



EDUARDO PEREIRA LIMA DE PAIVA

**HEURÍSTICAS APLICADAS A UM ESTUDO DE CASO
DE DISTRIBUIÇÃO DE PEQUENAS ENCOMENDAS
UTILIZANDO A BICICLETA**

**Campinas
2014**



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

EDUARDO PEREIRA LIMA DE PAIVA

**HEURÍSTICAS APLICADAS A UM ESTUDO DE CASO
DE DISTRIBUIÇÃO DE PEQUENAS ENCOMENDAS
UTILIZANDO A BICICLETA**

Dissertação de Mestrado apresentada a Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de Transportes

Orientador: Prof. Dr. Orlando Fontes Lima Júnior.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO EDUARDO PEREIRA LIMA DE PAIVA E ORIENTADO PELO PROF. DR. ORLANDO FONTES LIMA JÚNIOR

Assinatura do Orientador

Campinas
2014

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

P166h Paiva, Eduardo Pereira Lima de, 1984-
Heurísticas aplicadas a um estudo de caso de distribuição de pequenas encomendas utilizando a bicicleta / Eduardo Pereira Lima de Paiva. – Campinas, SP : [s.n.], 2014.

Orientador: Orlando Fontes Lima Júnior.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Heurística. 2. Distribuição de mercadorias. 3. Bicicletas - Transporte. I. Lima Júnior, Orlando Fontes, 1958-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Applied heuristics for a case study of small order distribution by bicycle

Palavras-chave em inglês:

Heuristic

Distribution of goods

Bicicletas - Transport

Área de concentração: Transportes

Titulação: Mestre em Engenharia Civil

Banca examinadora:

Orlando Fontes Lima Júnior [Orientador]

Diogenes Cortijo Costa

Antônio Galvão Naclério Novaes

Data de defesa: 25-08-2014

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Civil

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO**

**HEURÍSTICAS APLICADAS A UM ESTUDO DE CASO DE
DISTRIBUIÇÃO DE PEQUENAS ENCOMENDAS UTILIZANDO A
BICICLETA**

Eduardo Pereira Lima de Paiva

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:



**Prof. Dr. Orlando Fontes Lima Júnior
Presidente e Orientador/Universidade Estadual de Campinas**



**Prof. Dr. Diogenes Cortijo Costa
Universidade Estadual de Campinas**



**Prof. Dr. Antônio Galvão Naclério Novaes
Universidade Federal de Santa Catarina**

Campinas, 25 de agosto de 2014

RESUMO

O serviço de entrega por bicicleta representa um mercado de prestação de serviços promissor e em crescimento. O transporte de carga movido por propulsão humana tem recebido bastante atenção por ser capaz de reduzir custos e emissão de poluentes em operações logísticas de curta distância e por aliviar a quantidade de veículos motorizados utilizados em centros urbanos. A distribuição de pequenas encomendas por bicicleta em área urbana de pequeno porte foi objeto deste trabalho. Com base nos métodos de *Districting* (divisão por distritos), de Clarke e Wright e Diagramas de Voronoi, realizou-se um estudo de caso envolvendo a distribuição de malotes no campus de Campinas da UNICAMP (Universidade Estadual de Campinas). Os resultados dessas aplicações foram comparados entre eles e em relação à situação existente, e as dificuldades e restrições para a implantação de serviços de bicicletas foram exploradas considerando-se a viabilidade econômica e social da substituição do veículo motorizado pelo veículo movido a propulsão humana.

Palavras-chave: Entrega e coleta por bicicleta, Divisão por Distritos, Clarke e Wright, Diagramas de Voronoi, Pequenas Encomendas

ABSTRACT

Abstract:

The bicycle delivery service is a promising and growing service delivery market. Human propelled load transportation has received great attention these days for being able to reduce costs and pollution emission in short distance logistics operations, as well as to diminish the amount of motor vehicles in urban centers. The subject of this paper is the distribution of small orders by bicycle in small urban areas. Based on the *Districting* method (division by districts), Clarke and Wright Algorithm, and Voronoi Diagrams, a case study was developed considering the distribution of pouches in the campus of Campinas State University (Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP), São Paulo, Brazil. The results of these applications were compared among themselves and to the actual situation, and the difficulties and restrictions imposed to the implementation of bicycle service delivery were explored from the point of view of the economic and social viability of motor vehicle replacement for human propelled vehicle.

Key Words: Bike courier, *Districting*, Clarke and Wright Algorithm, Voronoi Diagrams, Small Orders

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Considerações iniciais.....	1
1.2. Apresentação do Problema.....	3
1.3. Objetivos.....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1. O Serviço de Transporte de Pequenas Cargas.....	5
2.2. O Método de <i>Districting</i> (divisão por distritos).....	8
2.3. O Processo de Roteirização de Veículos.....	13
2.3.1. O Método de “Varredura”.....	17
2.3.2. O Método Clarke e Wright das “Economias”.....	19
2.3.3. O Método de Melhoria de Roteiros.....	23
2.4. O Diagrama de Voronoi.....	25
2.4.1. O Diagrama de Voronoi Simples.....	25
2.4.2. Os Diagramas de Voronoi Ponderados.....	27
2.4.3. Exemplos de Aplicações de Diagramas de Voronoi.....	30
2.5. Utilização de Bicicletas como Veículos de Transporte de Carga.....	37
2.6. A Motocicleta como Veículo de Transporte de Pequenas Encomendas.....	44
2.7. Os custos de Emissões de Gases Poluentes Resultantes das Operações de Transporte...53	
2.8. Os Sistemas de Informação Geográfica.....	58
2.9. O Programa ArcGIS.....	63
3. METODOLOGIA DE PESQUISA.....	67
3.1. Etapas de Desenvolvimento.....	67
3.2. Os Métodos de Construção de Roteiros.....	70
3.2.1. O método de <i>Districting</i>	71
3.2.2. O Método de Clarke e Wright.....	74
3.2.3. O método de diagrama de Voronoi.....	76
3.3. Procedimento de Análise.....	78
4. CENÁRIO DE ESTUDO.....	83
4.1. Cenário de Estudo.....	83

4.2. O Processo de Distribuição Interna do Setor de Expedições.....	84
4.3. Elaboração da operação de transferência de malotes no aplicativo SIG.....	89
4.4. Avaliação do Desempenho da Situação Existente.....	101
5. APLICAÇÃO PRÁTICA.....	109
5.1. Apresentação das Variáveis.....	109
5.2. Aplicação Prática do Método de <i>Districting</i>	111
5.3. Aplicação Prática do Método de Clarke e Wright.....	119
5.4. Aplicação Prática dos Diagramas de Voronoi.....	128
6. ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	147
6.1. Comparação das Diferentes Soluções Apresentadas pelas Múltiplas Aplicações das Duas Heurísticas.....	147
6.2. Análise Comparativa entre as Soluções Seleccionadas.....	158
6.3. Análise Comparativa das Soluções Seleccionadas com a Situação Existente.....	161
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	175
7.1. Considerações sobre o Desenvolvimento da Pesquisa.....	175
7.2. Sugestões para Futuras Pesquisas.....	179
8. BIBLIOGRAFIA.....	181
8.1. Referências Bibliográficas.....	181
8.2. Bibliografia Complementar.....	186
ANEXOS.....	193
ANEXO A – Entrevista com a Empresa <i>Courrieros</i> de entrega de documentos e pequenos pacotes.....	195
ANEXO B – Entrevista com o Setor de Expedição da Universidade Estadual de Campinas.....	199
ANEXO C – Horários da operação de entrega e coleta de malotes.....	205
ANEXO D – Planilhas de Custos Operacionais relacionados com os custos de quilometragem para os veículos Kombi e Motocicleta – Atualizada em Maio de 2014.....	207
ANEXO E – Estrutura do Programa “Gera_Distritos” em linguagem Pascal.....	211

DEDICATÓRIA

Ao meu pai, Cássio, e à minha mãe, Eliane, pelo constante apoio nos momentos de dificuldade e em todos os novos momentos que ainda estão por vir na minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pois sem Ele eu não teria forças para ter terminado essa longa jornada.

Ao programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UNICAMP que, através de seus professores e funcionários, permitiu a realização deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela assistência financeira concedida à pesquisa durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu orientador, Dr. Orlando Fontes Lima Júnior, pela orientação, incentivo, paciência, apoio, e pelas inúmeras sugestões de aperfeiçoamento durante a realização desta dissertação.

Ao Prof. Dr. Antônio Galvão Novaes, pelos inúmeros conselhos, apoio pleno e constante, e pelas informações e programas fornecidos que possibilitaram o desenvolvimento desta dissertação.

Ao Prof. Dr. Edson Bez e seu orientado Daniel Adriano, pelo fornecimento do programa que permitiu o desenvolvimento dos estudos contidos nesta dissertação.

Ao Prof. Dr. Diógenes Cortijo Costa, que, como membro da banca examinadora, contribuiu para este trabalho apontando melhorias importantes no processo de dissertação.

À Prof.^a Dra. Maria Teresa Françoso, cujas informações possibilitaram um maior entendimento da ferramenta computacional e das informações relevantes ao tema de pesquisa.

Ao LALT e seus integrantes, pela ajuda e indicação da correta direção dos trabalhos e pesquisas. Ao Sérgio Loureiro, pela ajuda com a elaboração do trabalho escrito. Ao Vanderlei Junior, pelo auxílio com o manuseio dos programas e ferramentas utilizados. A Carolina Carvalho, pelo constante auxílio durante o andamento da pesquisa. E a Damares Bufarah, pelo atendimento e apoio na parte administrativa.

A Suze Farias, pelo auxílio e apoio, nas inúmeras vezes em que houve necessidade de enfrentamento da burocracia.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Transporte, em especial ao Wagner Guide e ao Jose Cipriano, que disponibilizaram as ferramentas e equipamentos para as medições realizadas dentro do campus da UNICAMP.

Aos funcionários do Setor de Expedição de Correspondências do DGA, em especial à Daisy Ferreira, pela disponibilização das importantes informações referentes à entrega de pequenas encomendas que possibilitaram a elaboração da presente pesquisa.

Ao pessoal da Empresa Courriers, que se dispôs a fornecer informações e dados importantes para o estudo do tema do uso da bicicleta na distribuição de pequenas encomendas.

Aos meus amigos, pelo companheirismo e cumplicidade que me fizeram mais feliz e bem-humorado nos momento de dificuldade.

E agradeço também a todos aqueles que colaboraram para a conclusão deste trabalho, de maneira direta ou indireta, e que não foram mencionados.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Método de <i>Districting</i> aplicado na região de Saskatoon.....	11
Figura 2.2 – Diagrama de Voronoi com Pesos Multiplicativos aplicado em um <i>Districting</i> logístico com barreiras.....	12
Figura 2.3 – Apresentação do Método de Varredura.....	18
Figura 2.4 – Conceito de cálculo da redução de distância de percurso para o Método das Economias.....	20
Figura 2.5 – Apresentação do Método de Clarke e Wright.....	22
Figura 2.6. Exemplo de método <i>2-opt</i>	24
Figura 2.7. Exemplo de método <i>3-opt</i>	24
Figura 2.8 – Diagrama de Voronoi Simples.....	26
Figura 2.9 – Diagrama de Voronoi com Pesos Multiplicativos.....	28
Figura 2.10 – Diagrama de Voronoi com Pesos Aditivos.....	29
Figura 2.11 – Diagrama de Voronoi com Pesos de Potência.....	30
Figura 2.12 – Resultado da aplicação do modelo de localização-alocação com o auxílio de diagrama de Voronoi.....	31
Figura 2.13 – Aplicação do diagrama MW-Voronoi para resolução de um problema de entregas de encomendas em São Paulo.....	32
Figura 2.14 – Comparação entre o método de mapeamento da região infectada com cólera por John Snow (1854) e a aplicação do diagrama de Voronoi para análise dos mesmos dados por Cliff e Hagget (1988).....	33
Figura 2.15 – Diagrama de Voronoi Simples.....	34
Figura 2.16 – Voronoi Complexo, considerando o fator de massa em cada ponto, representada pelo número de vagas em cada escola.....	35
Figura 2.17 – Diagrama de Voronoi Complexo, considerando os fatores de massa e de superfície de atrito.....	36
Figura 2.18 – Equipamentos de segurança para a operação de entrega e coleta por bicicleta.....	43
Figura 2.19 – Equipamentos e acessórios auxiliares da bicicleta para operações de distribuição de carga.....	43
Figura 2.20 – Estimativa percentual da frota circulante no Estado de São Paulo em 2012.....	51

Figura 2.21 – Contribuição percentual de cada categoria de veículos na emissão de poluentes no Estado de São Paulo em 2012.....	52
Figura 2.22 – Contribuição percentual de cada categoria de veículos na emissão de GEE no Estado de São Paulo em 2012.....	52
Figura 3.1 – Fluxograma do Procedimento de Pesquisa Adotado na Elaboração do Estudo Pretendido.....	69
Figura 3.2 – Fluxograma do método de <i>Districting</i>	72
Figura 3.3 – Fluxograma do método de Clarke e Wright.....	75
Figura 3.4 – Fluxograma do método de diagrama de Voronoi.....	77
Figura 4.1 – Dispositivos utilizados na distribuição interna dos malotes.....	84
Figura 4.2 – Malotes utilizados na distribuição interna das correspondências.....	85
Figura 4.3 – Exemplos de correspondências transportadas nos malotes.....	85
Figura 4.4 – Exemplos de correspondências transportadas fora dos malotes.....	86
Figura 4.5 – Alocação dos malotes na Kombi.....	87
Figura 4.6 – GPS utilizado no registro das coordenadas dos pontos de troca dos malotes.....	90
Figura 4.7 – Distribuição da velocidade média de viagem no roteiro 1.....	96
Figura 4.8 – Distribuição da velocidade média de viagem no roteiro 2.....	96
Figura 4.9 – Equipamento utilizado para a pesagem dos malotes.....	97
Figura 4.10 – Mapa dos pontos de troca de malotes dos roteiros 1(vermelho) e 2 (azul).....	103
Figura 4.11 – Mapa da operação de troca dos malotes do roteiro 1.....	105
Figura 4.12 – Mapa da operação de troca dos malotes do roteiro 2.....	106
Figura 5.1 – Mapa elaborado com o uso do programa ArcGIS da operação de 4 roteiros apresentada pelo programa “Gera_Distritos”.....	115
Figura 5.2 – Mapa elaborado com o uso do programa ArcGIS da operação de 5 roteiros apresentada pelo programa “Gera_Distritos”	116
Figura 5.3 – Mapa elaborado com o uso do programa ArcGIS da operação de 6 roteiros apresentada pelo programa “Gera_Distritos”	117
Figura 5.4 – Tela de execução do programa “Clarke Wright”.....	120
Figura 5.5 – Tela do Mapa de Percurso.....	122
Figura 5.6 – <i>Plugin ET Surface</i>	128
Figura 5.7 – Processo de criação do Diagrama de Voronoi Simples.....	129

Figura 5.8 – Diagrama de Voronoi Simples aplicado no cenário de estudo.....	130
Figura 5.9 – Processo de criação do Diagrama de Voronoi com pesos multiplicativos.....	134
Figura 5.10 – Diagrama de Voronoi Com Pesos Multiplicativos aplicado no cenário de estudo.....	135
Figura 5.11 – Análise comparativa do diagrama de Voronoi Multiplicativo em relação ao diagrama de Voronoi Simples.....	139
Figura 5.12 – Aplicação combinada do programa “Gera_Distritos” e o Voronoi Multiplicativo com 4 roteiros.....	143
Figura 5.13 – Aplicação combinada do programa “Gera_Distritos” e o Voronoi Multiplicativo com 6 roteiros.....	144
Figura 5.14 – Aplicação combinada do programa “Gera_Distritos” e o Voronoi Multiplicativo com 15 roteiros.....	145

