resumo dos resultados para o cenário com 60% de demanda e 60% de adesão do mercado

# Rodada	1	2	3
Custo total (km)	74.069	46.851	39.521
Maior <i>cluster</i> (kg)	5.000,0	5.000,0	5.000,0
Menor <i>cluster</i> (kg)	4.861,7	4.245,1	4.245,5
Tamanho médio dos <i>clusters</i> (kg)	4.989,3	4.989,3	4.989,3
Desvio	-2.56% a 0.21%	-14.92% a 0.21%	-14.91% a 0.21%
Máximo número de iterações	1	10	100
Número de iterações simuladas	1	10	100
Tempo computacional	0:00:30	0:31:56	5:09:09
Computador	CON072	CON072	CON072

Fonte: Próprio autor

Figura B.5 – Variação do custo em função das iterações para o cenário com 60% de demanda e 60% de adesão do mercado

Fonte: Próprio autor

Cenário com 60% de demanda e 82% de adesão do mercado

- 709 *clusters*
- 51.248 pontos de demanda
- Demanda total 3.540.766 kg

Tabela B.6 – Resumo dos resultados para o cenário com 60% de demanda e 82% de adesão do mercado

# Rodada	1	2	3
Custo total (km)	82.554	49.680	49.680
Maior <i>cluster</i> (kg)	5.000,0	5.000,0	5.000,0
Menor <i>cluster</i> (kg)	4.956,0	4.260,5	4.260,5
Tamanho médio dos <i>clusters</i> (kg)	4.994,0	4.994,0	4.994,0
Desvio	-0.76% a 0.12%	-14.69% a 0.12%	-14.69% a 0.12%
Máximo número de iterações	1	10	100
Número de iterações simuladas	1	10	100
Tempo computacional	0:01:00	0:36:05	2:48:19
Computador	CON072	CON072	SVR016

Fonte: Próprio autor

Figura B.6 – Variação do custo em função das iterações para o cenário com 60% de demanda e 82% de adesão do mercado

Fonte: Próprio autor

Cenário com 60% de demanda e 100% de adesão do mercado

- 862 *clusters*
- 62.548 pontos de demanda
- Demanda total 4.305.494 kg

Tabela B.7 – Resumo dos resultados para o cenário com 60% de demanda e 100% de adesão do mercado

# Rodada	1	2	3
Custo total (km)	139.580	68.320	58.513
Maior <i>cluster</i> (kg)	5.000,0	5.000,0	5.000,0
Menor <i>cluster</i> (kg)	4.942,5	4.245,6	4.246,7
Tamanho médio dos <i>clusters</i> (kg)	4.994,8	4.994,8	4.994,8
Desvio	-1.05% a 0.10%	-15.00% a 0.10%	-14.98% a 0.10%
Máximo número de iterações	1	10	100
Número de iterações simuladas	1	10	100
Tempo computacional	0:01:27	0:41:03	7:09:09
Computador	CON072	CON072	CON072

Fonte: Próprio autor

Figura B.7 – Variação do custo em função das iterações para o cenário com 60% de demanda e 100% de adesão do mercado

Fonte: Próprio autor

Cenário com 100% de demanda e 47% de adesão do mercado

- 671 *clusters*
- 29.355 pontos de demanda
- Demanda total 3.349.105 kg

Tabela B.8 – Resumo dos resultados para o cenário com 100% de demanda e 47% de adesão do mercado

# Rodada	1	2	3
Custo total (km)	59.707	30.688	28.814
Maior <i>cluster</i> (kg)	5.000,0	5.000,0	5.000,0
Menor <i>cluster</i> (kg)	4.955,6	4.293,5	4.248,0
Tamanho médio dos <i>clusters</i> (kg)	4.991,2	4.991,2	4.991,2
Desvio	-0.71% a 0.18%	-13.98% a 0.18%	-14.89% a 0.18%
Máximo número de iterações	1	10	100
Número de iterações simuladas	1	10	100
Tempo computacional	0:00:24	0:10:54	1:06:37
Computador	CON072	CON072	CON072

Fonte: Próprio autor

Figura B.8 – Variação do custo em função das iterações para o cenário com 100% de demanda e 47% de adesão do mercado

Fonte: Próprio autor

Cenário com 100% de demanda e 60% de adesão do mercado

- 854 *clusters*
- 37.491 pontos de demanda
- Demanda total 4.265.833 kg

Tabela B.9 – Resumo dos resultados para o cenário com 100% de demanda e 60% de adesão do mercado

# Rodada	1	2	3
Custo total (km)	80.544	38.636	36.522
Maior <i>cluster</i> (kg)	5.000,0	5.000,0	5.000,0
Menor <i>cluster</i> (kg)	4.975,4	4.972,0	4.326,0
Tamanho médio dos <i>clusters</i> (kg)	4.995,1	4.995,1	4.995,1
Desvio	-0.40% a 0.10%	-0.46% a 0.10%	-13.40% a 0.10%
Máximo número de iterações	1	10	100
Número de iterações simuladas	1	10	100
Tempo computacional	0:00:38	0:29:18	5:34:03
Computador	CON072	CON072	CON072

Fonte: Próprio autor

Figura B.9 – Variação do custo em função das iterações para o cenário com 100% de demanda e 60% de adesão do mercado

Fonte: Próprio autor

Cenário com 100% de demanda e 82% de adesão do mercado

- 1.181 *clusters*
- 51.248 pontos de demanda
- Demanda total 5.901.276 kg

Tabela B.10 – Resumo dos resultados para o cenário com 100% de demanda, 82% de adesão do mercado e 1181 *clusters*

# Rodada	1	2
Custo total (km)	93.977	93.952
Maior <i>cluster</i> (kg)	5.000,0	5.000,0
Menor <i>cluster</i> (kg)	4.989,4	4.906,8
Tamanho médio dos <i>clusters</i> (kg)	4.996,9	4.996,9
Desvio	-0.15% a 0.06%	-1.80% a 0.06%
Máximo número de iterações	1	10
Número de iterações simuladas	1	2
Tempo computacional	0:01:15	0:05:41
Computador	CON072	CON072

Fonte: Próprio autor

Figura B.10 – Variação do custo em função das iterações para o cenário com 100% de demanda, 82% de adesão do mercado e 1181 *clusters*

Fonte: Próprio autor

- 1.182 *clusters*
- 51.248 pontos de demanda
- Demanda total 5.901.276 kg

Tabela B.11 – Resumo dos resultados para o cenário com 100% de demanda, 82% de adesão do mercado e 1182 *clusters*

# Rodada	1	2	3
Custo total (km)	95.726	51.920	40.879
Maior <i>cluster</i> (kg)	5.000,0	5.000,0	5.000,0
Menor <i>cluster</i> (kg)	4.933,5	4.244,9	4.272,5
Tamanho médio dos <i>clusters</i> (kg)	4.992,6	4.992,6	4.992,6
Desvio	-1.18% a 0.15%	-14.98% a 0.15%	-14.42% a 0.15%
Máximo número de iterações	1	10	100
Número de iterações simuladas	1	10	100
Tempo computacional	0:01:34	0:40:03	3:32:43
Computador	CON072	CON072	SVR016

Fonte: Próprio autor

Figura B.11 – Variação do custo em função das iterações para o cenário com 100% de demanda, 82% de adesão do mercado e 1182 *clusters*

Fonte: Próprio autor

B.1 Comparação dos resultados com variação da quantidade de número de *clusters*

Neste item, será feita uma análise entre os resultados obtidos para dois cenários: (1) com 30% de demanda e 47% de adesão e (2) com 100% de demanda e 100% de adesão, onde foram simuladas alternativas variando o número de *clusters*: 246, 260, 300, 350 e 400.