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Principais características dos problemas encontrados em um processo de roteirização.....	16
Tabela 2.2 – Preços estabelecidos para operações de entrega simples.....	39
Tabela 2.3 – Quadro comparativo dos fatores de emissão médios por passageiro de ônibus, automóveis e motocicletas.....	47
Tabela 2.4 – Planilha de custo operacional por quilometragem rodada.....	51
Tabela 2.5 – Efeitos Nocivos dos principais poluentes veiculares locais na atmosfera.....	55
Tabela 2.6 – Fatores médios de emissão de veículos comerciais leves novos.....	57
Tabela 2.7 – Fatores médios de emissão de motocicletas e similares.....	57
Tabela 3.1 – Esboço da matriz de distância.....	73
Tabela 3.2 – Tabela das variáveis de saída finais dos modelos de estudo.....	79
Tabela 3.3 – Valores considerados da definição dos custos operacionais, sociais e de dimensionamento de frota.....	80
Tabela 4.1 – Coordenadas dos pontos de troca dos malotes – Primeiro Roteiro.....	91
Tabela 4.2 – Coordenadas dos pontos de troca dos malotes – Segundo Roteiro.....	92
Tabela 4.3 – Dados dos roteiros de viagens para as operações de troca de malotes – Primeiro Roteiro.....	94
Tabela 4.4 – Dados dos roteiros de viagens para as operações de troca de malotes – Segundo Roteiro.....	95
Tabela 4.5 – Peso dos malotes das unidades da UNICAMP – Primeiro Roteiro (Continua).....	98
Tabela 4.5 – Peso dos malotes das unidades da UNICAMP – Primeiro Roteiro (Conclusão).....	99
Tabela 4.6 – Peso dos malotes das unidades da UNICAMP – Segundo Roteiro (Continua).....	100
Tabela 4.6 – Peso dos malotes das unidades da UNICAMP – Segundo Roteiro (Conclusão).....	101
Tabela 5.1 – Variáveis de entrada dos modelos computacionais.....	109
Tabela 5.2 – Variáveis de saída dos modelos computacionais.....	110
Tabela 5.3 – Coordenadas registradas no processo de execução do programa “Gera_Distritos”.....	112
Tabela 5.4 – Dados de entrada do programa “Gera_Distritos”.....	113

Tabela 5.5 – Variáveis de saída do programa “Gera_Distritos”.....	113
Tabela 5.6 – Sequenciamento de roteiros do programa “Gera_Distritos”	114
Tabela 5.7 – Dados de entrada do programa “Clarke Wright”.....	123
Tabela 5.8 – Variáveis de saída do programa “Clarke Wright” para bicicleta.....	124
Tabela 5.9 – Variáveis de saída do programa “Clarke Wright” para motocicleta.....	125
Tabela 5.10 – Sequenciamento de roteiros pelo programa “Clarke Wright” para bicicleta.....	126
Tabela 5.11 – Sequenciamento de roteiros pelo programa “Clarke Wright” para motocicleta....	127
Tabela 5.12 – Dados de saída do Diagrama de Voronoi Simples (Continua).....	131
Tabela 5.12 – Dados de saída do Diagrama de Voronoi Simples (Conclusão).....	132
Tabela 5.13 – Dados de saída do Diagrama de Voronoi com Pesos Multiplicativos (Continua).....	136
Tabela 5.13 – Dados de saída do Diagrama de Voronoi com Pesos Multiplicativos (Conclusão).....	137
Tabela 5.14 – Análise comparativa do diagrama de Voronoi Multiplicativo em relação ao diagrama de Voronoi Simples (Continua).....	140
Tabela 5.14 – Análise comparativa do diagrama de Voronoi Multiplicativo em relação ao diagrama de Voronoi Simples (Conclusão).....	141
Tabela 6.1 – Dados de saída do programa “Gera_Distritos”.....	148
Tabela 6.2 – Medidas de dispersão das soluções apresentadas pelo programa “Gera_Distritos”.....	149
Tabela 6.3 – Dados de saída do programa “Clarke Wright” para bicicletas.....	151
Tabela 6.4 – Dados de saída do programa “Clarke Wright” para motocicletas.....	152
Tabela 6.5 – Medidas de dispersão das soluções apresentadas pelo programa “Clarke Wright” para o uso de bicicletas.....	153
Tabela 6.6 – Medidas de dispersão das soluções apresentadas pelo programa “Clarke Wright” para o uso de motocicletas.....	154
Tabela 6.7 – Variação nos valores nas variáveis de saída em função das soluções encontradas pelo programa “Gera_Distritos”.....	156
Tabela 6.8 – Variação nos valores nas variáveis de saída em função das soluções encontradas pelo programa “Clarke Wright”.....	157

Tabela 6.9 – Variáveis consideradas na análise comparativa entre as soluções dos diferentes programas.....	158
Tabela 6.10 – Ganhos obtidos pelas soluções oferecidas pelos diferentes programas.....	160
Tabela 6.11 – Dados da operação da Kombi.....	162
Tabela 6.12 - Ciclo entre o depósito e os pontos atendidos em cada roteiro do programa “Gera_Distritos” com 4 roteiros.....	163
Tabela 6.13 - Ciclo entre o depósito e os pontos atendidos em cada roteiro do programa “Gera_Distritos” com 6 roteiros.....	164
Tabela 6.14 - Ciclo entre o depósito e os pontos atendidos em cada roteiro do programa “Clarke Wright” com 4 roteiros.....	165
Tabela 6.15 - Ciclo entre o depósito e os pontos atendidos em cada roteiro do programa “Clarke Wright” com 6 roteiros.....	166
Tabela 6.16 – Distância real, tempo real e tempo de ciclo das operações realizadas com bicicleta e motocicleta.....	167
Tabela 6.17 – Dimensionamento de frota.....	168
Tabela 6.18 – Custos operacionais e sociais para a bicicleta e para a motocicleta.....	168
Tabela 6.19 – Ganhos obtidos pela comparação entre os diferentes veículos na operação de estudo.....	169
Tabela 6.20 – Critérios de comparação entre os três veículos considerados para a entrega e/ou coleta de pequenas encomendas.....	171
Tabela 6.21 – Vantagens e desvantagens de cada tipo de veículo na operação estudada.....	172

LISTA DE SIGLAS

Adunicamp – Associação de Docentes da UNICAMP
ANTP – Associação Nacional de Transportes Públicos
B2B – Business-to-business
B2C – Business-to-consumer
BC – Biblioteca Central da UNICAMP
Bike – Bicicleta
BNDES – Banco Nacional do Desenvolvimento
CAD – Computer-aided design
CADI – Comissão de Avaliação e Desenvolvimento Institucional da UNICAMP
CAISM – Centro de Atenção Integral à Saúde da Mulher da UNICAMP
Cap. Vol. – Capacidade Volumétrica
CBMEG – Centro de Biologia Molecular e Engenharia Genética da UNICAMP
CC – Cilindradas
CCS – Centro de Componentes Semicondutores da UNICAMP
CCUEC – Centro de Computação da UNICAMP
CD – Centro de Distribuição
CDC – Coordenadoria de Desenvolvimento Cultural da UNICAMP
CDMC – Centro de Documentação de Música Contemporânea da UNICAMP
CDS – Compact Disk
CE – Código da Estrada
CEB – Centro de Engenharia Biomédica da UNICAMP
CECI – Centro de Convivência Infantil da UNICAMP
CECOM – Centro de Estudos de Conjuntura e Política Econômica da UNICAMP
CEDES – Centro de Estudos Educação e Sociedade da UNICAMP
CEI – Centro de Educação Internacional da UNICAMP
CEL – Centro de Ensino de Línguas da UNICAMP
CEMEQ – Centro para Manutenção de Equipamentos da UNICAMP
CEMIB – Centro Multidisciplinar para Investigação Biológica da UNICAMP
CENAPAD – Centro Nacional de Alto Desempenho em São Paulo da UNICAMP

CEO – Chief Executive Officer
CEPAGRI – Centro de Ensino e Pesquisa em Agricultura da UNICAMP
CEPETRO – Centro de Estudos de Petróleo da UNICAMP
CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CGI – Comitê Gestor da Internet
CGU – Coordenadoria Geral da Universidade da UNICAMP
CIPA – Comissão Interna de Prevenção de Acidentes da UNICAMP
CLE – Centro de Lógica, Epistemologia e História da Ciência da UNICAMP
Cm – Centímetros
Cm³ - Centímetros cúbicos
CMU – Centro de Memória da UNICAMP
CO – Monóxido de Carbono
CO₂ – Dióxido de Carbono
Comvest – Comissão Permanente para os Vestibulares da UNICAMP
CONTRAN – Conselho Nacional de Trânsito
Coppe – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia
CORI – Coordenadoria de Relações Institucionais e Internacionais da UNICAMP
CORI – Coordenadoria de Relações Institucionais e Internacionais da UNICAMP
CPO – Coordenadoria de Projetos e Obras da UNICAMP
CT – Centro de Tecnologia da UNICAMP
CTB – Código de Trânsito Brasileiro
“C W” – Programa “Clarke Wright”
D2D – Door-to-door
DAB – Diretoria de Assistência e Benefícios da UNICAMP
DAC – Diretoria Acadêmica da UNICAMP
DCE – Diretório Central dos Estudantes da UNICAMP
DENATRAN – Departamento Nacional de Trânsito
DGA – Diretoria Geral de Administração da UNICAMP
DGRH – Diretoria Geral de Recursos Humanos da UNICAMP
DLIE – Diretoria de Logística e Infraestrutura de Ensino da UNICAMP
DVDS – Digital Versatile Disk

ECF – European Cycling Foundation
EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Extecamp – Escola de Extensão da UNICAMP
FCM – Faculdade de Ciências Médicas da UNICAMP
FE – Faculdade de Educação da UNICAMP
FEA – Faculdade de Engenharia de Alimentos da UNICAMP
FEAGRI – Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP
FEC – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da UNICAMP
FEEC – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da UNICAMP
FEF – Faculdade de Educação Física da UNICAMP
FEM – Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP
FEQ – Faculdade de Engenharia Química da UNICAMP
FUNCAMP – Fundação de Desenvolvimento da UNICAMP
G/km – Gramas por quilômetro
G/m³ - Gramas por metro cúbico
Gastrocentro – Centro de Diagnóstico de Doenças de Aparelho Digestivo da UNICAMP
“G_D” – Programa Gera_Distritos”
GEE – Gases causadores do efeito estufa
GGTE – Grupo Gestor de Tecnologias Educacionais da UNICAMP
GPS – Global Positioning System
GR – Gabinete do Reitor da UNICAMP
HC – Hidrocarbonetos
HC – Hospital de Clínicas da UNICAMP
Hemocentro – Centro de Hematologia e Hemoterapia da UNICAMP
I.P. – Instituto Público
IA – Instituto de Artes da UNICAMP
IB – Instituto de Biologia da UNICAMP
IC – Instituto de Computação da UNICAMP
IEL – Instituto de Estudos da Linguagem da UNICAMP
IF – Instituto de Física da UNICAMP
IFCH – Instituto de Filosofia e Ciências Humanas da UNICAMP

IG – Instituto de Geociências da UNICAMP
IMECC – Instituto de Matemática, Estatística e Computação Gráfica da UNICAMP
IMT, I.P. – Instituto da Mobilidade e dos Transportes, IP
INOVA – Agência de Inovação da UNICAMP
IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
IQ – Instituto de Química da UNICAMP
Kg – Quilograma
Km – Quilômetro
Km/ano – Quilômetros por ano
Km/h – Quilômetros por hora
KML – Keyhole Markup Language
Kombi – Kombinationsfahrzeug
LABEURB – Laboratório de Estudos Urbanos da UNICAMP
LABJOR – Laboratório de Estudos Avançados em Jornalismo da UNICAMP
LIFO – Last In First Out
M³/ano – Metros cúbicos por ano
Min – Minutos
Moto – Motocicleta
MP – Materiais particulados
NEPA – Núcleo de Estudos e Pesquisas em Alimentação da UNICAMP
NEPAM – Núcleo de Estudos e Pesquisas Ambientais da UNICAMP
NEPO – Núcleo de Estudos de População da UNICAMP
NEPP – Núcleo de Estudos e Políticas Públicas da UNICAMP
NIED – Núcleo Interdisciplinar de Informática Aplicada à Educação da UNICAMP
NIPE – Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético da UNICAMP
NMHC – Hidrocarbonetos não-metano
NO_x – Óxido de nitrogênio
Opt - Optimization
PA – Pesos Aditivos
PC – Pesos combinados
PG – Procuradoria Geral

PM – Pesos Multiplicativos
PRDU – Pró-Reitoria de Desenvolvimento Universitário da UNICAMP
PRE – Pró-Reitoria da UNICAMP
PROCONVE – Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores
ProdeCAD – Programa de Integração e Desenvolvimento da Criança e do Adolescente da UNICAMP
PRP – Pró-Reitoria de Pesquisa da UNICAMP
PRPG – Pró-Reitoria de Pós-Graduação da UNICAMP
PT – Pesos de potência
R\$ – Reais
R\$/km – Reais por quilômetro
RJ – Rio de Janeiro
RMS – Root Mean Square
RMSP – Região Metropolitana de São Paulo
RS – Rio Grande do Sul
RTV – Rádio e Televisão da UNICAMP
SAD – South American Datum
SAE – Serviço de Apoio ao Estudante da UNICAMP
SAPPE – Serviço de Assistência Psicológica e Psiquiátrica ao Estudante da UNICAMP
SEBRAE – Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
SG – Secretaria Geral da UNICAMP
SIARQ – Sistema de Arquivos da UNICAMP
SIG – Sistema de Informação Geográfica
SO_x – Óxidos de enxofre
SP – São Paulo
SST – Serviço de Segurança do Trabalho da UNICAMP
STU – Sindicato dos Trabalhadores da UNICAMP
Ton/ano – Tonelada por ano
UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro
UTM – Universa Transversa de Mercator

LISTA DE SÍMBOLOS

(B) – Bicicleta

(M) – Motocicleta

t_d - tempo de descanso.

t_e - tempo de espera;

t_i - tempo de ida;

t_v - tempo de volta;

w_i – Peso do ponto em um plano

“C W” – Programa “Clarke Wright”

“G_D” – Programa “Gera_Distritos”

Σ – Somatória total

CCT – Custo por quilograma transportado

C_{ij} – Custo de ir de um ponto i para um ponto j

CTT – Custo da carga total transportada

D – Depósito

K_d ou k – Coeficiente de distância

M – conjunto arbitrário de distritos

M – Número de Distritos

Min – Minimizar

N – Número de pontos a serem atendidos no roteiro

N – Número do ponto de coleta e entrega das unidades da UNICAMP

P – Conjunto de pares de pontos

P – Medida de peso ou população

R^2 - Conjunto de pares ordenados de números reais

TPar – Tempo médio de parada

V.M. – Voronoi com pesos multiplicativos

V.S. – Voronoi Simples

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações iniciais

Atualmente, as manchas urbanas tendem a crescer, já que vem ocorrendo uma concentração populacional nas cidades, decorrente de migração do campo para os grandes centros. As cidades maiores vão se transformando em regiões metropolitanas e estas, por sua vez, em megalópoles.

O abastecimento desses conglomerados urbanos e o impacto que ele acarreta no tráfego demonstram grande necessidade de se buscar um processo alternativo de transporte de carga que reduza os custos de transporte e o inevitável congestionamento nos horários de pico e que se mostre uma solução sustentável, capaz de reduzir a emissão de poluentes e de melhorar a qualidade da vida dos cidadãos nos principais centros urbanos.

Os operadores logísticos, como entidades de caráter privado, visam ao lucro na sua atividade principal. Buscam, portanto, a minimização de seus custos operacionais, a alta satisfação da clientela e a minimização da poluição produzida pelos veículos, de modo a garantir a sustentabilidade de suas empresas.

O presente trabalho aborda o tema de utilização de *bike couriers* (mensageiros de bicicleta) nas operações logísticas que envolvem pequenas encomendas. Normalmente, esse tipo de serviço é encontrado nos distritos centrais das áreas metropolitanas e consiste em operações em pequena escala de coleta e distribuição de pequenas encomendas em pontos situados nas suas cercanias.

A utilização de bicicletas em determinadas operações de coleta e entrega logística permite obter ganhos ecológicos e econômicos quando comparada à utilização de veículos motorizados para efetuar esses mesmos tipos de operações.

A ideia de base nesse estudo foi elaborar roteiros de distribuição que respeitem as restrições de limites de carga e distância impostos à bicicleta, bem como os limites de tempo relacionados com a operação em questão.

Considerando as questões acima expostas, esta pesquisa tem como objetivo analisar os serviços de entrega e coleta por bicicleta em heurísticas aplicadas a operações logísticas de coleta e entrega de pequenas encomendas nas áreas urbanas, de modo a possibilitar a implementação política deste sistema logístico sustentável em áreas urbanas, encontrar medidas para melhorar o desempenho deste tipo de operação, incentivar uma maior participação deste modal de serviços nas redes logísticas e reduzir as externalidades negativas causadas pelo uso excessivo de veículos motorizados em operações logísticas de pequeno porte.

Para tanto, foram realizadas aplicações de heurísticas que abordam as diferentes metodologias para a divisão de macroáreas em distritos (divisão por distritos), conforme processo proposto por Hojati (1996), Clark e Wright (Novaes, 2007) e diagramas de Voronoi (Novaes, 2007), que permitiram definir roteiros de distribuição capazes de promover uma utilização eficiente do tipo de veículo analisado.

A análise objetiva dos resultados obtidos considerou a aplicação dessas heurísticas numa situação real constituída pela distribuição de pequenas encomendas numa área de pequeno porte.

Este trabalho está estruturado em sete capítulos. O capítulo um é introdutório e apresenta a declaração de pesquisa, os objetivos e a problemática do tema em questão. O capítulo dois mostra a revisão de literatura para estudo e compreensão dos assuntos básicos abordados na pesquisa. O capítulo três apresenta a metodologia empregada na elaboração da pesquisa. O capítulo quatro descreve o cenário selecionado para a aplicação do experimento da pesquisa. O capítulo cinco mostra o procedimento de aplicação dos modelos pretendidos. O capítulo seis descreve uma análise comparativa dos resultados e do desempenho dos modelos. E, por fim, o capítulo sete apresenta as conclusões e apresenta sugestões para futuras pesquisas relacionadas ao tema deste trabalho.

1.2. Apresentação do Problema

A logística está passando por rápidas e constantes mudanças em função da maneira como seus tipos de operação vêm sendo realizados. A forma como esse setor vem operando no mercado de bens e serviços está recebendo cada vez mais atenção em função de questões relacionadas com o meio ambiente e práticas sustentáveis. Há uma grande necessidade de se criar medidas

inovadoras que possibilitem reduzir as externalidades negativas provenientes da distribuição urbana, especialmente pela maneira como o transporte logístico realiza suas operações. A frequente utilização de vans e caminhões nas diversas operações de distribuição urbana acaba incorrendo em aumento da poluição e enormes perdas de tempo e dinheiro em áreas congestionadas para a operação. Pela maneira como a distribuição urbana é realizada, a questão da última milha logística (etapa final de um serviço de entrega de negócio-a-consumidor – B2C) vem ganhando importância e os transportes alternativos na distribuição urbana são estimulados.

Assim sendo, a presente pesquisa busca analisar métodos alternativos que consigam reduzir os problemas relacionados com o modo como o setor logístico vem realizando as operações de distribuição urbana. Para tanto, foi utilizado um estudo de caso aplicado à Seção de Expedição da Universidade de Campinas, responsável pelo recebimento e distribuição de correspondências e documentos, a partir do transporte e da troca de malotes nas unidades internas do campus da Universidade em Campinas.

1.3. Objetivos

Esta pesquisa tem por finalidade estudar a melhoria da mobilidade urbana com vistas à sustentabilidade do setor de transporte. Trata-se de minimizar os transtornos causados pela circulação de pequenas mercadorias em centros urbanos com a adoção de meios de transporte ambientalmente mais saudáveis e a redução do número de veículos de entrega motorizados em circulação.

A proposta desta pesquisa é analisar abordagens que permitam definir roteiros de distribuição de pequenas encomendas no cenário de estudo de caso, com base nos métodos de *Districting*, Clarke e Wright, e diagramas de Voronoi. Trata-se de analisar e aplicar os serviços de coleta/entrega por bicicleta como uma operação alternativa à situação existente, que é realizada por veículo motorizado, demonstrando assim a viabilidade da aplicação de métodos alternativos de definição de zonas e roteiros na distribuição de pequenas encomendas em regiões urbanas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, é realizada uma revisão dos modelos empregados na definição de roteiros para o uso de bicicletas na distribuição de pequenas encomendas. Aqui também são revistos alguns dos conceitos considerados importantes para a resolução do problema de estudo pretendido.

Os principais modelos estudados nesta pesquisa foram o modelo de *Districting* (divisão por distritos), o modelo de roteirização Clarke e Wright das “Economias” e os modelos de diagramas de Voronoi.

Os principais temas explorados nesta pesquisa foram a importância do serviço de transporte de pequenas cargas, a utilização da bicicleta como veículo de transporte de carga, a utilização da motocicleta como veículo de transporte de carga, os custos de emissões de gases poluentes resultantes das operações de transporte logístico, os sistemas de informação geográfica e o programa ArcGIS.

2.1. O Serviço de Transporte de Pequenas Cargas

O serviço de transporte de carga é considerado importante por contribuir com a maior parte das atividades econômicas. Sem a execução desse tipo de serviço, não haveria o deslocamento de bens e pessoas, o que muito dificultaria as atividades de produção e distribuição de bens, assim como o fornecimento de serviços e tecnologias por parte das indústrias e empresas que atuam nesse mercado.

Graças à grande importância que é dada ao serviço de transporte de carga, as empresas atuantes nesse ramo de atividades têm buscado diferenciar a forma como realizam suas operações para obter maior fatia de mercado em suas atividades. Isso, por sua vez, leva-as a aumentar seu nível de competitividade, forçando-as a racionalizar as atividades para acompanhar as crescentes exigências por parte de seus clientes, que passam a exigir maior velocidade e fracionamento nas entregas, juntamente com um tratamento de prestação de serviço personalizado.

Como consequência disso, com base em Monteiro (2004), as empresas de operações logísticas passaram a evoluir de um modelo tradicional (entregas pouco fracionadas com maior volume e menor variedade de carga distribuída em poucos pontos de entrega com o uso de caminhões) para um novo modelo de operações que exige entregas bastante fracionadas, com menor volume e maior variedade de cargas distribuídas em um maior número de pontos de entrega, promovendo entregas do tipo porta-a-porta (*door-to-door*) com o uso de vans.

Uma das formas que essas empresas encontraram de promover uma diferenciação em suas atividades foi através da prestação de serviço de transporte de pequenas cargas e fretes.

Esse tipo de serviço, de acordo com o SEBRAE (2011/2012), configura-se como um transporte de cargas fracionadas dos mais diversos tipos (com exceção de produtos perigosos), realizado com veículos de pequeno porte como:

- caminhonetes e caminhões pequenos, que transportam de 1000 a 4000 quilos;
- furgões e utilitários, que podem transportar cargas de até 1000 quilos;
- carros;
- motos de 125 cc.

As transportadoras que realizam a movimentação dessas cargas fracionadas diferenciam-se das demais empresas do setor pelo baixo volume a ser transportado, pela alta variação de distância a ser percorrida e pela rapidez de entrega (SEBRAE 2011/2012).

Segundo o SEBRAE (2011/2012), o mercado consumidor atendido por essas transportadoras é diversificado. Seus principais clientes são as pessoas físicas e jurídicas que desejam fazer mudanças residenciais ou transportes comerciais, mas também outros tipos de clientes que não possuem veículos próprios para realizar esse tipo de tarefa e/ou necessitam fazer entregas localizadas e com mais rapidez, tais como:

- empresas varejistas;
- distribuidores;
- indústrias de autopeças, pneus, materiais de construções, cosméticos, confecções, farmacêuticos e outros.

Com o passar dos anos, o segmento de transporte de cargas fracionadas e pequenas encomendas vem ganhando bastante importância dentro do setor de logística como consequência do desenvolvimento do comércio eletrônico (e-commerce) e das novas exigências do mercado (no qual o cliente determina quando, como e onde quer receber seus produtos e quanto quer pagar por eles).

O Grupo Abril, por exemplo, passou a investir no aumento da capacidade de entrega de suas mercadorias e na diversificação da maneira como realiza suas entregas.

De acordo com Koike e Malta (2012), o Grupo Abril investiu R\$30 milhões do próprio caixa ~~para ampliar~~ na ampliação de seu centro de distribuição em Osasco (SP) para 50 mil m² e investiu também R\$9 milhões, financiados pelo BNDES, na automatização de suas operações com a compra de um *sorter* (esteira capaz de ler códigos de barra e organizar a carga) a fim de quintuplicar, para 250 mil itens, a sua capacidade diária de entregar pequenas encomendas.

Koike e Malta (2012), em entrevista realizada com Douglas Duran, vice-presidente de finanças e controle da Abril, declararam que o mercado de pequenas encomendas movimenta em média R\$12 bilhões, o que significa uma grande oportunidade de investimento na área de entregas expressas do tipo B2B (*business-to-business*), onde a presença da empresa ainda continua pequena.

De acordo com essas autoras, a Abril tem uma expectativa de que o mercado de entregas de pequenas encomendas cresça dos atuais R\$12 bilhões para R\$30 bilhões em quatro anos, o que, por sua vez, justificaria o enorme interesse do Grupo Abril em reforçar seus investimentos no segmento logístico de pequenas encomendas.

Portanto, como foi destacado, empresas varejistas que comercializam pequenas encomendas passaram a atuar no atendimento do cliente final com vendas pela internet. O cliente, após a compra, não leva a mercadoria, sendo que esta precisa ser entregue. Empresas de maior porte ou com significativa motivação de vendas pela internet demandam serviço de logística específico para o cliente final. Naturalmente, empresas de menor porte empregam o serviço de correio tradicional para a entrega de mercadoria.

Assim, no intuito de acompanhar esse crescimento e, portanto, obter um maior faturamento no setor de entregas, muitas empresas do setor logístico passaram a dar maior atenção ao transporte de pequenas encomendas.

2.2. O Método de *Districting* (divisão por distritos)

Em muitas regiões de grande porte, há problemas que só podem ser solucionados a partir de métodos que permitam subdividi-las em áreas de menor tamanho de acordo com algum critério que possa ser estabelecido como base. E um método bastante utilizado para solucionar tais problemas é o método de *Districting*.

Baseado em Galvão et al. (2004), o problema de *Districting* consiste em particionar um território em distritos a partir de critérios ou restrições a fim de estabelecer processos de planejamento com propósitos administrativos.

Segundo Bozkaya et al. (2003), alguns dos principais critérios de *Districting* são:

- balanceamento ou equidade, para permitir que todos os distritos tenham um valor de peso aproximadamente igualitário;
- contiguidade, para permitir que seja possível viajar de qualquer ponto para qualquer outro ponto dentro de um mesmo distrito sem que seja obrigatório entrar em algum distrito diferente;
- compactidade, para prevenir a formação de distritos que possuam formatos geométricos estranhos, considerando, para este caso, que um distrito deve ser de formato circular ou quadrado, ao invés de alongado;
- respeito aos limites naturais da região, tais como lagos, rios, montanhas, florestas e outros;
- homogeneidade socioeconômica, para assegurar uma melhor representação dos moradores que compartilham preocupações comuns ou pontos de vista semelhantes;
- respeito pela integridade da comunidade, para evitar que algumas comunidades sejam divididas entre diferentes distritos.

Na literatura, há diversas aplicações referentes ao método de *Districting*. A principal literatura desse problema foi iniciada por Hess et al. (1965), que desenvolveram a primeira abordagem de programação matemática para um problema de *Districting* político.

Em seus textos, Hess et al. (1965) desenvolveram uma medida de compacidade e uma heurística de localização de armazém para desenhar distritos políticos constitucionais apartidários. Nesse aspecto, o problema apresentado por esses autores foi modelado como um problema de atribuição com restrições adicionais, onde cada unidade de conjunto populacional precisou ser alocada para um centro de distrito.

Assim sendo, o problema apresentado por Hess et al. (1965) foi solucionado com a aplicação da seguinte heurística:

- 1) definir um conjunto arbitrário de centros de distritos;
- 2) aplicar um algoritmo de transporte para atribuir as unidades de população igualmente aos centros distritais, respeitando as seguintes restrições relacionadas ao problema:
 - a. a demanda (clientes do distrito de enumeração) de cada unidade populacional deve ser a sua população de eleitores;
 - b. a oferta (armazéns dos distritos legislativos) de cada centro deve ser a quota de população de cada distrito;
 - c. o custo mínimo de distância (soma mínima dos quadrados da distância entre cada unidade populacional e seu respectivo centro distrital) deve ser alcançado para cada distrito;
- 3) ajustar uma recombinação de modo que qualquer unidade populacional dividida entre diferentes distritos seja atribuída inteiramente para apenas um dos distritos;
- 4) calcular os centros de gravidade (centroides) de cada distrito;
- 5) retornar à etapa 2 e resolver o problema de transporte com os centros de gravidade calculados na etapa 4, até que ocorra a convergência dos centros;
- 6) definir novos conjuntos arbitrários de centros de distritos.

Com base nessa heurística, Hojati (1996), propôs solucionar um problema de *Districting* político considerando que, dada uma região formada por unidades (pequenos distritos) e conhecendo-se a população de cada unidade, deseja-se dividir a área em m distritos de votantes,

de forma que cada distrito tenha aproximadamente a mesma população de votantes e que os distritos sejam contíguos e compactos.

Além dessa proposta, existem diversas aplicações realizadas pelo método de divisão por distritos em diferentes áreas de pesquisa. Novaes et al. (2007) mencionam que, além da divisão por distritos políticos (em que há um interesse em se desenhar os limites dos distritos eleitorais), que vem recebendo muita atenção na literatura do assunto, existem outras áreas de pesquisa que também passaram a explorar esse método, tais como: a divisão por distritos de escolas, a divisão por distritos de delegacias policiais, a divisão por distritos de territórios de venda, a divisão por distritos de postos de saúde pública e também os métodos de divisão por distritos logísticos.

Dentre esses últimos campos de pesquisa, Novaes et al. (2007) citam a aplicação de uma abordagem de *districting* de operações de espalhamento de sal em estradas, a alocação balanceada de clientes para centros de distribuição e o projeto de roteiros de entrega com múltiplos veículos.

Algumas dessas aplicações são ilustradas pelas figuras 2.1 e 2.2.