Como o TransCAD não indica os resultados de iterações intermediárias, para essas alternativas foram simuladas situações com 1, 2, 3, 4, 5, 10 e 100 iterações para fazer a análise seguinte.

B.1.1 Cenário com 30% de demanda e 47% de adesão

- 29.444 pontos de demanda
- Demanda total 1.229.656 kg

Neste item é feita uma análise entre os resultados obtidos para o cenário com 30% de demanda e 47% de adesão, onde foram simuladas alternativas para o número de *clusters*: 246, 260, 300, 350 e 400.

Como já descrito anteriormente, o TransCAD não indica os resultados de iterações intermediárias e foram necessárias sete simulações (1, 2, 3, 4, 5, 10 e 100 iterações) para o levantamento dos dados necessários.

Custos

Para o caso com o mínimo número de *clusters* possível (246 *clusters*), pode-se notar que os custos por agrupamento foram muitos próximos para a 1ª e a 2ª iteração, entre a 3ª a 5ª iteração e também para a 10ª e 100ª iterações, como representado pelas três curvas da Figura B.12a. Ao decorrer das iterações, notou-se uma diminuição na quantidade de *clusters* com custos superiores a 250 km e um aumento da quantidade de *clusters* com custos inferiores a 25 km.

Já para o cenário com 400 *clusters*, devido a existência de maior possibilidade de trocas de clientes entre *clusters*, notou-se grande quantidade de *clusters* com custos abaixo de 25 km; com o decorrer das iterações o número de *clusters* com maiores custos também diminui, para a formação de agrupamentos com custos menores, como pode ser visto na Figura B.12b.

Figura B.12 – Variação da quantidade de *clusters* por faixa de custo ao decorrer das iterações para
 (a) Cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 246 *clusters*
 (b) Cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 400 *clusters*

Fonte: Próprio autor

Quantidade de elementos

No cenário com 246 *clusters*, a quantidade de elementos por agrupamento é bem variável, mostrando-se flutuante entre as iterações simuladas, sendo que para todos os limites de iterações há maior concentração de *clusters* com poucos elementos (<25 clientes) ou com bastante elementos (>200 clientes), como mostra a Figura B.13a.

Já no cenário com 400 *clusters*, nota-se que em todas iterações há bastante *clusters* com até 100 clientes, mostrando variação significativa apenas nessa quantidade de estabelecimentos na obtenção do menor custo entre as iterações, como indica a Figura B.13b.

Figura B.13 – Variação da quantidade de *clusters* por faixa de quantidade de elementos nos *clusters* ao decorrer das iterações para (a) Cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 246 *clusters*
 (b) Cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 400 *clusters*

Fonte: Próprio autor

Tamanho dos *clusters*

No cenário com 246 *clusters* não houve variação no número de ocorrências entre as classes apresentadas na Figura B.14a, pois por ser a quantidade mínima de agrupamentos necessários a ferramenta não possibilita muitas trocas de clientes entre os *clusters* no decorrer das iterações. Por este mesmo motivo, pode-se notar também que a maior parte dos *clusters* estão muito próximos de sua capacidade.

Já para o cenário com 400 *clusters*, há uma maior concentração de *clusters* próximos ao seu tamanho médio (3.074 kg), como pode ser visto na Figura B.14b. Ao longo das iterações, pode-se notar maior variação nos *clusters* de maiores tamanhos para trocas de clientes que possam diminuir o custo total deste modelo.

Figura B.14 – Variação da quantidade de *clusters* por faixa de tamanho dos *clusters* ao decorrer das iterações para (a) Cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 246 *clusters*
(b) Cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 400 *clusters*

Fonte: Próprio autor

Resultados gerais

Os resultados obtidos no *clustering* são indicados da Tabela B.12 a Tabela B.16 e Figura B.15 a Figura B.19. Pode-se notar que para todas as situações, apesar de não ter alcançado o custo mínimo possível, o modelo convergia para isso. Mesmo sem se conhecer o limite inferior do problema, observa-se que com 100 iterações o modelo já convergia mais lentamente tendendo ao seu mínimo.

Os custos totais tendem a diminuir com o aumento na quantidade de *clusters*, uma vez que há menos clientes por agrupamento e, conseqüentemente, menos ligações entre sementes e o restante dos pontos.

Tabela B.12 – Resumo dos resultados para o cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 246 *clusters*

# Rodada	1	2	3	4	5	6	7
Custo total (km)	83.130	82.990	54.768	54.766	54.766	49.246	45.514
Maior <i>cluster</i> (kg)	5.000,0	5.000,0	5.000,0	5.000,0	5.000,0	5.000,0	5.000,0
Menor <i>cluster</i> (kg)	4.995,2	4.877,8	4.995,1	4.898,6	4.898,6	4.994,4	4.894,3
Tamanho médio dos <i>clusters</i> (kg)	4.998,6	4.998,6	4.998,6	4.998,6	4.998,6	4.998,6	4.998,6
Desvio	-0,07% a 0,03%	-2,42% a 0,03%	-0,07% a 0,03%	-2,00% a 0,03%	-2,00% a 0,03%	-0,08% a 0,03%	-2,09% a 0,03%
Máximo número de iterações	1	2	3	4	5	10	100
Número de iterações simuladas	1	2	3	4	5	10	100
Tempo computacional	0:00:12	0:03:15	0:06:21	0:09:01	0:12:58	0:05:20	0:57:50
Computador	CON-072	CON-072	CON-072	CON-072	CON-072	CON-072	CON-072

Fonte: Próprio autor

Figura B.15 – Variação do custo em função das iterações para o cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 246 *clusters*

Fonte: Próprio autor

Tabela B.13 – Resumo dos resultados para o cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 260 *clusters*

# Rodada	1	2	3	4	5	6	7
Custo total (km)	61.005	38.741	29.033	22.266	20.279	18.488	15.575
Maior <i>cluster</i> (kg)	4.998,4	4.995,7	4.998,5	4.996,5	4.987,6	4.968,7	5.000,0
Menor <i>cluster</i> (kg)	3.545,7	4.019,7	4.020,0	1.679,5	4.590,0	4.339,4	3.703,0
Tamanho médio dos <i>clusters</i> (kg)	4.729,5	4.729,5	4.729,5	4.729,5	4.729,5	4.729,5	4.729,5
Desvio	-25,03% a 5,69%	-15,01% a 5,63%	-15,00% a 5,69%	-64,49% a 5,65%	-2,95% a 5,46%	-8,25% a 5,06%	-21,70% a 5,72%
Máximo número de iterações	1	2	3	4	5	10	100
Número de iterações simuladas	1	2	3	4	5	10	100
Tempo computacional	0:00:59	0:05:15	0:08:10	0:11:36	0:13:28	0:10:17	1:41:36
Computador	CON-072	CON-072	CON-072	CON-072	CON-072	SVR-016	SVR-016

Fonte: Próprio autor

Figura B.16 – Variação do custo em função das iterações para o cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 260 *clusters*

Fonte: Próprio autor

Tabela B.14 – Resumo dos resultados para o cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 300 *clusters*

# Rodada	1	2	3	4	5	6	7
Custo total (km)	40.047	22.534	18.318	15.225	14.603	13.736	12.989
Maior <i>cluster</i> (kg)	4.920,3	4.834,3	4.892,1	4.776,3	4.776,3	4.892,0	4.776,3
Menor <i>cluster</i> (kg)	2.137,4	2.687,7	3.196,4	2.921,9	1.263,9	1.851,2	1.902,4
Tamanho médio dos <i>clusters</i> (kg)	4.098,9	4.098,9	4.098,9	4.098,9	4.098,9	4.098,9	4.098,9
Desvio	-47,85% a 20,04%	-34,43% a 17,94%	-22,02% a 19,35%	-28,71% a 16,53%	-69,16% a 16,53%	-54,84% a 19,35%	-53,59% a 16,53%
Máximo número de iterações	1	2	3	4	5	10	100
Número de iterações simuladas	1	2	3	4	5	10	100
Tempo computacional	0:03:31	0:06:39	0:10:32	0:13:48	0:18:20	0:15:48	1:34:54
Computador	CON-072	CON-072	CON-072	CON-072	CON-072	SVR-016	SVR-016