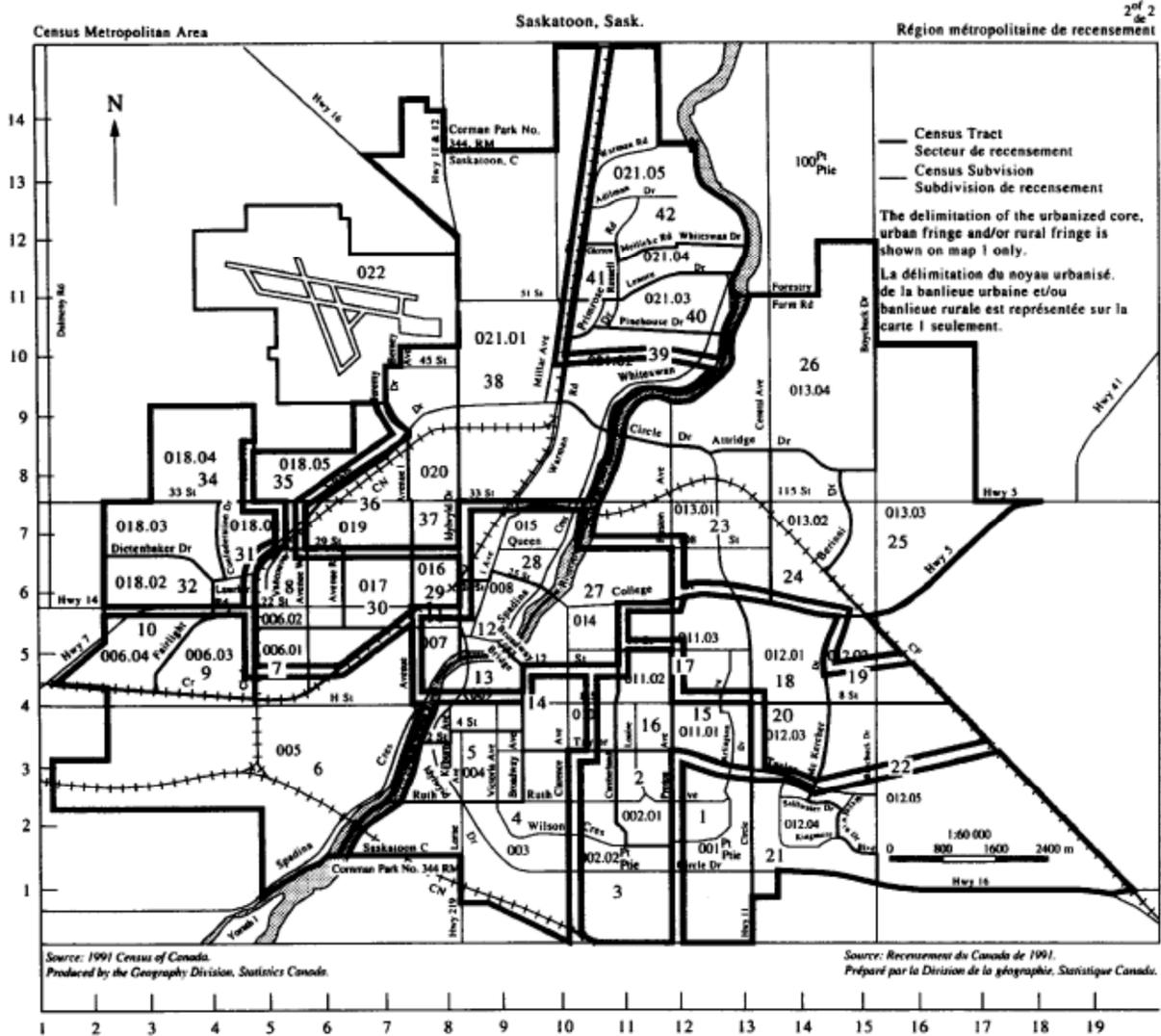


Figura 2.1 – Método de *districting* aplicado na região de Saskatoon, Canadá

Fonte: Hojati (1996)

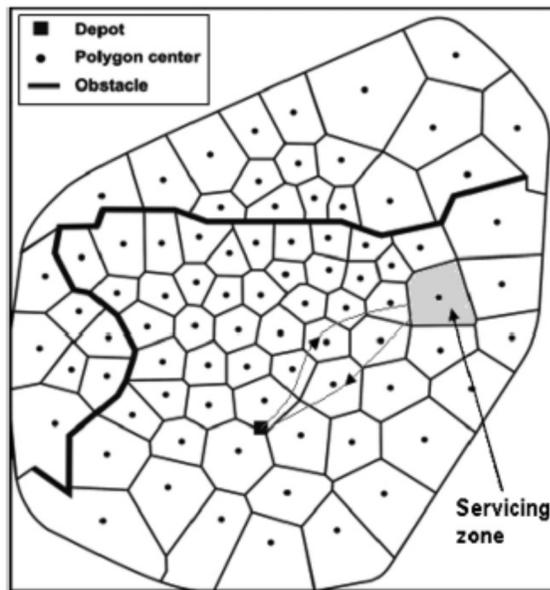


Figura 2.2 – Diagrama de Voronoi com Pesos Multiplicativos aplicado em um *districting* logístico com barreiras
 Fonte: Novaes et al. (2009)

Com base nas figuras acima, pode-se perceber que a aplicação do método de *districting* permite realizar a partição de uma área de grande porte em pequenas regiões, de modo a reduzir as divergências relacionadas com determinado critério de análise e classificação existente nessa mesma área.

Nesse aspecto, quanto ao problema de divisão por distritos políticos (figura 2.1), por exemplo, autores como Hess et al. (1965), Hojati (1996), e Bozkaya et al. (2007) aplicaram métodos de *districting* em suas respectivas regiões de análise no intuito de estabelecer um critério de equidade populacional para satisfazer o problema do voto distrital, na situação em que cada distrito elege um único membro de uma assembleia parlamentar, considerando o princípio de “um homem, um voto” e todos os distritos devem ter aproximadamente o mesmo número de eleitores. Esses autores buscaram encontrar uma forma de particionar seus respectivos territórios de análise em distritos para evitar que essa partição acabasse por favorecer um determinado partido político.

Novaes et al. (2009) também aplicaram um método de *districting* (ver figura 2.2) em um serviço de distribuição urbana em parte da cidade de São Paulo (Brasil), em que definiram o

número de distritos e atribuíram seus respectivos limites aos veículos de entrega de carga, para atender aos objetivos de minimizar os custos totais de entrega diária, equilibrar o esforço de distribuição entre os veículos e respeitar os limites de capacidade de cada veículo.

A partir desses estudos, verifica-se que a aplicação do método de *districting* permite que agentes tomadores de decisão classifiquem e particionem uma determinada região de análise de modo a visualizar múltiplos cenários alternativos para ponderar a relevância dos diferentes critérios a serem considerados nessa região e, por conseguinte, eliminar os critérios que não irão afetar de maneira significativa a solução pretendida.

2.3. O Processo de Roteirização

O processo de roteirização é considerado de grande importância para a área de transportes logísticos.

Segundo Cunha (2000), esse processo pode ser descrito como o método para definir as melhores rotas possíveis de distribuição de bens e serviços, utilizando-se uma frota de veículos para visitar um conjunto de pontos geograficamente dispersos predeterminados que necessitem de atendimento.

Novaes (2007) salienta que, na prática, os projetos de roteirização são utilizados com bastante frequência na distribuição de produtos e serviços. Alguns exemplos de operações de roteirização são:

- coleta de lixo urbano;
- entrega de correspondência em domicílio;
- entrega, em domicílio, de produtos comprados em lojas de varejo ou pela internet;
- distribuição de produtos dos centros de distribuição para lojas de varejo;
- distribuição de bebidas em bares e restaurantes;
- distribuição de dinheiro para caixas eletrônicos de bancos;
- distribuição de combustíveis para postos de gasolina;
- distribuição de artigos de toalete (toalhas, roupas de cama e outros) para hotéis, restaurantes e hospitais;

- distribuição de produtos refrigerados como alimentos, remédios, flores, etc.

E, de acordo Ballou (2006), a elaboração de um projeto de roteirização bem definido pode acarretar uma série de vantagens, tais como:

- fornecer maior segurança no atendimento das exigências de clientes com relação a prazos, datas e horários de atendimento;
- reduzir os problemas de trânsito, acesso, circulação e estacionamento de veículos em centros urbanos;
- aumentar a competição pelo mercado e a busca de eficiência trazida pela eliminação da inflação;
- reduzir os níveis de estoque;
- aumentar a frequência de entregas.

A elaboração de um bom projeto só pode ser feita depois que o problema de roteirização típico estiver solucionado. De acordo com Partyka e Hall (2000), a solução de um problema de roteirização típico depende de três fatores:

- decisões que envolvem a alocação de grupos de clientes para seus respectivos veículos e motoristas, assim como o agendamento e o sequenciamento das visitas a serem realizadas;
- objetivos que envolvem o fornecimento de um serviço de alto nível aos clientes, assegurando, ao mesmo tempo, a manutenção dos custos operacionais e de investimento no nível mais baixo possível;
- restrições que servem para completar as rotas com os recursos disponíveis e dentro dos prazos impostos por turnos de trabalho do motorista, velocidade permitida ao veículo e também os compromissos com os clientes.

Com respeito às restrições de um problema de roteirização, a busca de uma solução eficiente envolve, inicialmente, a definição do tipo de modelo de roteirização a ser tratado, que, segundo Novaes (2007) é definido como:

- um modelo de roteirização sem restrições, segundo o qual as questões de restrição de tempo de operação e capacidade dos veículos empregados já foram resolvidas – o que,

nesse caso, faz com que as estratégias de soluções focalizem o problema de encontrar a sequência de visitas que minimize o tamanho do percurso a ser realizado dentro da região de atendimento;

- um modelo de roteirização com restrições, tais como: janelas de tempo (horários de atendimento); tempo máximo de direção permitido em uma rota; diferença de velocidades entre zonas; barreiras de viagem (lagos, contornos, montanhas); intervalos para o motorista; capacidade dos veículos empregados; a tomada de decisão sobre as operações de coleta e entrega (uma operação deve preceder outra, ou ambas devem estar alocadas no veículo ao mesmo tempo).

Alguns dos problemas relacionados com o processo de roteirização que podem ocorrer com maior frequência são apresentados como exemplos por Cunha (2000) na tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Principais características dos problemas encontrados em um processo de roteirização

Denominação do tipo de problema	Número de roteiros	Localização dos clientes	Limite de capacidade nos veículos	Número de bases	Demandas
Caixeiro Viajante	Um	Nós	Não	Uma	Determinísticas
Carteiro chinês	Um	Arcos	Não	Uma	Determinísticas
Múltiplos caixeiros viajantes	Múltiplos	Nós	Não	Uma	Determinísticas
Roteirização em nós com uma única base	Múltiplos	Nós	Sim	Uma	Determinísticas
Roteirização em nós com múltiplas bases	Múltiplos	Nós	Sim	Múltiplas	Determinísticas
Roteirização em nós com demandas incertas	Múltiplos	Nós	Sim	Uma	Estocásticas
Roteirização em nós com limite de capacidade	Múltiplos	Arcos	Sim	Uma	Determinísticas

Fonte: Cunha, C. B. (2000)

Com base nessa tabela, os problemas de maior destaque relacionados com o processo de roteirização são:

- o problema do caixeiro viajante, que consiste em procurar pelo circuito de viagem que forneça a menor distância de medida. Considera-se uma cidade qualquer como ponto de partida, visitam-se outras cidades precisamente uma vez e regressa-se à cidade representada como o ponto de partida (Cunha, 2000).
- o problema do carteiro chinês, que consiste em encontrar o circuito ou ciclo de menor comprimento que “cubra” cada arco ao menos uma vez. Esse problema consiste em minimizar o comprimento de um circuito por uma escolha criteriosa de quais arestas serão repetidas. Em um caso realista, é necessário considerar os comprimentos dos passeios, ruas ou qualquer coisa que possa representar as arestas. O objetivo é minimizar o comprimento total das arestas revisitadas (Cunha, 2000).

- o problema de roteirização com entregas fracionadas que pode ser considerado como uma variação do problema clássico de roteirização, em que cada cliente pode ser atendido por mais de um veículo e a demanda pode ser maior do que a capacidade do veículo (Cunha, 2000).

Desse modo, é possível observar que existem tipos diferentes de problemas de roteirização que são trabalhados de maneiras diferentes, sendo que, segundo Ballou (2006), alguns deles são elaborados manualmente (sem a ajuda de um programa), empregando-se o método de “Varredura”, ou o método das “Economias”.

2.3.1. O Método de Varredura

O método de varredura pode ser descrito como uma composição de rotas de quilometragem mínima com base na proximidade entre pares de clientes (i,j) , respeitando-se as restrições de tempo de entrega e de capacidade dos veículos.

De acordo com Ballou (2006), esse método é considerado de natureza leve, o que faz com que sua metodologia, quando programada em um programa de computação, consiga resolver problemas com grande rapidez, sem exigir uma grande quantidade de memória.

Como consequência disso, suas questões de tempo (tempo total de uma rota e janelas de tempo) não são tratadas de maneira adequada, o que faz com que seu índice de erro projetado seja de cerca de 10%, dependendo do tipo de problema a ser tratado (Ballou, 2006).

Tais características fazem com que a utilização desse método seja aceitável quando há maior necessidade de se obter bons resultados em curto prazo, ao invés de ótimos resultados em um período maior do que o tempo permitido.

A elaboração do método de varredura tem início a partir de uma análise dos locais de parada do veículo e da sequência a ser seguida entre tais locais. Após essa análise, e com base nas explicações apresentadas por Ballou (2006) e Novaes (2007), o método de varredura é descrito de acordo com o seguinte procedimento:

- Etapa 1. Localizar em um mapa ou grade todos os locais de parada e de depósito.
- Etapa 2. A partir das coordenadas do depósito, traçar uma linha reta em qualquer direção. E, em seguida, girar o eixo dessa linha em torno do depósito em sentido horário ou anti-horário, até ela fazer a intersecção com uma parada do roteiro.
- Etapa 3. Testar o cliente em potencial a partir das seguintes questões, a fim de verificar se o mesmo pode ser incluído no roteiro em formação:
 - (a) o tempo de atendimento do novo cliente excede o tempo de jornada de trabalho do motorista por dia?
 - (b) o volume ou o peso da mercadoria a ser transportada para o cliente em potencial excede o limite de capacidade permitida no veículo?

Se ambas essas questões apresentam respostas negativas e se as restrições de tempo e de capacidade não forem violadas, esse cliente potencialmente seria incorporado ao roteiro. Caso contrário, se alguma dessas questões apresenta resposta afirmativa, deve-se excluir o cliente em potencial e definir o roteiro em formação.

- Etapa 4. Continuar com o procedimento de varredura de linha e começar a criar um novo roteiro a partir do último ponto excluído do roteiro anterior.
- Etapa 5. Finalizar o procedimento de varredura quando todos os clientes tiverem sido incluídos em algum roteiro.

Esse procedimento é ilustrado pela figura 2.3.

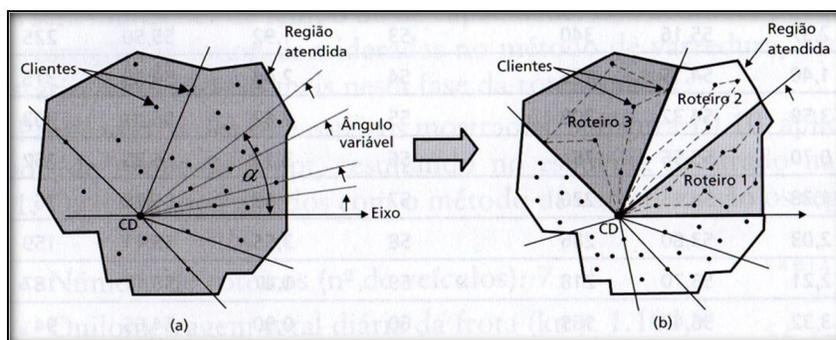


Figura 2.3 – Apresentação do Método de Varredura

Fonte: Adaptado de Novaes (2007)

Segundo Ballou (2006), o método de Varredura tem potencial para proporcionar decisões muito boas quando o roteiro a ser analisado apresentar as seguintes características:

1. a carga a ser transportada para cada ponto de parada representa uma pequena fração da capacidade permitida do veículo;
2. todos os veículos são homogêneos e possuem mesmo tamanho de capacidade de carga;
3. os roteiros a serem analisados não possuem restrições de tempo.

2.3.2. O método Clarke-Wright das “Economias”

De acordo com Ballou (2006), o método Clarke-Wright, baseado na abordagem das economias, vem sendo empregado durante anos como um método dotado de flexibilidade para resolver problemas de roteirização que possuem diversos tipos de restrições práticas e, a partir disso, fornecer soluções que são quase ótimas (com índice de erro projetado de 2% em relação à solução ótima).

O método Clarke-Wright define um roteiro com base nos ganhos obtidos com a combinação de pares de clientes (i,j) em um roteiro, considerando as variáveis $d_{D,i}$; $d_{D,j}$; $d_{i,D}$; $d_{j,D}$; e $d_{i,j}$ como as distâncias entre o CD e os clientes i e j , enquanto respeita as restrições de tempo de entrega e de capacidade do veículo, com o objetivo de obter uma economia na distância total a ser percorrida e no tamanho da frota que será empregada para servir a todas as paradas estabelecidas (Novaes, 2007).

Assim, com base em Novaes (2007), o método das economias de Clarke e Wright é descrito pelas seguintes etapas:

- Etapa 1. Realizar a análise do modelo a partir de duas situações:
 - (a) análise da pior situação, em que um veículo sai hipoteticamente do CD para atender a um único cliente no roteiro e em seguida retorna ao CD. A análise dessa situação busca descobrir a distância máxima que será abordada no problema de roteirização de acordo com a equação 2.1, da distância do roteiro inicial (L), ilustrada pela figura 2.4a;

$$\text{Equação da distância do roteiro inicial} = (L) = d_{D,i} + d_{i,D} + d_{D,j} + d_{j,D} = 2d_{D,i} + 2d_{D,j} \quad (2.1)$$

(b) análise da situação de melhoria, na qual se busca integrar dois clientes i e j em um único roteiro. A análise dessa situação é realizada no intuito de reduzir a quantidade de veículos e a distância de um roteiro de acordo com a equação 2.2, da distância de um roteiro combinado (L'), ilustrada pela figura 2.4b.

$$\text{Equação da distância de um roteiro combinado} = (L') = d_{D,i} + d_{i,j} + d_{j,D} \quad (2.2)$$

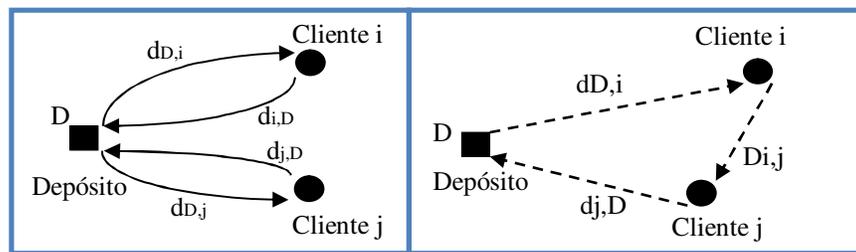


Figura 2.4 – Conceito de cálculo da redução de distância de percurso para o Método das Economias

Fonte: Adaptado de Ballou, R. H.

- Etapa 2. Fazer o cálculo de combinação entre todos os pares de parada do roteiro a partir da equação 2.3, de economia de percurso ($e_{i,j}$) igual à diferença entre L e L' :

$$\text{Equação de economia de percurso} = (e_{i,j}) = L - L' = d_{D,i} + d_{D,j} - d_{i,j} \quad (2.3)$$

- Etapa 3. Ordenar os valores calculados pela equação anterior ($e_{i,j}$) de forma decrescente.
- Etapa 4. Selecionar os pontos que apresentarem maior valor economizado ($e_{i,j}$) para se tornarem um roteiro embrionário (roteiro inicial criado a partir da ligação de dois pontos isolados dentro da área de análise).
- Etapa 5. Tomar como referência o roteiro embrionário criado na etapa 4 para criar novas combinações entre pontos de parada de acordo com as seguintes condições:
 - (a) no caso de ambos os pontos a serem combinados não pertencerem a nenhum dos roteiros iniciados, então deve-se criar um novo roteiro a partir desses dois pontos (entendendo-se,

nessa situação, que esse novo roteiro será considerado como um novo roteiro embrionário). Caso contrário, passar para o item (b);

- (b) no caso de um dos pontos a serem combinados pertencer a algum roteiro e o outro ponto não pertencer a nenhum roteiro, deve-se verificar se o ponto pertencente a algum roteiro é considerado como uma das extremidades (ponto inicial ou ponto final) do roteiro. Se for esse o caso, é necessário fazer a junção e ligar os pontos i e j (considerando-se, nessa situação, que o novo ponto conectado irá se tornar a nova extremidade desse roteiro). Caso contrário, se o ponto pertencente a algum roteiro não for considerado como uma das extremidades do roteiro, passar para o item (c);
 - (c) no caso de ambos os pontos a serem combinados pertencerem a dois roteiros diferentes, é necessário verificar se ambos esses pontos são considerados como extremidades de seus respectivos roteiros. Se for esse o caso, ligar os pontos i e j e fazer a união entre os dois roteiros. Caso contrário, passar para a etapa 6;
 - (d) no caso de ambos os pontos a serem combinados pertencerem a um mesmo roteiro, passar para a etapa 6.
- Etapa 6. Cada vez que um ou mais pontos em um roteiro for(em) ligado(s), ou que houver a união de dois roteiros diferentes em um único roteiro, verificar se a nova configuração satisfaz as restrições de tempo de roteiro e capacidade do veículo. Se os limites dessas restrições forem atendidos, a nova configuração é aceita.
 - Etapa 7. Continuar o processo até que todos os pontos (clientes) tenham sido incluídos em algum dos roteiros. Caso isso ocorra, o processo é finalizado.

A elaboração do método Clarke-Wright é apresentada pela figura 2.5.

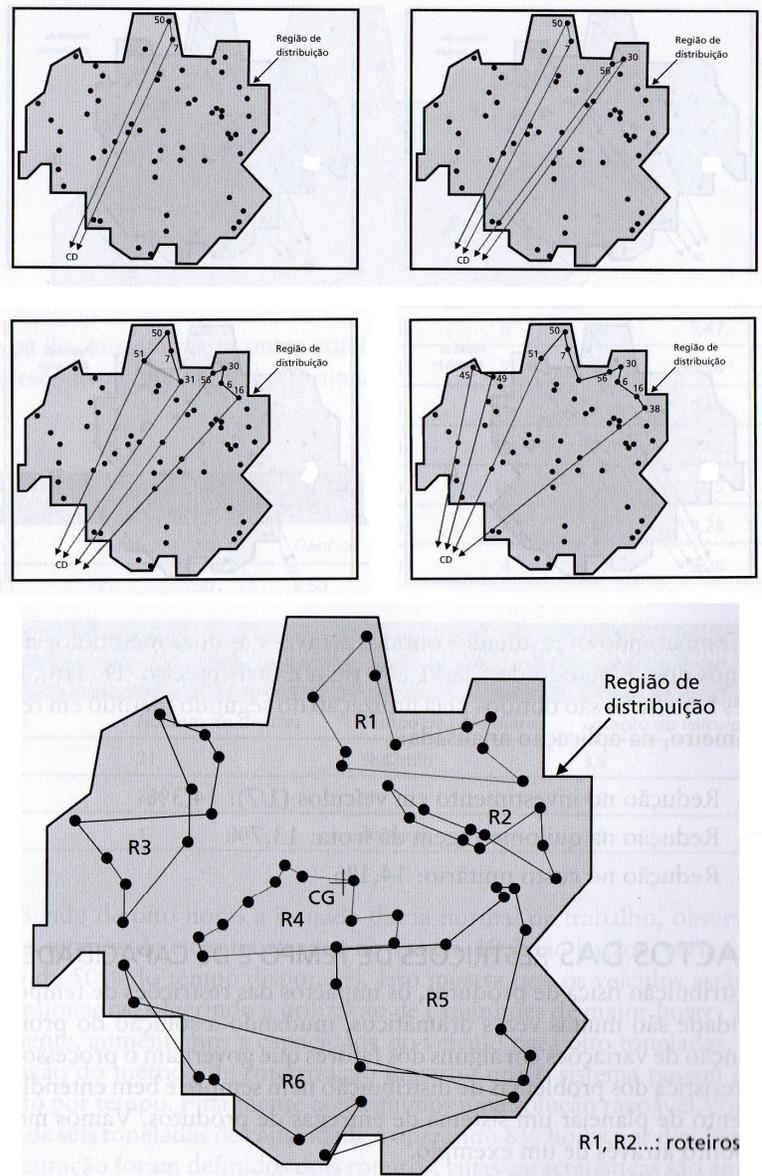


Figura 2.5 – Apresentação do Método de Clarke e Wright

Fonte: Adaptado de Novaes (2007)

2.3.3. Métodos de Melhoria de Roteiros

De maneira genérica, os métodos de melhoria de roteiros utilizam uma sistemática predefinida para refinar soluções iniciais apresentadas pela aplicação de outros métodos quaisquer.

Segundo Cunha et al. (2002), os métodos de melhoria mais utilizados são os métodos do tipo k -opt, conforme proposto por Lin e Kernighan (1973), que buscam obter uma melhoria de roteiro em termos de minimização de distância percorrida, através da remoção e substituição de k arcos de um roteiro anteriormente definido por outro método de roteirização.

Novaes (2007) descreve os métodos de troca 2 -opt (2 arcos) e 3 -opt (3 arcos) como sendo os dois métodos de melhoria do tipo k -opt mais utilizados. Segundo esse autor, ambos os métodos 2 -opt e 3 -opt são conceitualmente semelhantes, mas diferentes, sobretudo, na sua ordem de complexidade k e na melhoria de precisão que cada um desses métodos apresenta.

Assim sendo, de forma geral, pode-se dizer que, no método 2 -opt, dois arcos do roteiro são removidos e substituídos por outros dois arcos, desde que a distância total da nova rota formada seja menor do que a distância da rota inicial. Analogamente, o método 3 -opt segue o mesmo procedimento, mas em termos de ordem k , três arcos do roteiro são permutados dessa vez.

A partir dessa ideia e com base em Novaes (2007), o procedimento para efetuar os métodos de melhoria 2 -opt e 3 -opt são descritos a partir das seguintes etapas:

- Etapa 1. Iniciar procedimento de análise a partir da obtenção de um roteiro inicial definido pela aplicação de outro procedimento de formação de roteiro.
- Etapa 2. Remover dois arcos (para o caso de 2 -opt) ou três arcos (para o caso de 3 -opt) do roteiro atual e experimentalmente reconectar os nós por meio de arcos diferentes dos arcos removidos para formar um novo roteiro. Se o novo roteiro apresentar um valor de comprimento menor do que o comprimento do roteiro anterior, substituir o roteiro atual pelo novo roteiro. Caso contrário, continuar com o roteiro atual e tentar o mesmo teste com outros dois arcos, repetindo a etapa 2 e assim sucessivamente.
- Etapa 3. Finalizar o procedimento quando não houver a possibilidade de se executar mais nenhuma melhoria no roteiro.

As figuras 2.6 e 2.7, a seguir, apresentam exemplos de aplicação dos métodos *2-opt* e *3-opt*.

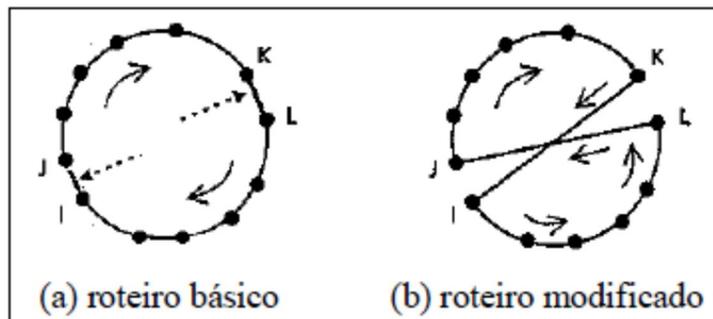


Figura 2.6 – Exemplo de método *2-opt*
 Fonte: Adaptado de Novaes (2007)

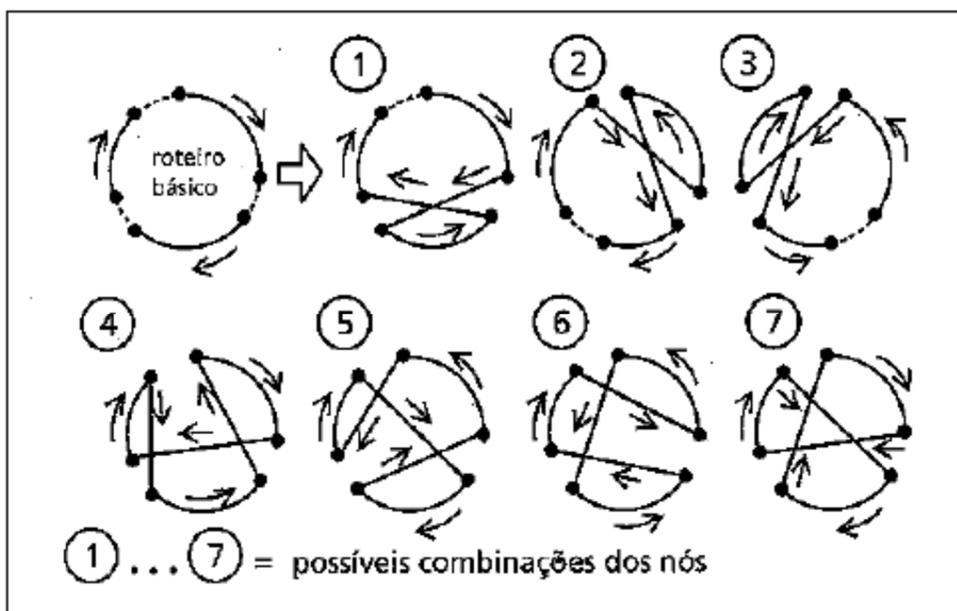


Figura 2.7 – Exemplo de método *3-opt*
 Fonte: Adaptado de Novaes (2007)

Conforme apresentado pelas figuras acima, os métodos *2-opt* e *3-opt* podem ser aplicados em roteiros básicos que tenham sido desenvolvidos a partir de um procedimento simples e rápido de construção de roteiros.

Desse modo, a aplicação desses métodos pode vir a oferecer soluções melhoradas que tenham sido desenvolvidas a partir de métodos básicos de roteirização como os métodos de Varredura e de Clarke e Wright.

A fim de se obter uma solução viável, há diversos outros métodos na literatura que resolvem os diferentes problemas de roteirização, de acordo com os critérios a serem atendidos em cada caso (tempo de viagem, capacidade de carga, tipo de produto a ser transportado, etc.).

Dependendo do nível de complexidade do problema de roteirização, para se conseguir uma solução eficiente que atenda aos critérios estabelecidos pelo caso a ser tratado, é necessário utilizar melhores heurísticas e conhecimentos matemáticos avançados.

No entanto, de maneira geral, muitos dos problemas de roteirização podem ser trabalhados e analisados com o uso de técnicas simples.

2.4. O Diagrama de Voronoi

Grande parte dos problemas de transporte envolvem questões relacionadas com localização de instalações, subdivisão e alocação de grandes áreas em um maior número de pequenas áreas, além de outras questões referentes à proximidade, tais como identificar o local mais próximo a um determinado ponto, o vizinho mais próximo de um determinado local, e muitas outras.