Fonte: Próprio autor

Figura B.17 – Variação do custo em função das iterações para o cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 300 *clusters*

Fonte: Próprio autor

Tabela B.15 – Resumo dos resultados para o cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 350 *clusters*

# Rodada	1	2	3	4	5	6	7
Custo total (km)	31.147	17.890	15.545	13.282	12.845	12.188	11.429
Maior <i>cluster</i> (kg)	4.942,6	4.892,1	4.892,1	4.864,0	4.864,0	4.892,1	4.930,9
Menor <i>cluster</i> (kg)	1.605,6	1.228,1	565,6	602,7	602,7	602,7	561,1
Tamanho médio dos <i>clusters</i> (kg)	3.513,3	3.513,3	3.513,3	3.513,3	3.513,3	3.513,3	3.513,3
Desvio	-54.30% a 40.68%	-65.04% a 39.25%	-83.90% a 39.25%	-82.85% a 38.45%	-82.85% a 38.45%	-82.85% a 39.25%	-84.03% a 40.35%
Máximo número de iterações	1	2	3	4	5	10	100
Número de iterações simuladas	1	2	3	4	5	10	100
Tempo computacional	0:04:55	0:07:34	0:11:14	0:14:34	0:18:45	0:16:18	1:37:19
Computador	CON-072	CON-072	CON-072	CON-072	CON-072	SVR-016	SVR-016

Fonte: Próprio autor

Figura B.18 – Variação do custo em função das iterações para o cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 350 *clusters*

Fonte: Próprio autor

Tabela B.16 – Resumo dos resultados para o cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 400 *clusters*

# Rodada	1	2	3	4	5	6	7
Custo total (km)	24.488	15.911	13.617	12.535	11.839	11.078	10.226
Maior <i>cluster</i> (kg)	4.942,6	4.966,8	4.942,6	4.864,0	4.701,7	4.818,4	4.999,4
Menor <i>cluster</i> (kg)	1.009,1	872,3	1.000,6	1.140,8	648,1	1.020,8	670,1
Tamanho médio dos <i>clusters</i> (kg)	3.074,1	3.074,1	3.074,1	3.074,1	3.074,1	3.074,1	3.074,1
Desvio	-67.17% a 60.78%	-71.62% a 61.57%	-67.45% a 60.78%	-62.89% a 58.22%	-78.92% a 52.94%	-66.79% a 56.74%	-78.20% a 62.63%
Máximo número de iterações	1	2	3	4	5	10	100
Número de iterações simuladas	1	2	3	4	5	10	100
Tempo computacional	0:04:28	0:08:15	0:09:07	0:15:24	0:18:22	0:19:13	2:07:13
Computador	CON-072	CON-072	CON072	CON072	CON072	SVR-016	SVR-016

Fonte: Próprio autor

Figura B.19 – Variação do custo em função das iterações para o cenário com 30% de demanda, 47% de adesão do mercado e 400 *clusters*

Fonte: Próprio autor

B.1.2 Cenário com 100% de demanda e 100% de adesão

- 29.444 pontos de demanda
- Demanda total 1.229.656 kg

Custos

Ao contrário do cenário com 30% de demanda e 47% de adesão, onde para o caso com o mínimo de *clusters* possível ocorreu uma concentração de *clusters* com baixos custos (< 25 km) e de custos mais elevados (> 250km), este cenário indicou resultados em ambas as situações em que há uma maior quantidade de *clusters* com custos mais baixos, sendo que essa concentração ainda aumentou com o decorrer das iterações, como pode ser visto na Figura B.20.

Figura B.20 – Variação da quantidade de *clusters* por faixa de custo ao decorrer das iterações para
 (a) Cenário com 100% de demanda, 100% adesão do mercado e 1437 *clusters*
 (b) Cenário com 100% de demanda, 100% de adesão do mercado e 1700 *clusters*
 Fonte: Próprio autor

Quantidade de elementos

No cenário com 1437 *clusters*, há uma maior concentração de agrupamentos com menos de 20 pontos, sendo que esta quantidade passa a crescer com o decorrer das iterações, como mostra a Figura B.21^a.

Já no cenário com 1700 *clusters*, notou-se que alguns agrupamentos não possuíam nenhum elemento para algumas iterações (3ª, 5ª e 10ª), sendo que o caso em que isso mais ocorreu foi na 10ª iteração com 6 *clusters* vazios.

Figura B.21 – Variação da quantidade de *clusters* por faixa de quantidade de elementos nos *clusters* ao decorrer das iterações para (a) Cenário com 100% de demanda, 100% de adesão do mercado e 1437 *clusters* / (b) Cenário com 100% de demanda, 100% de adesão do mercado e 1700 *clusters*

Fonte: Próprio autor

Tamanho dos *clusters*

No cenário com 1437 *clusters*, como no cenário com 30% de demanda e 47% de adesão e 246 *clusters*, não houve variação no número de ocorrências entre as classes apresentadas na Figura B.22a, por ser a quantidade mínima de agrupamentos necessários para simular a ferramenta. Pelo mesmo motivo, pode-se verificar também que maior parte dos *clusters* estão muito próximos de sua capacidade.

Já para o cenário com 1.700 *clusters*, há uma maior concentração de *clusters* de tamanhos maiores, sendo que esse fato se intensifica com o decorrer das iterações, como indica a Figura B.22b.

Figura B.22 – Variação da quantidade de *clusters* por faixa de tamanho dos *clusters* ao decorrer das iterações para (a) Cenário com 100% de demanda, 100% de adesão do mercado e 1437 *clusters* (b) Cenário com 100% de demanda, 100% de adesão do mercado e 1700 *clusters*

Fonte: Próprio autor

Resultados gerais

Da Tabela B.17 a Tabela B.21 e Figura B.23 a Figura B.27 são indicados todos os resultados obtidos das simulações. Pode-se notar novamente que para todas as situações, apesar de não ter alcançado o custo mínimo possível, o modelo convergia para isso. Mesmo sem se conhecer o limite inferior do problema, observa-se que com 100 iterações o modelo já convergia mais lentamente tendendo ao seu mínimo., assim como foi visto para o cenário com 30% de demanda e 47% de adesão.