Para solucionar tais problemas relacionados com o conceito de proximidade em um plano, o diagrama de Voronoi é considerado como uma ferramenta eficiente.

Nesse contexto, de acordo com Davis Jr (1999), o diagrama de Voronoi é formado com base na regra de que, dado um conjunto de locais (pontos) em um plano, cada local é associado à região do plano mais próximo desse mesmo local do que de qualquer outro local.

2.4.1. O diagrama de Voronoi Simples

Novaes (2007) descreve que os diagramas de Voronoi simples são definidos em um plano R^2 pela seguinte regra: dado um conjunto específico de n pontos distintos (considerado como o conjunto gerador do diagrama de Voronoi simples, representado por $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$, com $n \geq 2$) em um plano contínuo, busca-se fazer uma associação entre todos os demais pontos desse espaço com o membro que estiver mais próximo do conjunto P .

De acordo com Novaes (2007), sendo $\mu(X, Y)$ a variável que exprime a distância entre dois pontos em uma métrica adequada, e sendo $X, Y \in \mathbb{R}^2$ pontos do plano, o diagrama de Voronoi é definido matematicamente pela fórmula:

$$V(P_j) = \{X \in \mathbb{R}^2 \mid \mu(X, P_j) < \mu(X, P_i), i = 1, \dots, m\} \quad (2.4)$$

A partir disso, o diagrama de Voronoi simples é formado por polígonos constituídos por sequências de arestas e vértices, sendo que o número de arestas que se conectam a um vértice do diagrama de Voronoi simples é denominado grau do vértice. De acordo com Moura (2009), esses polígonos resultantes podem ir além de uma simples divisão de área e ser deformados por características ambientais, tais como o atrito e a influência das massas de seus pontos geradores, para que com isso possam organizar o espaço e definir a área de influência dos pontos analisados no mapa de estudo.

Um exemplo de diagrama de Voronoi simples é apresentado pela figura 2.8, que considera a distância euclidiana entre dois pontos, com $\mu(X, Y) = \|X - P_j\|$, resultando em sub-regiões formadas por polígonos convexos (Novaes, 2007).

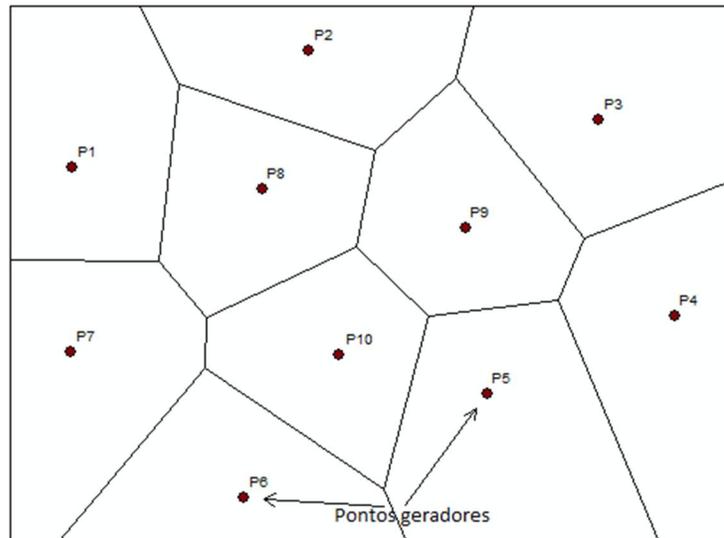


Figura 2.8 – Diagrama de Voronoi Simples

Fonte: ArcGIS (2013)

A figura 2.8 apresenta um diagrama de Voronoi simples com dez locais (polígonos). Os sete polígonos externos da figura se estendem infinitamente no plano e, por esse motivo, são desenhados como figuras abertas. Cada aresta desse diagrama constitui um lugar onde os pontos são equidistantes em relação a dois locais, sendo que os vértices dos polígonos estão ligados a três ou mais arestas, o que mostra que esses vértices são pontos de equidistância entre três ou mais locais.

2.4.2. Os diagramas de Voronoi Ponderados

De acordo com Novaes (2007), há situações nas quais podem não ser apropriados os pressupostos de que a distância Euclidiana não representa bem o processo de atração dos pontos geradores e de que todos os pontos geradores são idênticos e possuem um valor idêntico de ponderação.

Situações como essas podem ocorrer em cenários como:

- uma cidade grande com regiões de tamanhos semelhantes, mas que possuem diferentes níveis de emissão de poluentes de acordo com o volume de tráfego ou do tipo de veículo que nelas circula;
- um shopping center com lojas de varejo que vendem produtos semelhantes, mas onde o nível de atração pode depender de atributos como preço ou marca do produto.

Para situações como essas, é necessário assumir que os pontos geradores possuem pesos diferentes que refletem nas propriedades de suas variáveis. Se esses pesos forem levados em consideração, então é necessário fazer uso da aplicação de diagramas Voronoi ponderados. Dependendo da situação a ser aplicada, esses métodos podem variar entre diagramas de Voronoi com pesos multiplicativos (Voronoi-PM), pesos aditivos (Voronoi-PA), pesos combinados (Voronoi-PC), ou pesos de potência (Voronoi-PT) (Okabe et. Al, 2000).

De acordo com Okabe et. Al (2000), dentre esses tipos de diagramas de Voronoi ponderados:

- o diagrama de Voronoi-PM (figura 2.9) é representado pela fórmula:

$$\mu(X, P_i) = \frac{1}{w_i} \| X - P_i \|, \quad (2.5)$$

onde a variável $w_i (i = 1, 2, \dots, m)$ apresenta um conjunto de números unicamente positivos e os limites das sub-regiões formadas por esse tipo de diagrama podem ser convexos, conectados, ou até mesmo apresentar espaços vazios (Novaes, 2007);

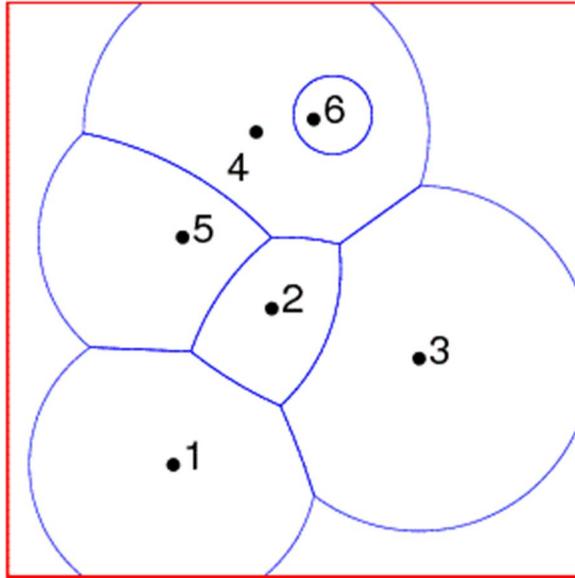


Figura 2.9 – Diagrama de Voronoi com Pesos Multiplicativos

Fonte: Kwok (2010)

- o diagrama de Voronoi-PA (figura 2.10) é representado pela fórmula:

$$\mu(X, P_i) = \| X - P_i \|^{-w_i}, \quad (2.6)$$

na qual o sinal w_i pode ser tanto positivo quanto negativo, de acordo com o problema a ser aplicado, e os limites das sub-regiões formadas por esse tipo de diagrama podem apresentar segmentos de curvas hiperbólicas ou segmentos de retas em casos particulares (Novaes, 2007);

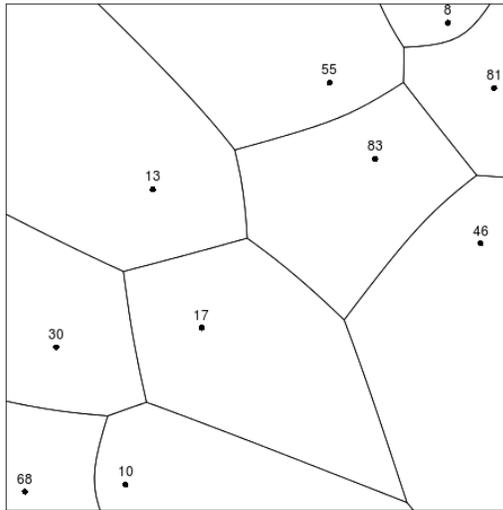


Figura 2.10 – Diagrama de Voronoi com Pesos Aditivos

Fonte: Murrel (2010)

- o diagrama de Voronoi-PC, que é representado pela fórmula:

$$\mu(X, P_i) = \frac{1}{w_{i1}} \| X - P_i \| - w_{i2}, \quad (2.7)$$

atribui ao sinal w_{i2} também valores positivos e negativos, de acordo com o problema a ser aplicado, e os limites das sub-regiões formadas por esse tipo de diagrama podem apresentar formas geométricas bastante complexas (Novaes, 2007);

- e, por fim, o diagrama de Voronoi-PP (figura 2.11) é representado pela fórmula:

$$\mu(X, P_i) = \| X - P_i \|^2 - w_i, \quad (2.8)$$

sendo que os limites das sub-regiões formadas por esse tipo de diagrama podem apresentar segmentos de retas perpendiculares (Novaes, 2007).

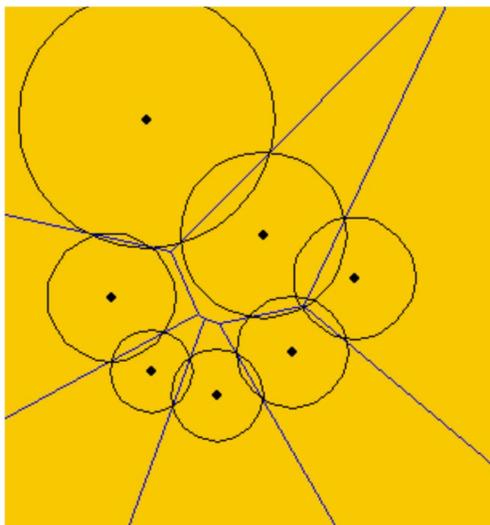


Figura 2.11 – Diagrama de Voronoi com Pesos de Potência

Fonte: Seegmiller e Smith (2001)

2.4.3. Exemplos de aplicações de diagramas de Voronoi

Há diversas aplicações de um diagrama de Voronoi para solucionar os problemas logísticos relacionados com questões referentes a localização, proximidade e/ou subdivisões de locais em diferentes regiões.

Novaes (2007), por exemplo, aplicou o diagrama de Voronoi (figura 2.12) para solucionar um problema hipotético a respeito de localização e quantidade de estações ao longo de um trecho de linha de metrô. Neste caso, o objetivo foi determinar o número de estações do metrô e suas localizações ótimas no intuito de maximizar o total de passageiros que potencialmente podem ser transportados pelo metro.

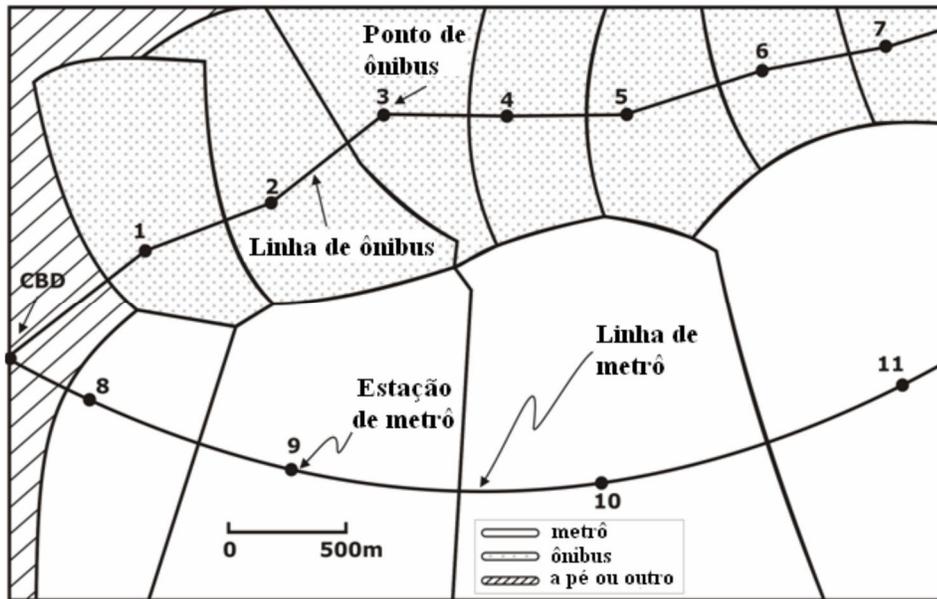


Figura 2.12 – Resultado da aplicação do modelo de localização-alocação com o auxílio de diagrama de Voronoi com Pesos Aditivos

Fonte: Novaes (2007)

Galvão et Al. (2006) aplicaram um Diagrama de Voronoi (figura 2.13) para determinar os limites dos distritos e encontrar a melhor frota de veículos para minimizar os custos totais de entregas diárias na cidade de São Paulo. Para tanto, esses autores utilizaram um modelo contínuo de distribuição de mercadorias partindo de um padrão de zoneamento de formato geométrico, tal como um anel de partição radial auxiliado por um diagrama de Voronoi.

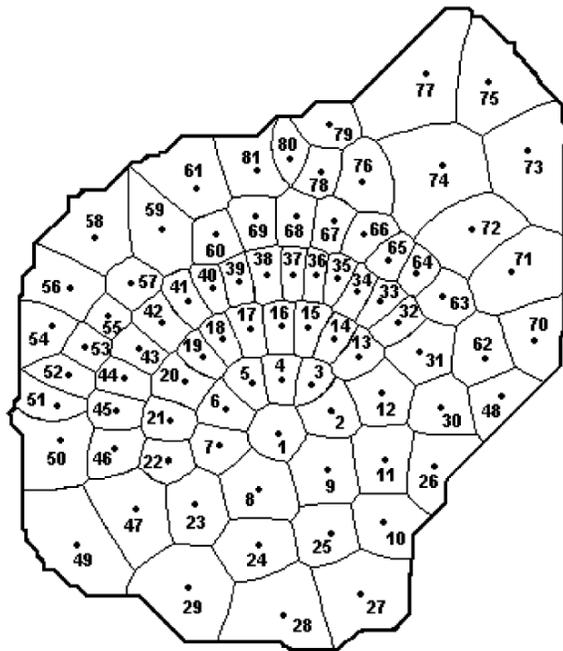


Figura 2.13 – Aplicação do diagrama MW-Voronoi para resolução de um problema de entregas de encomendas em São Paulo

Fonte: Galvão et Al. (2006)

Essa aplicação possibilitou que esses mesmos autores obtivessem uma repartição da região de estudo de maneira a possibilitar uma utilização mais equilibrada do tempo e/ou capacidade em todos os distritos.

Koch e Denike (2004), por sua vez, fazem uma referência à aplicação do Polígono de Voronoi a partir de uma análise do problema apresentado por John Snow a respeito da epidemia de cólera em Londres no ano de 1854. Nesse estudo, Koch e Denike (2004) descrevem a maneira como John Snow realizou um mapeamento de *Soho*, em Londres (1854), para determinar a extensão da epidemia de cólera nessa região de acordo com a direção do curso de água nas bombas de rua. Em seguida, os mesmos autores comparam o processo de mapeamento elaborado por John Snow (figura 2.14a), em que seu mapa é detalhado com linhas tracejadas que representam os limites desenhados em torno da bomba de *Broad Street*, com o diagrama de Voronoi elaborado por Cliff e Hagget em 1988 (figura 2.14b), em que cada centroide de um polígono é uma bomba, e os números em cada polígono referem-se ao número de mortes ocorridas em cada polígono.

Em seu estudo, Koch e Denike (2004) buscaram descrever a aplicação do diagrama de Voronoi para mostrar a espacialização da área afetada pela epidemia de cólera, com o objetivo de apresentar esse caso de epidemiologia e de saúde pública para os estudantes das técnicas de georreferenciamento, como uma área interdisciplinar em comum.

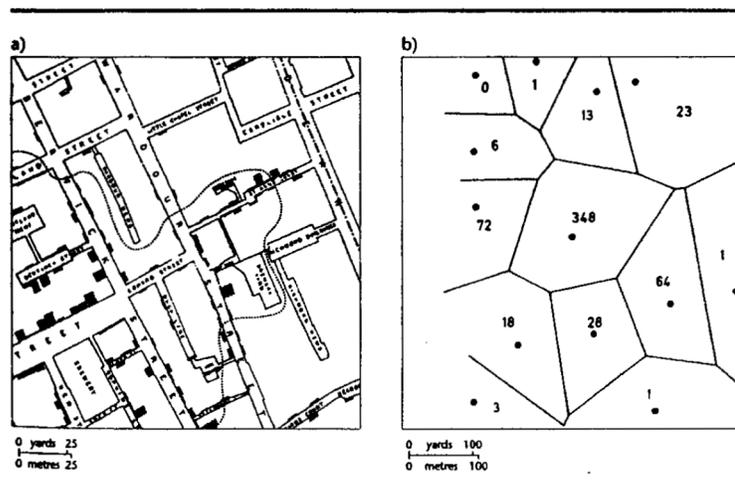


Figura 2.14 – Comparação entre o método de mapeamento da região infectada com cólera por John Snow (1854) e a aplicação do diagrama de Voronoi para análise dos mesmos dados por Cliff e Hagget (1988)

Fonte: Koch e Denike (2004)

Em outro caso, Moura (2009) apresenta o modelo de Voronoi aplicado a um estudo de área de influência das escolas públicas em Ouro Preto, no intuito de verificar se as localizações e os números de vagas nessas escolas encontram-se adequados para cobrir a alta densidade populacional e o alto índice de população em idade escolar em Ouro Preto.

Moura (2009) apresenta diferentes modelos do Polígono de Voronoi aplicados na mesma região de análise pretendida. Esses modelos são apresentados pelas figuras 2.15, 2.16, e 2.17.

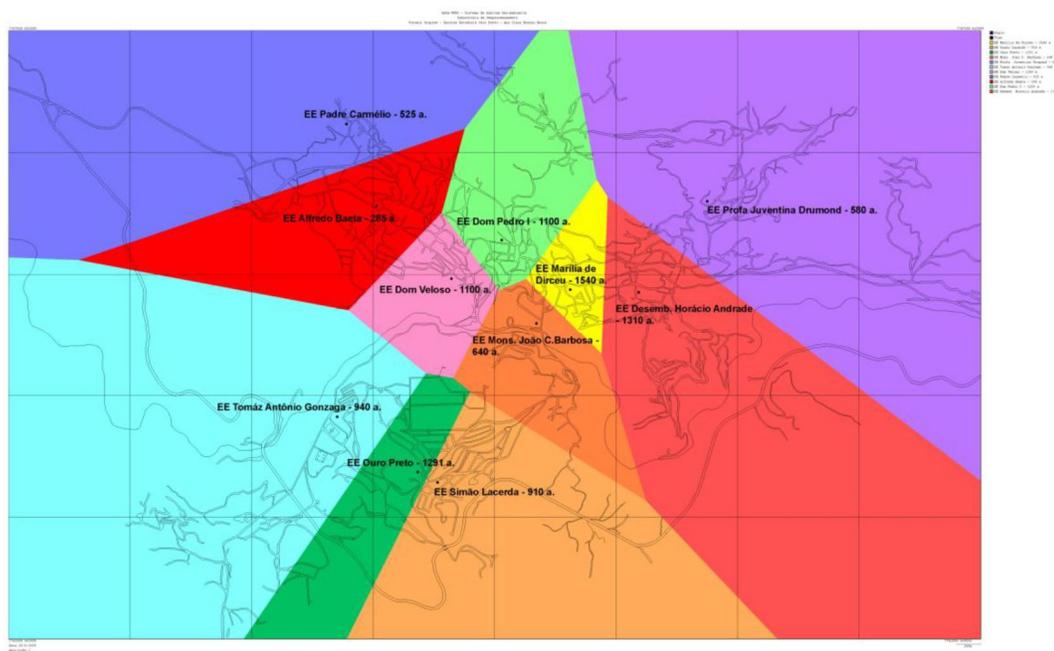


Figura 2.15 – Diagrama de Voronoi Simplex

Fonte: Moura (2009)

Na figura 2.15, foi elaborada uma aplicação do diagrama de Voronoi simples, considerando-se apenas a divisão geométrica do espaço entre os pontos componentes do arranjo, sendo que o resultado foi determinado pelo fator de localização. Essa aplicação foi feita com o objetivo de promover a interpretação das variações e da potencialidade do Polígono de Voronoi, no qual o autor observa que a escola que apresenta uma menor área de influência (mancha amarela) é aquela que possui o maior número de vagas e está mais centralmente localizada. Por outro lado, as escolas com manchas mais ampliadas (mancha roxa e azul ao norte) são as escolas que possuem menos vagas e estão localizadas nas regiões mais periféricas da área de análise. Nesse tipo de diagrama, a redução da mancha amarela se explica pelo fato de haver outras escolas nas suas imediações, o que provoca uma “concorrência” espacial e torna sua área de influência reduzida. Esse mesmo motivo também explica o fato de as três escolas na região mais ao sul (manchas azul claro, verde e laranja) concorrerem pelo espaço, fazendo com que a escola que se encontra no meio das três (a mancha verde) tenha sua influência reduzida pelas vizinhas (manchas azul claro e laranja).

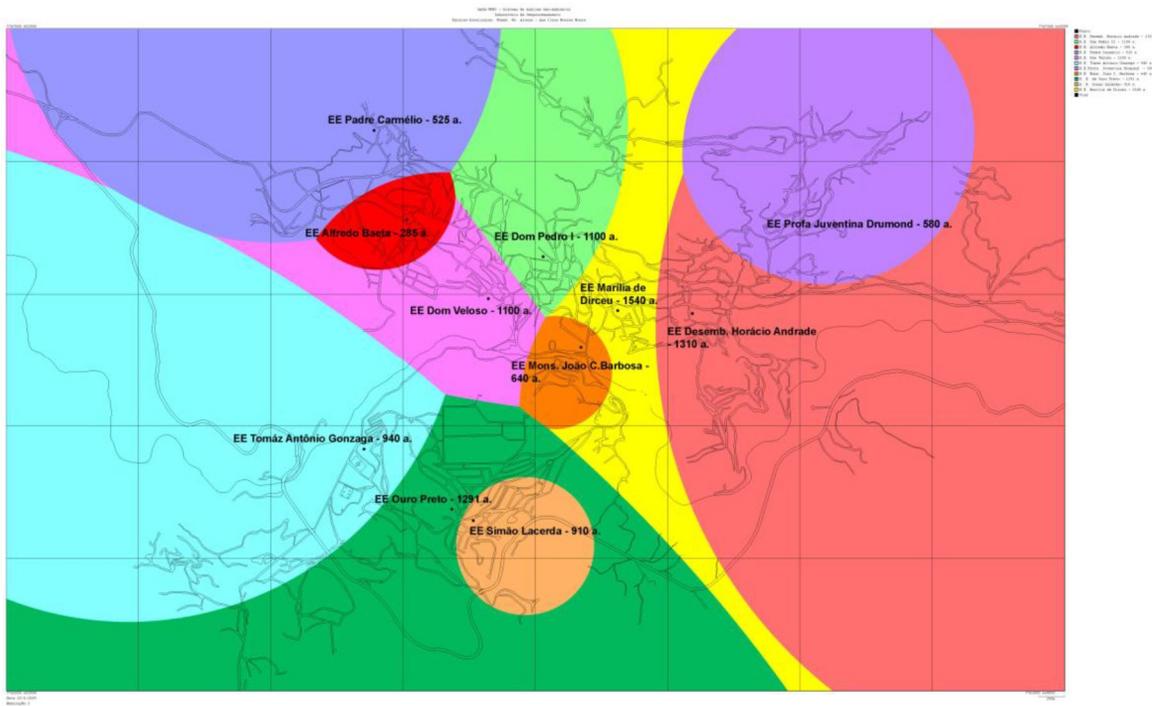


Figura 2.16 – Voronoi Complexo, considerando o fator de massa em cada ponto, representada pelo número de vagas em cada escola

Fonte: Moura (2009)

Na figura 2.16, foi elaborada uma aplicação do diagrama de Voronoi Complexo, incorporando-se, ao diagrama simples, o fator de massa representado pelo número de vagas em cada escola. Nesse diagrama, Moura (2009) explica que as escolas que possuem um número de vagas semelhante, mas encontram-se alocadas na rede de distribuição espacial de modo diferenciado, têm suas áreas de influência ampliadas ou reduzidas. E as escolas que possuem uma concorrência espacial alta e um fator de massa forte, como a localizada na região da mancha amarela, por exemplo, têm a área de influência ampliada.

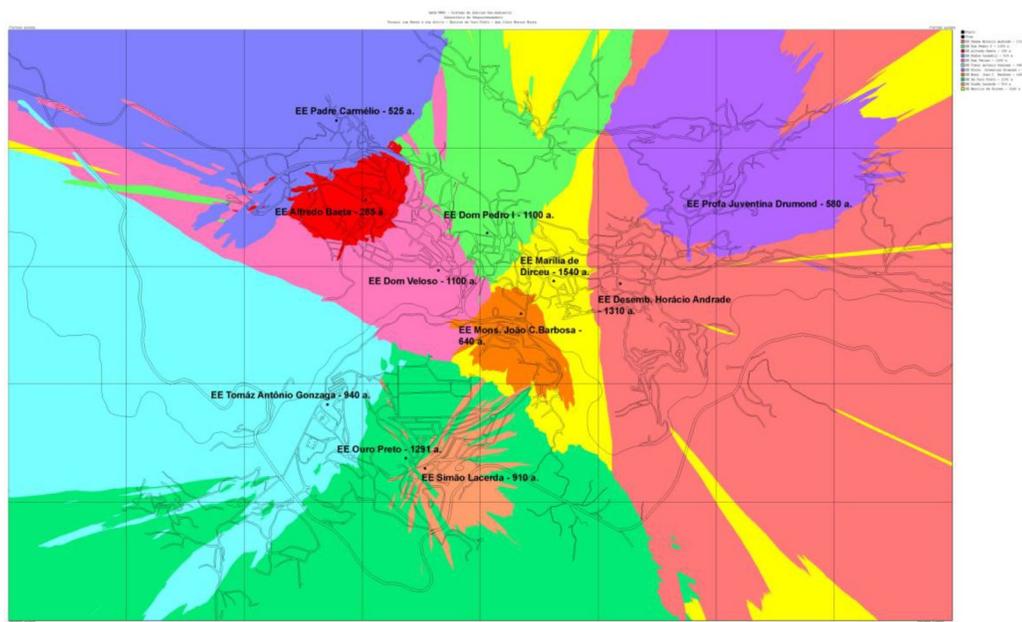


Figura 2.17 – Diagrama de Voronoi Complexo, considerando os fatores de massa e de superfície de atrito

Fonte: Moura (2009)

Na figura 2.17, foi elaborada uma aplicação do diagrama de Voronoi Complexo incorporando-se, ao diagrama simples, tanto o fator de massa quanto a superfície de atrito (resultante de uma análise de multicritério que combinou declividade nas vias, pavimentação, tipo de via e uso do solo). Nesse diagrama, de modo comparativo com o mapa anterior (figura 2.16), Moura (2009) explica que as manchas se ampliam ou se reduzem em função das dificuldades de acesso a determinadas porções dos territórios. Nesse contexto, o autor observa que a região da mancha amarela teve parte da sua área norte tomada pela mancha verde claro, pois esta, por sua vez, não encontrou obstáculos para ampliar sua área de cobertura, aparecendo também nas regiões das manchas roxa e salmão, em função de essas mesmas áreas serem áreas de difícil acesso, fazendo com que a massa de maior influência se tornasse o critério de diferenciação.

Como resultado desse estudo, Moura (2009) sugeriu a aplicação do diagrama de Voronoi como uma maneira de fornecer apoio para a decisão de determinar novas localizações de futuras escolas ou a alocação de vagas.

O diagrama de Voronoi é, portanto, uma estrutura geométrica muito importante, que pode ser aplicada para solucionar problemas de proximidade que, em grande parte, são resolvidos a partir da utilização de ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica.

2.5. A Utilização de Bicicletas como Veículos de Transporte de carga na Cadeia Logística

Em uma época na qual a maioria dos indivíduos está preocupada com problemas relacionados ao meio ambiente e à sustentabilidade, a questão do uso de bicicleta vem ganhando bastante atenção no mercado de operações logísticas.

Considerados como um método de transporte de carga sustentável e como uma solução mais confiável em áreas urbanas congestionadas, os serviços de entrega com o uso de bicicleta vêm sendo bastante utilizados como uma contribuição para agilizar e humanizar a vivência nas grandes áreas metropolitanas.

De acordo com Maes e Vaneslander (2012), os mensageiros de bicicletas (*bicycle messengers*), também conhecidos como entregadores de bicicletas (*bike couriers*), realizam operações de distribuição de pequenas encomendas (como documentos, cartas, contratos, CDS, DVDs e outros) utilizando bicicletas como veículos de carga. Essas operações são mais frequentemente encontradas nas regiões centrais das grandes cidades como São Paulo (empresas *Carbono Zero Courier*, *Pedal Rápido*, *Ecobiker*, *Rotação Máxima*, *Courriers*), Campinas (*Bike Entregas*), Belo Horizonte (*Transpedal Entregas Rápidas*), Rio de Janeiro (*Bike Express*), Porto Alegre (*Bike Entrega*, *Pedal Express*), Recife (*Express Bike*), Curitiba (*Seixas Bikeboy*, *Luiz Felipe Bikeboy*) e Aracaju (*Aracaju Bike Entrega*), onde trabalham em pequena escala, coletando e distribuindo pacotes rapidamente por toda a cidade. Esse tipo de mercado existe por causa das vantagens do ciclismo nas áreas urbanas.

Segundo Maes e Vaneslander (2012), algumas das características gerais das operações de distribuição por bicicleta são as seguintes:

- Em comparação com o transporte por vans ou caminhões convencionais, as operações realizadas por bicicletas cobram menor preço de operação, fornecem prazos de entrega mais curtos e com níveis de serviço mais confiáveis, utilizam veículos não poluentes e

sofrem menos problemas de congestionamento rodoviário, podendo-se dizer que, quanto maior for o congestionamento nas áreas urbanas, maiores serão as vantagens do transporte de correspondência com bicicleta.

- Operações de distribuição com bicicletas não incorrem nos mesmos tipos de fatores de custo que a distribuição com veículos automotivos, tais como combustível, seguro do veículo e impostos.
- A diferenciação de preços é feita geralmente considerando-se três características de um embarque: velocidade, distância e peso, podendo considerar-se também tarifas adicionais de acordo com o tamanho do pacote.
- Suas operações precisam de um período mais estável para fazer determinada trajetória, independentemente das condições meteorológicas, engarrafamentos, horários de pico, ou greves no transporte público.

Assim como os serviços de entrega e coleta de correspondência com bicicleta estão sendo utilizados com eficiência em cidades grandes como Londres e Nova York, também têm sido implementados por algumas cidades brasileiras para realizar entregas de pequenas encomendas. Alguns exemplos dessas práticas no cenário brasileiro são apresentados a seguir.