Tabela B.17 – Resumo dos resultados para o cenário com 100% de demanda, 100% de adesão do mercado e 1437 *clusters*

# Rodada	1	2	3	4	5	6	7
Custo total (km)	122.955	121.761	65.731	65.351	56.034	52.804	51.302
Maior <i>cluste</i> (kg) <i>r</i>	5.000,0	5.000,0	5.000,0	5.000,0	5.000,0	5.000,0	5.000,0
Menor <i>cluster</i> (kg)	4.947,0	4.252,6	4.963,1	4.247,3	4.618,4	4.251,0	4.258,8
Tamanho médio dos <i>clusters</i> (kg)	4.993,6	4.993,6	4.993,6	4.993,6	4.993,6	4.993,6	4.993,6
Desvio	-0.93% a 0.13%	-14.84% a 0.13%	-0.61% a 0.13%	-14.95% a 0.13%	-7.51% a 0.13%	-14.87% a 0.13%	-14.71% a 0.13%
Máximo número de iterações	1	2	3	4	5	10	100
Número de iterações simuladas	1	2	3	4	5	10	100
Tempo computacional	0:02:33	0:06:39	0:08:58	0:12:26	0:15:21	0:30:53	5:13:46
Computador	SVR-016	SVR-016	SVR-016	SVR-016	SVR-016	SVR-016	SVR-016

Fonte: Próprio autor

Figura B.23 – Variação do custo em função das iterações para o cenário com 100% de demanda, 100% de adesão do mercado e 1437 *clusters*

Fonte: Próprio autor

Tabela B.18 – Resumo dos resultados para o cenário com 100% de demanda, 100% de adesão do mercado e 1450 *clusters*

# Rodada	1	2	3	4	5	6	7
Custo total (km)	108.239	94.843	61.043	56.782	44.413	35.675	30.913
Maior <i>cluster</i> (kg)	5.000,0	5.000,0	5.000,0	5.000,0	5.000,0	5.000,0	5.000,0
Menor <i>cluster</i> (kg)	2.903,2	3.917,5	4.208,3	4.794,0	3.988,3	2.319,1	-
Tamanho médio dos <i>clusters</i> (kg)	4.948,8	4.948,8	4.948,8	4.948,8	4.948,8	4.948,8	4.948,8
Desvio	-41.34% a 1.03%	-20.84% a 1.03%	-14.96% a 1.03%	-3.13% a 1.03%	-19.41% a 1.03%	-53.14% a 1.03%	-100% a 1.03%
Máximo número de iterações	1	2	3	4	5	10	100
Número de iterações simuladas	1	2	3	4	5	10	100
Tempo computacional	0:04:23	0:09:38	0:14:26	0:20:35	0:25:05	0:54:59	8:44:54
Computador	SVR-016	SVR-016	SVR-016	SVR-016	SVR-016	SVR-016	SVR-016

Fonte: Próprio autor

Figura B.24 – Variação do custo em função das iterações para o cenário com 100% de demanda, 100% de adesão do mercado e 1450 *clusters*

Fonte: Próprio autor

Tabela B.19 – Resumo dos resultados para o cenário com 100% de demanda, 100% de adesão do mercado e 1500 *clusters*

# Rodada	1	2	3	4	5	6	7
Custo total (km)	112.248	49.814	33.265	25.675	20.970	18.426	17.113
Maior <i>cluster</i> (kg)	5.000,0	4.999,8	4.999,1	4.999,1	4.999,1	5.000,0	5.000,0
Menor <i>cluster</i> (kg)	1.496,5	1.021,4	3.261,8	3.398,5	2.612,0	2.775,3	3.790,3
Tamanho médio dos <i>clusters</i> (kg)	4.783,9	4.783,9	4.783,9	4.783,9	4.783,9	4.783,9	4.783,9
Desvio	-68.72% a 4.52%	-78.65% a 4.51%	-31.82% a 4.50%	-28.96% a 4.50%	-45.40% a 4.50%	-41.99% a 4.52%	-20.77% a 4.52%
Máximo número de iterações	1	2	3	4	5	10	100
Número de iterações simuladas	1	2	3	4	5	10	100
Tempo computacional	0:07:53	0:15:53	0:22:47	0:30:46	0:35:04	1:08:32	10:08:22
Computador	SVR-016	SVR-016	SVR-016	SVR-016	SVR-016	SVR-016	SVR-016

Fonte: Próprio autor

Figura B.25 – Variação do custo em função das iterações para o cenário com 100% de demanda, 100% de adesão do mercado e 1500 *clusters*

Fonte: Próprio autor

# Rodada	1	2	3	4	5	6	7
Desvio	-88.64% a 18.43%	-86.27% a 18.45%	-90.91% a 18.45%	-100% a 18.45%	-100% a 18.45%	-100% a 18.43%	-97.44% a 18.44%
Máximo número de iterações	1	2	3	4	5	10	100
Número de iterações simuladas	1	2	3	4	5	10	100
Tempo computacional	0:22:23	0:31:52	0:36:06	0:41:35	0:49:09	1:33:22	9:16:54
Computador	SVR-016	SVR-016	SVR-016	SVR-016	SVR-016	SVR-016	SVR-016

Fonte: Próprio autor

Figura B.27 – Variação do custo em função das iterações para o cenário com 100% de demanda, 100% de adesão do mercado e 1700 *clusters*

Fonte: Próprio autor

APÊNDICE C RESULTADOS OBTIDOS NA FASE DE LOCALIZAÇÃO DOS CENTROS URBANOS DE DISTRIBUIÇÃO

Esse apêndice apresenta os resultados obtidos na fase de localização dos centros urbanos de distribuição para todos os cenários simulados considerando os dados resultantes das diferentes iterações da fase de *clustering*.

Estes resultados compreendem o custo total para implantação dessas instalações e distribuição das mercadorias, distância total percorrida, quantidade de CDUs abertos e seu número de viagens necessárias.

Tabela C.1 – Resultados obtidos na fase de localização de CDUs

Cenário	Quantidade de clusters	Clusters sem sementes repetidas	Iteração	Custo total (R\$/dia)	Distância total (km)	Número de CDUs abertos	Quantidade de viagens									
							Centro	Boqueirão	Rebouças	Portão	Sítio Cercado	CIC	Água Verde	Bacacheri	Campo de Santana	Santa Felicidade
cen30-ad47	246	246	1	123.589	12.062	1	-	246	-	-	-	-	-	-	-	-
cen30-ad47	246	246	2	123.554	12.021	1	-	246	-	-	-	-	-	-	-	-
cen30-ad47	246	246	3	123.824	12.335	1	-	246	-	-	-	-	-	-	-	-
cen30-ad47	246	246	4	126.605	11.015	2	-	-	-	121	-	-	125	-	-	-
cen30-ad47	246	246	5	126.605	11.015	2	-	-	-	121	-	-	125	-	-	-
cen30-ad47	246	246	10	123.299	11.727	1	-	246	-	-	-	-	-	-	-	-
cen30-ad47	246	246	100	125.914	10.215	2	-	-	-	121	-	-	125	-	-	-
cen30-ad47	260	260	1	140.804	11.173	2	-	160	100	-	-	-	-	-	-	-
cen30-ad47	260	260	2	140.434	10.744	2	-	160	100	-	-	-	-	-	-	-
cen30-ad47	260	260	3	140.072	10.325	2	-	160	100	-	-	-	-	-	-	-
cen30-ad47	260	260	4	139.500	9.662	2	-	160	100	-	-	-	-	-	-	-
cen30-ad47	260	260	5	139.417	9.566	2	-	160	100	-	-	-	-	-	-	-
cen30-ad47	260	260	10	139.344	9.481	2	-	160	100	-	-	-	-	-	-	-
cen30-ad47	260	260	100	139.121	9.224	2	-	160	100	-	-	-	-	-	-	-
cen30-ad47	300	300	1	155.597	12.207	2	-	200	100	-	-	-	-	-	-	-
cen30-ad47	300	300	2	154.185	10.572	2	-	200	100	-	-	-	-	-	-	-
cen30-ad47	300	300	3	153.909	10.253	2	-	200	100	-	-	-	-	-	-	-
cen30-ad47	300	300	4	153.648	9.950	2	-	200	100	-	-	-	-	-	-	-
cen30-ad47	300	300	5	153.532	9.815	2	-	200	100	-	-	-	-	-	-	-
cen30-ad47	300	300	10	153.480	9.755	2	-	200	100	-	-	-	-	-	-	-
cen30-ad47	300	300	100	153.395	9.657	2	-	200	100	-	-	-	-	-	-	-
cen30-ad47	350	350	1	175.944	11.110	3	-	-	100	125	-	-	125	-	-	-
cen30-ad47	350	350	2	174.956	9.966	3	-	-	100	125	-	-	125	-	-	-
cen30-ad47	350	350	3	174.843	9.835	3	-	-	100	125	-	-	125	-	-	-
cen30-ad47	350	350	4	174.617	9.573	3	-	-	100	125	-	-	125	-	-	-
cen30-ad47	350	350	5	174.552	9.498	3	-	-	100	125	-	-	125	-	-	-
cen30-ad47	350	350	10	174.501	9.439	3	-	-	100	125	-	-	125	-	-	-
cen30-ad47	350	350	100	174.463	9.394	3	-	-	100	125	-	-	125	-	-	-
cen30-ad47	400	399	1	204.403	14.225	2	-	-	100	-	-	-	-	-	-	299
cen30-ad47	400	400	2	203.569	12.856	2	-	-	100	-	-	-	-	300	-	-
cen30-ad47	400	400	3	203.392	12.651	2	-	-	100	-	-	-	-	300	-	-
cen30-ad47	400	399	4	203.282	12.926	2	-	-	100	-	-	-	-	-	-	299
cen30-ad47	400	400	5	203.263	12.501	2	-	-	100	-	-	-	-	300	-	-
cen30-ad47	400	400	10	203.226	12.458	2	-	-	100	-	-	-	-	300	-	-
cen30-ad47	400	400	100	203.165	12.388	2	-	-	100	-	-	-	-	300	-	-
cen30-ad60	315	315	1	164.969	13.652	3	100	-	90	-	-	-	125	-	-	-
cen30-ad60	315	315	10	163.483	11.932	3	100	-	90	-	-	-	125	-	-	-
cen30-ad60	315	315	100	161.027	12.459	2	-	215	100	-	-	-	-	-	-	-

Cenário	Quantidade de clusters	Clusters sem sementes repetidas	Iteração	Custo total (R\$/dia)	Distância total (km)	Número de CDUs abertos	Quantidade de viagens									
							Centro	Boqueirão	Rebouças	Portão	Sítio Cercado	CIC	Água Verde	Bacacheri	Campo de Santana	Santa Felicidade
cen30-ad82	436	435	1	226.657	18.497	4	100	-	100	125	-	-	110	-	-	-
cen30-ad82	436	436	10	224.064	15.092	4	100	-	100	125	-	-	111	-	-	-
cen30-ad82	436	436	100	224.271	15.332	4	100	-	100	125	-	-	111	-	-	-
cen30-ad100	530	528	1	270.853	24.286	2	-	-	100	-	-	428	-	-	-	-
cen30-ad100	530	530	10	269.632	20.170	2	-	250	-	-	-	-	-	280	-	-
cen30-ad100	530	530	100	269.301	19.787	2	-	250	-	-	-	-	-	280	-	-
cen60-ad47	403	402	1	208.895	16.006	2	-	250	-	-	152	-	-	-	-	-
cen60-ad47	403	403	10	206.943	11.916	3	-	178	100	-	-	-	125	-	-	-
cen60-ad47	403	403	100	207.667	14.181	2	-	250	-	-	153	-	-	-	-	-
cen60-ad60	513	511	1	260.280	18.883	2	-	-	100	-	-	411	-	-	-	-
cen60-ad60	513	513	10	260.215	18.002	2	-	-	100	-	-	413	-	-	-	-
cen60-ad60	513	513	100	259.994	17.747	2	-	-	100	-	-	413	-	-	-	-
cen60-ad82	709	704	1	346.201	23.841	2	-	250	-	-	-	454	-	-	-	-
cen60-ad82	709	709	10	344.994	20.220	3	-	-	100	-	250	-	-	359	-	-
cen60-ad82	709	709	100	345.498	20.804	3	-	-	100	-	250	-	-	-	-	359
cen60-ad100	862	855	1	415.164	28.276	2	-	-	-	-	-	480	-	375	-	-
cen60-ad100	862	862	10	415.815	23.789	3	-	250	-	-	237	-	-	375	-	-
cen60-ad100	862	862	100	415.619	25.986	2	-	-	-	-	-	487	-	375	-	-
cen100-ad47	671	664	1	327.933	18.571	3	-	250	100	-	-	-	-	-	-	314
cen100-ad47	671	671	10	330.998	19.514	2	-	250	-	-	-	421	-	-	-	-
cen100-ad47	671	671	100	328.618	16.547	3	-	-	100	-	250	-	-	321	-	-
cen100-ad60	854	847	1	409.333	22.317	3	-	250	-	-	225	-	-	372	-	-
cen100-ad60	854	854	10	410.616	23.411	2	-	-	-	-	-	479	-	375	-	-
cen100-ad60	854	854	100	410.241	20.552	3	-	250	-	-	229	-	-	375	-	-
cen100-ad82	1181	1159	1	560.994	27.561	4	-	250	100	-	-	434	-	375	-	-
cen100-ad82	1181	1159	10	560.957	27.518	4	-	250	100	-	-	434	-	375	-	-
cen100-ad82	1182	1160	1	563.051	27.644	4	-	250	-	-	250	-	-	375	-	285
cen100-ad82	1182	1182	10	567.923	26.329	4	-	250	100	-	-	457	-	375	-	-
cen100-ad82	1182	1182	100	567.065	25.335	4	-	250	100	-	-	457	-	375	-	-
cen100-ad100	1437	1407	1	682.484	34.441	5	100	250	-	-	250	432	-	375	-	-
cen100-ad100	1437	1407	2	683.399	32.176	6	100	250	-	125	250	-	-	371	-	311
cen100-ad100	1437	1437	3	694.724	31.792	7	100	250	100	125	-	-	125	375	-	362
cen100-ad100	1437	1437	4	690.930	28.825	6	100	250	-	-	250	-	125	375	-	337
cen100-ad100	1437	1437	5	689.935	29.569	6	100	250	100	125	-	487	-	375	-	-
cen100-ad100	1437	1437	10	691.955	28.795	6	100	250	-	125	-	462	125	375	-	-
cen100-ad100	1437	1437	100	689.209	28.728	6	100	250	100	-	-	487	125	375	-	-
cen100-ad100	1450	1420	1	689.565	39.624	5	100	-	100	-	-	500	-	375	-	345
cen100-ad100	1450	1450	2	697.434	31.125	6	100	250	-	125	250	-	-	375	-	350
cen100-ad100	1450	1450	3	694.333	33.330	4	-	250	-	-	-	500	-	375	-	325

Cenário	Quantidade de clusters	Clusters sem sementes repetidas	Iteração	Custo total (R\$/dia)	Distância total (km)	Número de CDUs abertos	Quantidade de viagens									
							Centro	Boqueirão	Rebouças	Portão	Sítio Cercado	CIC	Água Verde	Bacacheri	Campo de Santana	Santa Felicidade
cen100-ad100	1450	1450	4	695.662	30.970	6	100	250	100	125	-	500	-	375	-	-
cen100-ad100	1450	1450	5	695.106	28.429	6	100	250	-	125	250	-	-	375	-	350
cen100-ad100	1450	1450	10	707.901	30.739	5	-	-	-	125	250	354	-	375	-	346
cen100-ad100	1450	1449	100	690.880	29.734	4	-	250	-	-	-	476	-	375	-	348
cen100-ad100	1500	1468	1	704.030	36.791	5	-	250	100	-	250	493	-	375	-	-
cen100-ad100	1500	1500	2	723.887	29.771	6	100	250	100	-	250	425	-	375	-	-
cen100-ad100	1500	1500	3	712.502	30.610	5	-	250	-	125	250	500	-	375	-	-
cen100-ad100	1500	1500	4	712.879	31.047	5	-	250	-	-	250	500	125	-	-	375
cen100-ad100	1500	1500	5	709.172	30.393	4	-	-	-	-	250	500	-	375	-	375
cen100-ad100	1500	1500	10	712.615	30.742	5	-	250	-	125	250	500	-	-	-	375
cen100-ad100	1500	1500	100	709.686	27.348	5	-	250	-	-	250	500	125	375	-	-
cen100-ad100	1600	1565	1	752.028	32.880	7	100	250	100	125	250	-	-	375	-	365
cen100-ad100	1600	1600	2	771.732	30.271	6	100	250	100	-	-	478	-	375	-	297
cen100-ad100	1600	1599	3	759.617	30.668	5	-	250	-	125	-	474	-	375	-	375
cen100-ad100	1600	1600	4	756.059	29.258	5	-	250	100	-	-	500	-	375	-	375
cen100-ad100	1600	1600	5	757.291	28.739	5	100	250	-	-	-	500	-	375	-	375
cen100-ad100	1600	1600	10	757.154	28.581	5	100	250	-	-	-	500	-	375	-	375
cen100-ad100	1600	1598	100	755.127	28.984	5	-	-	100	-	250	498	-	375	-	375
cen100-ad100	1700	1670	1	806.880	38.001	7	-	250	100	125	249	446	125	-	-	375
cen100-ad100	1700	1688	2	806.996	30.891	7	-	250	100	125	250	463	125	375	-	-
cen100-ad100	1700	1687	3	802.545	29.778	6	-	250	100	125	-	462	-	375	-	375
cen100-ad100	1700	1683	4	802.659	25.722	8	100	250	100	125	250	-	125	375	-	358
cen100-ad100	1700	1682	5	803.360	32.734	6	-	250	100	-	-	-	125	375	457	375
cen100-ad100	1700	1683	10	813.093	26.465	7	100	250	100	125	-	388	-	375	-	345
cen100-ad100	1700	1692	100	815.127	26.626	6	100	250	-	-	250	342	-	375	-	375

Fonte: Próprio autor

APÊNDICE D ROTINA DESENVOLVIDA

Este apêndice apresenta a rotina desenvolvida no TransCAD para roteirização dos diversos *clusters* de cada cenário simulado.

```
Macro "VRP-Clusters"
//definição dos diretórios utilizados
dir="D:\\00 Mestrado\\modelo\\"
dir_layer=" D:\\00 Mestrado\\modelo\\cluster\\estabelecimentos\\"
cenario_demanda="cenario100-adesao100"
cenario_itcl="it5-cl1700"
dir_bin=dir+"cenarios\\"+cenario_demanda+"\\cluster\\"+cenario_itcl+"\\"
dir_network=dir+"\\Rede\\rodo-cwb\\"
dir_results=dir+"TSP\\"+cenario_demanda+"\\"+cenario_itcl+"\\"
dir_dc=dir+"cds\\"
dir_mtx=dir_results+"mtx\\"
dir_veh=dir_results+"veh\\"

//Cria diretório para os arquivos de matrizes e tabelas de veículos
CreateDirectory(left(dir_mtx,len(dir_mtx)-1))
CreateDirectory(left(dir_veh,len(dir_veh)-1))

//Cria arquivos txts de controle
ptr = OpenFile(dir_results+"dist_cluster_dc.txt", "w")
ptr_time = OpenFile(dir_results+"time.txt", "w")
ptr_cluster1_2 = OpenFile(dir_results+"cluster_1_2.txt", "w")
ptr_dist_cluster_dc1_2 = OpenFile(dir_results+"dist_cluster_dc1_2.txt", "w")
ptr_cluster0=OpenFile(dir_results+"cluster0.txt", "w")
ptr_cluster_mult=OpenFile(dir_results+"cluster_mult.txt", "w")

//nome do layer com os estabelecimentos a serem atendidos
layer_name="estabelecimentos"
layer="estabelecimentos"
//nome do layer com a rede viária
layer_network_name="rodo"
layer_network_node_name="node"
layer_network="rodocwb"
//nome do layer com os pontos candidatos a CDUs
layer_dc_name="CDs"
layer_dc="cds"

//dimensionamento de variáveis
dim set_ids[1800]
dim node_net[65000]
dim a[1800]

//abre tabela de clusters
arq1=dir_bin+"CLUST_cluster.bin"
v_res1=OpenTable("CLUST_cluster","FFB",{arq1,})
seeds=GetDataVectors("CLUST_cluster|", {"Seed","#Features"},)
SetLayer(layer_name)
arq_join=dir_bin+"CLUST_assign.bin"
```

```

v_res=OpenTable("CLUST_assign","FFB",{arq_join,})
v_join= JoinViews("Cluster", layer_name+".ID", "CLUST_assign.ID1",)

//registro de horário
WriteLine(ptr_time,"["+GetDateAndTime()+"] início - Seleção dos seeds")

//Seleção dos seeds
for i=1 to seeds[1].length do
    if a[i]=null then do // não faz parte de grupo de clusters com mesmo seed
        ainda
            b=i+1 // (eventualmente) primeiro "i" com seed diferente do atual
            // acha clusters com o mesmo seed
            while b <= seeds[1].length and seeds[1][b]=seeds[1][i] do
                b=b+1
            end

            // calcula e salva os multiplicadores
            multi=b-i
            a[i]=multi
            for j=i+1 to b-1 do
                a[j]=0
            end

            end
            qry="Select * where Cluster.Seed="+i2s(seeds[1][i])
            set=SelectByQuery("seeds"+i2s(seeds[1][i]),"Several",qry,)
            set_ids[i]=GetSetIds(layer_name+"|seeds"+i2s(seeds[1][i]))
        end
    //registro de horário
    WriteLine(ptr_time,"["+GetDateAndTime()+"] início - Preenchendo
    estabelecimentos.TipoPonto com 0")

    //Preenchendo estabelecimentos.TipoPonto com 0
    RunMacro("TCB Init")
    v=Vector(GetSetIDs(layer_name).length, "Long", {"Constant", 0},{"Row Based",
    "True"})
    SetDataVector(layer_name+"|", "TipoPonto",v,)
    v=null

    //registro de horário
    WriteLine(ptr_time,"["+GetDateAndTime()+"] início - Preenchendo
    estabelecimentos.TipoPonto com 1 ou 2")

    //Preenchendo estabelecimentos.TipoPonto com 1 (stops) e 2 (depots)

    for i=1 to seeds[1].length do
        if set_ids[i].length<>0 then do
            v=Vector(set_ids[i].length, "Long", {"Constant", 1},{"Row Based",
            "True"})
            SetDataVector(layer_name+"|seeds"+i2s(seeds[1][i]),"TipoPonto",v,)
            v=null
            qry="Select * where ID="+i2s(set_ids[i][1])
            set=SelectByQuery("depots"+i2s(seeds[1][i]),"Several",qry,)
            v=Vector(1, "Long", {"Constant", 2},{"Row Based", "True"})
            SetDataVector(layer_name+"|depots"+i2s(seeds[1][i]),"TipoPonto",v,)
            v=null
        end
    end
end
//registro de horário

```

```

WriteLine(ptr_time, "["+GetDateAndTime()+"] início - Obtendo por estabelecimento o
nó da rede mais próximo e respectiva distância")

//Obtendo por estabelecimento o nó da rede mais próximo e respectiva distância
for i=1 to seeds[1].length do
    node_net[i]=GetDataVectors(layer_name+"|seeds"+i2s(seeds[1][i]),
{"ID", "NodeID", "DistanceNodeID"},)
end

//registro de horário
WriteLine(ptr_time, "["+GetDateAndTime()+"] início - Preenchendo
Node.MatrixCusto=0")

//Preenchendo Node.MatrixCusto=0
SetLayer("node")
v=Vector(GetSetIds(layer_network_node_name).length, "Long", {"Constant", 0}, {"Row
Based", "True"})
SetDataVector(layer_network_node_name+"|", "MatrizCusto", v,)
v=null

//registro de horário
WriteLine(ptr_time, "["+GetDateAndTime()+"] início - Preenchendo com 1 todos os nós
da rede relevante")

//Preenchendo com 1 todos os nós da rede relevantes
for i=1 to seeds[1].length do
    if set_ids[i].length<>0 then do
        n_selected = SelectByIDs("nodes", "Several",
VectorToArray(node_net[i][2]),)
        v=Vector(n_selected, "Long", {"Constant", 1}, {"Row Based", "True"})
        SetDataVector(layer_network_node_name+"|nodes", "MatrizCusto", v,)
        v=null
    end
end

//registro de horário
WriteLine(ptr_time, "["+GetDateAndTime()+"] início - Preenchendo com 1 todos os nós
da rede relevante (cd)")

node_dcs=GetDataVectors(layer_dc_name+"|", {"ID", "NodeID", "DistanceNodeID"},)

n_selected = SelectByIDs("nodes", "Several", VectorToArray(node_dcs[2]),)
v=Vector(node_dcs[2].length, "Long", {"Constant", 1}, {"Row Based", "True"})
SetDataVector(layer_network_node_name+"|nodes", "MatrizCusto", v,)
v=null
//registro de horário
WriteLine(ptr_time, "["+GetDateAndTime()+"] início - Construção da rede")

// Construção da rede
Opts = null
Opts.Input.[Link Set] = {dir_network+layer_network+".DBD|"+layer_network_name,
layer_network_name}
Opts.Global.[Network Label] = "Based on 'rodo'"
Opts.Global.[Network Options].[Turn Penalties] = "Yes"
Opts.Global.[Network Options].[Keep Duplicate Links] = "FALSE"
Opts.Global.[Network Options].[Ignore Link Direction] = "FALSE"
Opts.Global.[Network Options].[Time Units] = "Minutes"
Opts.Global.[Link Options].Length = {"rodo.LEN_M", "rodo.LEN_M", , , "False"}
Opts.Global.[Length Units] = "Meters"

```

```

    Opts.Global.[Time Units] = "Minutes"
    Opts.Output.[Network File] = dir+"net.net"
    ok = RunMacro("TCB Run Operation", "Build Highway Network", Opts, &Ret)
    net_handle = ReadNetwork(dir+"net.net")

//registro de horário
WriteLine(ptr_time,["+GetDateAndTime()+"] início - Matriz de custo (rede))

// Matriz de custo (rede)
    Opts = null
    Opts.Input.[Depot Set] =
{dir_network+layer_network+".DBD|"+layer_network_node_name,
layer_network_node_name, "depots","Select * where MatrizCusto=1"}
    Opts.Input.[Stop Set] =
{dir_network+layer_network+".DBD|"+layer_network_node_name,
layer_network_node_name, "stops","Select * where MatrizCusto=1"}
    Opts.Input.Network = dir+"net.net"
    Opts.Global.Sparse = 0
    Opts.Global.Minimizing = 1
    Opts.Global.Method = "Network Based"
    Opts.Field.[Depot ID] = "Node.ID"
    Opts.Field.[Depot NodeID] = "Node.ID"
    Opts.Field.[Stop ID] = "Node.ID"
    Opts.Field.[Stop NodeID] = "Node.ID"
    Opts.Field.Distance = "Length"
    Opts.Field.Time = "Length"
    Opts.Field.[Skim Fields].Length = "All"
    Opts.Output.[Routing Matrix].Label = "VRP Distance Matrix File"
    Opts.Output.[Routing Matrix].Type = "Float"
    Opts.Output.[Routing Matrix].[File based] = "FALSE"
    Opts.Output.[Routing Matrix].Sparse = "False"
    Opts.Output.[Routing Matrix].[Column Major] = "False"
    Opts.Output.[Routing Matrix].Compression = 0
    Opts.Output.[Routing Matrix].[File Name] = dir_mtx+"vrpmat1.mtx"
    ret_value = RunMacro("TCB Run Procedure", "VRPMAT", Opts, &Ret)

//preenche matriz de distância
node_net2=GetDataVectors(layer_name+"|", {"ID","NodeID","DistanceNodeID"}, {"Sort
Order", {"ID","Ascending"}})

m2=OpenMatrix(dir_mtx+"vrpmat1.mtx","False")
mc2 = CreateMatrixCurrency(m2, "Distance", "RCIndex", "RCIndex", )

for i=1 to seeds[1].length do
    if a[i]=0 then do
        //registro de horário
        WriteLine(ptr_time,["+GetDateAndTime()+"] pulando seed já
considerado - seed"+i2s(seeds[1][i]))
        WriteArray(ptr_cluster_mult, {seeds[1][i]})
        continue
    end

    //registro de horário
    WriteLine(ptr_time,["+GetDateAndTime()+"] início - seed"+i2s(seeds[1][i])+"
- "+i2s(set_ids[i].length)+" elementos")

    if set_ids[i].length=0 then do
        WriteArray(ptr_cluster0,{seeds[1][i]})
        i=i+1

```



```

        WriteLine(ptr_time, "["+GetDateAndTime()+"] início -
seed"+i2s(seeds[1][i])+" - "+i2s(set_ids[i].length)+" elementos")
    end

    //registro de horário
    WriteLine(ptr_time, "["+GetDateAndTime()+"] início - Matriz de distância -
seed"+i2s(seeds[1][i]))

    //Cria matriz de distância por cluster
    mat =CreateMatrix({layer_name+"|seeds"+i2s(seeds[1][i]), layer_name+".id",
"RCIndex"},{layer_name+"|seeds"+i2s(seeds[1][i]), layer_name+".id",
"RCIndex"},{"File Name", dir_mtx +
"vrpmat_seeds"+i2s(seeds[1][i])+".mtx"}, {"Label", "VRP Distance Matrix
File"}, {"Tables", {"Distance", "Time"}}, {"Type", "Float"}, {"File Based", "No"}})
    m1=OpenMatrix(dir_mtx+ "vrpmat_seeds"+i2s(seeds[1][i])+".mtx", "False")
    mc1 = CreateMatrixCurrency(m1, "Distance", "RCIndex", "RCIndex", )
    mc11=CreateMatrixCurrency(m1, "Time", "RCIndex", "RCIndex", )
    new_index1= CreateMatrixIndex("Stops", m1,
"Both", layer_name+"|seeds"+i2s(seeds[1][i]), "ID", "ID" )
    new_index2= CreateMatrixIndex("Depots", m1,
"Both", layer_name+"|seeds"+i2s(seeds[1][i]), "ID", "ID" )

    //registro de horário
    WriteLine(ptr_time, "["+GetDateAndTime()+"] início - Matriz de distância -
seed"+i2s(seeds[1][i])+" - acessos")

    dim dist_access[set_ids[i].length]
    dim node_access[set_ids[i].length]

    k=1
    j=1

    while j<= set_ids[i].length do
        if set_ids[i][j]=node_net2[1][k] then do
            node_access[j]=node_net2[2][k]
            dist_access[j]=node_net2[3][k]
            j=j+1
            k=k-1
        end
        k=k+1
    end

    //registro de horário
    WriteLine(ptr_time, "["+GetDateAndTime()+"] início - Matriz de distância -
seed"+i2s(seeds[1][i])+" - distâncias totais")

    dim dist_total[set_ids[i].length, set_ids[i].length]
    dim time_total[set_ids[i].length, set_ids[i].length]

    dist = GetMatrixValues(mc2, node_access, node_access)
    for j=1 to set_ids[i].length do
        for k=1 to set_ids[i].length do
            if dist[j][k] <> null then do

dist_total[j][k]=(dist[j][k]/1000)+dist_access[j]+dist_access[k]
                time_total[j][k]=dist_total[j][k]/30
            end
        end
    end
end

```

```

//registro de horário
WriteLine(ptr_time,"["+GetDateAndTime()+"] Preenchendo matriz de distância -
seed"+i2s(seeds[1][i]))

SetMatrixValues(mc1,set_ids[i],set_ids[i],{"Copy",dist_total},)
SetMatrixValues(mc11,set_ids[i],set_ids[i],{"Copy",time_total},)

//registro de horário
WriteLine(ptr_time,"["+GetDateAndTime()+"] início - tabela de veículo/cd -
seed"+i2s(seeds[1][i]))

//Cria tabela de veículos
CopyFile(dir+"veh_tab.bin", dir_veh+"veh_tab_seeds"+i2s(seeds[1][i])+".bin")
CopyFile(dir+"veh_tab.dcb", dir_veh+"veh_tab_seeds"+i2s(seeds[1][i])+".dcb")
b = OpenTable("VEH_TAB", "FFB",
{dir_veh+"veh_tab_seeds"+i2s(seeds[1][i])+".bin"}, {"False", "False"})
depots=GetSetIds(layer_name+"|depots"+i2s(seeds[1][i]))
for z=1 to depots.length do
    AddRecords("VEH_TAB", {"DepotID", "Type", "Capacity", "Num_Vehs",
"Cost"}, {{depots[z], 1, 5000*a[i], 1, 1}},)
end
CloseView("VEH_TAB")

SetLayer(layer_name)
arq_join=dir_bin+"CLUST_assign.bin"
v_res=OpenTable("CLUST_assign","FFB",{arq_join},)
v_join= JoinViews("Cluster", layer_name+".ID", "CLUST_assign.ID1",)

//registro de horário
WriteLine(ptr_time,"["+GetDateAndTime()+"] início - TSP -
seed"+i2s(seeds[1][i]))

//TSP
Opts = null
Opts.Input.[Routing Matrix Currency] = {dir_mtx +
"vrpmat_seeds"+i2s(seeds[1][i])+".mtx", "Distance", "RCIndex", "RCIndex"}
Opts.Input.[Stop Set] =
{dir_layer+layer+".DBD|"+layer_name,layer_name,"stops"+i2s(seeds[1][i]) , "Select
* where Cluster.Seed="+i2s(seeds[1][i])+ " and TipoPonto=1"}
Opts.Input.[Depot Set] =
{dir_layer+layer+".DBD|"+layer_name,layer_name,"depots"+i2s(seeds[1][i]) , "Select
* where Cluster.Seed="+i2s(seeds[1][i])+ " and TipoPonto=2"}
Opts.Input.[Vehicle Set] = { dir_veh+"veh_tab_seeds"+i2s(seeds[1][i])+".bin",
"VEH_TAB"}
Opts.Input.[Stop Set Name] = "stops"+i2s(seeds[1][i])
Opts.Field.[Stop ID] = "[estabelecimentos].ID"
Opts.Field.[Stop Name] = "[estabelecimentos].ID"
Opts.Field.[Stop Open Time] = "[estabelecimentos].OPEN"
Opts.Field.[Stop Close Time] = "[estabelecimentos].CLOSE"
Opts.Field.[Depot ID] = "[estabelecimentos].ID"
Opts.Field.[Depot Name] = "[estabelecimentos].ID"
Opts.Field.[Depot Open Time] = "[estabelecimentos].OPEN"
Opts.Field.[Depot Close Time] = "[estabelecimentos].CLOSE"
Opts.Field.[Veh Depot ID] = "VEH_TAB.DepotID"
Opts.Field.Type = "VEH_TAB.Type"
Opts.Field.Capacity = "VEH_TAB.Capacity"
Opts.Field.Cost = "VEH_TAB.Cost"
Opts.Field.Number = "VEH_TAB.Num_Vehs"

```

```

Opts.Field.[Delivery Stop Demand] = "[estabelecimentos].DemTotal"
Opts.Field.[Fixed Time Type] = 1
Opts.Field.[Fixed Time Value] = 0
Opts.Field.[Variable Time Type] = 1
Opts.Field.[Variable Time Value] = 0
Opts.Global.[Time Core] = 2
Opts.Global.[Dist Core] = 1
Opts.Global.Duration = 0
Opts.Global.[Apply Open-ended Routing] = 0
Opts.Global.Lambda = 2
Opts.Global.Horizon = 1
Opts.Global.Improve = 2
Opts.Global.[Num Windows] = 1
Opts.Global.[Operation Mode] = 1
Opts.Global.ApplyBalancing = 0
Opts.Output.[Route Table] = dir_results+"VRP Routes-tcw60-
teste_seeds"+i2s(seeds[1][i])+".bin"
Opts.Output.[Itinerary File] =dir_results+"VRP Routes-tcw60-
teste_seeds"+i2s(seeds[1][i])+".xml"
ok = RunMacro("TCB Run Procedure", "VRPTW", Opts, &Ret)

if set_ids[i].length<=2 then do
//registro de horário
WriteLine(ptr_cluster1_2,i2s(seeds[1][i])) //cluster seed
    if set_ids[i].length=1 then WriteLine(ptr_cluster1_2,"0") //dist
    if set_ids[i].length=2 then
WriteLine(ptr_cluster1_2,realtostring(dist_total[1][2]))
end
//registro de horário
WriteLine(ptr_time,["+GetDateAndTime()+"] início - matriz de distância
CD/seed"+i2s(seeds[1][i]))

//calcula distância entre os pontos (do cluster) e os locais candidatos a CDs
urbanos; e seleciona a menor distância
    dim dist_dc[node_dcs[1].length,set_ids[i].length]
    dim dist_total_dc[node_dcs[1].length,set_ids[i].length]
    dim dist_cluster_dc[seeds[1].length*node_dcs[1].length]

    m=1
    for k=1 to node_dcs[1].length do
        for j=1 to set_ids[i].length do

            dist_dc[k][j]=GetMatrixValue(mc2,i2s(node_dcs[2][k]),i2s(node_access[j]))
            if dist_dc[k][j]=null then dist[k][j]=0

            dist_total_dc[k][j]=(dist_dc[k][j]/1000)+dist_access[j]+node_dcs[3][k]
        end

        if set_ids[i].length<=2 then do
            dist_cluster_dc[m]=ArrayMin(dist_total_dc[k])
            WriteArray(ptr_dist_cluster_dc1_2, {seeds[1][i]})
            WriteArray(ptr_dist_cluster_dc1_2,{node_dcs[1][k]})
            WriteArray(ptr_dist_cluster_dc1_2,{dist_cluster_dc[m]})
        end

        if set_ids[i].length>2 then do
            dist_cluster_dc[m]=ArrayMin(dist_total_dc[k])
            WriteArray(ptr, {seeds[1][i]})
            WriteArray(ptr,{node_dcs[1][k]})
        end
    end

```

```

        WriteArray(ptr,{dist_cluster_dc[m]})
    end
    m=m+1
end

//registro de horário
    WriteLine(ptr_time,"["+GetDateAndTime()+"] fim - matriz de distância
CD/seed"+i2s(seeds[1][i]))
//limpa variáveis referente a matriz de distância
    mc1=null
    mc11=null
    m1=null

end
//Salva mapa
saveMap(,dir_results+"tsp.map")

RunMacro("G30 File Close All")
endMacro

```