A partir de uma pesquisa realizada com a empresa *Courriers*, em São Paulo (SP), constatou-se que essa empresa realiza operações de entrega e coleta de pequenas cargas como documentos, cachorros pequenos, vasos, flores, quadros, livros, chocolates e outros, apenas com o uso de bicicletas. Para realizar esse tipo de operação, os ciclistas estabelecem pontos estratégicos em cada região de atendimento, e seus preços e tarifas variam de acordo com o tempo de espera e o tipo de entrega.

De acordo com a própria *Courriers*, o valor dos preços estabelecidos por seus serviços difere de acordo com os seguintes critérios:

- distância percorrida em quilômetros (para a empresa *Courriers*, uma distância boa, ida e volta, para um ciclista efetuar sua operação é de 10 quilômetros, uma distância ótima é de 5 quilômetros, e o limite máximo de distância é de 20 quilômetros);
- tipo de solicitação de serviço (entregas imediatas, ou entregas pré-programadas);

- tempo excedente de espera para que o cliente receba o ciclista entregador (um valor de R\$5,00 é cobrado para cada dez minutos adicionais de espera contados a partir do décimo minuto de espera);
- peso de carga acima de 20 quilos.

Nas entregas simples, por exemplo, os preços são estabelecidos de acordo com a tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Preços estabelecidos para operações de entrega simples

Distâncias do ponto de coleta ao ponto de entrega	Entregas rápidas	Entregas programadas (cliente liga até as 18 horas do dia anterior)
2km ou menos	R\$16,00	R\$14,00
De 2km a 10km	R\$20,00	R\$17,00
De 10km a 15km	R\$26,00	R\$23,00
De 15km a 20km	R\$32,00	R\$28,00

Fonte: *Courriers*, 2012

- Nas entregas de ida e volta (em que o documento ou recibo precise ser transportado de volta ao endereço de coleta), são adicionados 50% do valor de distância de entrega.
- Para as entregas que possuem um ponto de coleta e vários destinos, é cobrado o preço da primeira entrega e um adicional pelo tempo até a realização das demais entregas (dado como mesmo valor cobrado para o tempo de espera). Isso quer dizer que o custo de distância varia apenas entre a distância entre o local de coleta e de primeira entrega, e o preço das demais entregas irá variar de acordo com o tempo necessário para finalizar o resto da operação.

Adicionalmente, foi também informado na entrevista com a *Courriers* que os custos gerais de operação da empresa envolvem:

- custo de alimentação do ciclista, R\$30,00 (por dia);
- salário mensal do ciclista, R\$1500,00;
- compra da bicicleta para cada ciclista, R\$3000,00;
- manutenção mensal da bicicleta, com valor estimado entre R\$75,00 (cenário ótimo) e R\$150,00 (pior cenário), considerando que as bicicletas não precisam ter uma manutenção complexa como carros e motos (motor, freio, carburador, etc.).

Além desses tipos de custos gerais, uma pesquisa realizada pelo engenheiro Marcelo Daniel Coelho, no Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa da Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro - Coppe (Moraes, 2011), demonstrou que a utilização da bicicleta como meio de transporte pode ter um custo até seis vezes menor na comparação ao automóvel e até três vezes menor na comparação com o ônibus. Essa pesquisa foi realizada com a análise de dois indivíduos, um residente no Rio de Janeiro (RJ) e o outro em Porto Alegre (RS), que utilizaram a bicicleta como meio de transporte diário para realizar a locomoção entre casa-trabalho-casa. Os resultados dessa pesquisa estimaram que o valor médio de custo por quilometragem, no deslocamento diário de bicicleta, foi de R\$0,121/Km, enquanto esse mesmo tipo de deslocamento obteve um valor médio estimado de R\$0,763/km para um automóvel movido a gasolina, R\$0,324/km para um ônibus e R\$0,481/km para uma motocicleta.

Ainda conforme Moraes (2011) o estudo de M.D. Coelho apresentou os seguintes custos estimados: a depreciação do veículo (a bicicleta demonstrou uma desvalorização de cerca de R\$200,00 para revenda após quatro anos de utilização), o consumo de combustível (a bicicleta apresentou resultado negativo por não necessitar de combustível) e os custos sociais e de impostos (a bicicleta também apresentou resultados negativos por não haver cobranças oficiais, nem emitir poluentes ou qualquer tipo de impacto negativo para a sociedade).

Contudo, a empresa *Courrieros* ressalta que há custos sociais relacionados com a emissão de CO₂ pelo uso da bicicleta. De acordo com essa empresa, uma pesquisa realizada pela organização ECF (*European Cycling Foundation*, 2011) demonstrou que a utilização de uma bicicleta gera emissão de CO₂ por causa de seu peso (em média de 19 kg) e dos materiais utilizados em sua fabricação (ferro, alumínio e borracha), que duram cerca de oito anos e percorrem uma média de 2.800 km por ano. Além dessas características do veículo, considerou-se que seu usuário também é uma fonte de emissão de carbono, já que um indivíduo que normalmente utiliza a bicicleta como meio de transporte requer uma quantidade maior de alimentos (em média 11 quilocalorias) do que um indivíduo que utiliza o automóvel. E esses alimentos também constituem uma fonte de emissão de carbono. Dessa maneira a empresa desenvolveu estudos que considerando os dados de fabricação, emissão na combustão e alimentação resultou na base de cálculo do nível de emissão de dióxido de carbono, foi estimado

que a bicicleta emite 21 g/km de CO₂, o carro emite 271 g/km de CO₂, o ônibus emite 101 g/km de CO₂ e a motocicleta emite 132 g/km.

Quanto à comunicação entre a empresa e o ciclista, utiliza-se um celular para enviar instruções em geral. Caso haja necessidade de enviar instruções específicas durante o roteiro de viagem, a empresa utiliza um aplicativo próprio para tal função.

No entanto, a empresa recomenda a utilização de um rádio para efetuar operações de distâncias pequenas e recomenda também o uso de *walkie talkie* ou celular para cobrir operações de maiores distâncias (até 20 quilômetros).

Os tipos de bicicletas utilizadas pela empresa no transporte de carga dependem da preferência dos ciclistas. Geralmente, cada ciclista solicita à empresa um tipo de bicicleta para utilizar em suas operações. Dentre os tipos de bicicletas mais solicitados, encontram-se:

- *Mountain Bike*, por causa das marchas que facilitam as pedaladas em terrenos inclinados, levando o ciclista obter melhor desempenho nos aclives e declives das vias por onde passa.
- *Speed*, para efetuar a pedalada com maior velocidade, sendo que esse modelo de bicicleta é mais adequado para dias de clima seco.

Além desses tipos de bicicleta, muitos ciclistas também fazem uso de bicicletas elétricas (*e-bikes*) como modelo de veículo motorizado alternativo.

Em alguns casos, a bicicleta elétrica é utilizada na realização de viagens com maior distância de percurso, como um meio de reduzir o desgaste físico do ciclista. Nesse aspecto, a bicicleta elétrica serve como um modelo prático que apresenta melhor desempenho nas subidas do que os modelos de bicicletas convencionais.

Segundo a revista Bicicleta (2012), a bicicleta elétrica se diferencia da bicicleta normal por causa do auxílio elétrico, no qual a força de tração provém de um conjunto misto onde atuam as fontes de energia humana (músculos do ciclista) e a energia elétrica (baterias, onde o mecanismo de ação é um motor elétrico).

Nesse contexto, há dois grupos de bicicletas elétricas: o das bicicletas elétricas sem acelerador (também chamadas de *Pedelecs*), nas quais o auxílio elétrico vem do sistema PAS (sensor para auxílio a pedal), que automaticamente ativa o motor conforme o ciclista pedala, fazendo com que a bicicleta só se locomova a partir do ato de pedalar; e o grupo das bicicletas elétricas com acelerador, que possuem as opções de só acelerar, só pedalar, ou combinar a aceleração e o pedal (Revista Bicicleta, 2012).

Por causa dessas características, as bicicletas elétricas conseguem servir como um veículo motorizado alternativo para o transporte de pequenas cargas e para o deslocamento de indivíduos aos locais de trabalho.

Adicionalmente, os tipos de equipamentos utilizados pelos ciclistas da *Courriers* efetuarem suas operações de entrega e/ou coleta são os seguintes:

- capacete, como o equipamento mais importante para manter a segurança do próprio ciclista durante a operação;
- óculos de sol, para proteger a visão contra o sol forte e a poluição do ar;
- camisa leve e shorts de ciclismo, para manter o corpo refrescado durante a corrida;
- equipamentos de manutenção rápida como câmara reserva, bomba, alavanca, canivete de ferramentas;
- garrafinhas de água, para manter o ciclista hidratado durante a operação;
- luvas para proteger as mãos caso o ciclista caia da bicicleta;
- corrente com cadeado, para manter a bicicleta em segurança no momento de entrega no cliente;
- malas e mochilas impermeáveis, para impedir que a chuva inviabilize a carga (em caso de chuva, o ciclista deve realizar o roteiro de viagem e cumprir a operação tal como estabelecido pelo acordo da empresa com o cliente).

Alguns desses equipamentos são ilustrados pela figura 2.18:



Figura 2.18 – Equipamentos de segurança para a operação de entrega e coleta com bicicleta

Outros equipamentos relacionados com o rendimento da operação são:

1. a bateria de bicicleta elétrica;
2. o reboque da bicicleta;
3. um bagageiro, ou suporte para alforje;
4. uma cesta de engradado para a bicicleta, a ser instalado no bagageiro.

Esses equipamentos são ilustrados pela figura 2.19.



Figura 2.19 – Equipamentos e acessórios auxiliares da bicicleta para operações de distribuição de carga

Durante a entrevista com a empresa *Courrieros*, foi salientado que, entre esses tipos de equipamentos, o reboque da bicicleta suporta uma carga de até 35 quilos e tem dimensões de 157 cm de comprimento, 45 cm de largura e 42 cm de altura; o bagageiro (ou suporte para alforje) suporta uma carga de até 25 quilos; e a cesta de engradado suporta 60 quilos (no chão) e tem dimensões de 74 cm de comprimento, 54 cm de largura e 29 cm de altura.

E, por fim, quanto à velocidade, de acordo com a Empresa *Courrieros*, a velocidade média de uma operação de entrega e coleta com bicicleta pode depender do volume de tráfego nas vias, do preparo físico do ciclista, do perfil da carga, do equipamento empregado no transporte de carga (reboque, bagageiro, etc.) e também do tipo de bicicleta utilizado na operação de coleta e/ou entrega de cargas.

Para um cenário de operação mais frequente, a empresa supôs uma velocidade que pode variar de 15 km/h até 35 km/h, sendo que a velocidade média de uma bicicleta elétrica se mantém em torno dos 25 km/h, que uma *mountain bike* é pedalada em torno de 20 km/h e que uma bicicleta *speed* é pedalada em torno de 25 km/h, podendo chegar até 35 km/h.

Em resumo, a utilização de serviços de entrega e coleta com bicicleta representa um apelo ambiental para o problema de veículos de distribuição motorizados. Esses serviços possuem um conceito de contar com um tipo de veículo limpo e não poluente que é mais flexível para a locomoção e o estacionamento, e que também ajuda no aquecimento econômico e de fomentar o estímulo social ao uso da bicicleta em centros urbanos.

2.6. A Motocicleta como Veículo de Transporte de Pequenas Encomendas

Nas grandes cidades e metrópoles, o ser humano adquiriu uma cultura de rapidez e imediatismo. Uma das consequências disso está na exigência de um serviço de entrega rápido e seguro. Para suprir essa necessidade, foi criado um mercado de serviço de entrega de pequenas encomendas por meio da motocicleta.

Segundo Vasconcelos (2008), a maior parte das motocicletas em trânsito, principalmente em cidades com alto grau de congestionamento, é utilizada para realizar serviços de entrega de pequenas encomendas. Esse tipo de mercado de serviços (os *motoboy*s) foi criado para atender a

dois tipos de interesses: a entrega rápida de mercadorias e a oferta de novas oportunidades de emprego para jovens que possuem baixo nível de escolaridade.

A grande quantidade de *motoboys* que existe no trânsito das cidades gera problemas e externalidades negativas, tanto para os motoristas e pedestres como para os próprios moradores das regiões por onde o motociclista realiza seu roteiro de serviços.

Para Vasconcelos (2008), muitos desses *motoboys* geram graves acidentes em trânsito para os motoristas e pedestres devido ao modo como conduzem seus veículos: em altas velocidades, serpenteando entre automóveis e ônibus para chegar rapidamente a seus destinos, desrespeitando sinais vermelhos, saindo da posição estacionária no semáforo sem prestar atenção aos pedestres durante o cruzamento entre calçadas, além de utilizarem calçadas para contornar veículos parados.

De acordo com Vasconcelos (2013), depois que houve a liberação do tráfego da motocicleta entre as filas de veículos, a liberdade de circulação desse tipo de veículo tornou-se completa e, por consequência, os motociclistas passaram a circular por locais que consideravam mais adequados para os seus interesses. Considerando, junto a isso, problemas como a leniência da fiscalização do artigo 29 do CTB, que declara que o condutor deve guardar uma distância segura entre o seu veículo e os demais, uma ausência de processos adequados de educação e de preparação dos motociclistas e o desrespeito generalizado no trânsito, criaram-se condições para que os usuários de motocicleta projetassem a sua mobilidade em condições altamente perigosas.

Além disso, Vasconcelos (2013) salienta também, a partir do conceito mecânico do ato de circulação de pessoas e veículos, que a inserção abrupta e desregrada de um novo veículo, mais leve e mais rápido, no meio da circulação de pedestres, ciclistas e veículos motorizados que já circulavam nesses fluxos, quebrou o equilíbrio dinâmico do trânsito. Considerando-se a enorme diferença de peso (uma motocicleta pesa 120 quilos, enquanto um carro pesa mil quilos, um ônibus com 20 passageiros pesa 10 toneladas e um caminhão médio com carga pesa 15 toneladas), é possível perceber que a relação entre as energias cinéticas dos veículos em movimento muda drasticamente, de maneira extremamente desfavorável aos usuários das motocicletas, de modo que um possível choque entre um automóvel e uma moto em uma

velocidade média de 40 km/h pode resultar em um acidente gravíssimo para o ocupante da motocicleta.

De acordo com Vasconcelos (2013), diversos estudos foram realizados no Brasil para comprovar os fatos de que a motocicleta produz uma quantidade maior de feridos por acidentes do que os demais veículos em trânsito e de que os ferimentos infligidos aos seus ocupantes, os motociclistas, são muito mais graves do que os acidentes infligidos aos ocupantes de veículos convencionais (como automóveis e ônibus, por exemplo), nos quais o condutor não está exposto.

Em uma pesquisa realizada em quatro grandes cidades brasileiras em 2002 pelo IPEA e ANTP, constatou-se que 7% dos acidentes de automóvel causavam vítimas de algum tipo e que, no caso das motocicletas, esse valor subia para 71%, demonstrando assim que o custo médio de um acidente provocado por uma motocicleta é muito superior ao custo médio do acidente provocado por um automóvel.

Adicionalmente, outro estudo desenvolvido por Martins e Biavati (2009) declarou que a quantidade de motocicletas correspondia a 13% da frota de veículos em trânsito, mas que elas se encontravam envolvidas em 37% dos acidentes, o que fazia com que esse tipo de veículo fosse responsável por 37% das mortes e 22% dos atropelamentos fatais na cidade de São Paulo.

Desse modo, é possível perceber que a motocicleta é um veículo que possui um alto índice de acidentalidade dentre os diferentes tipos de veículos que trafegam em vias públicas.

Além disso, o uso da motocicleta também é responsável pelo alto índice de danos à qualidade do ar do país.

Segundo Alvares Junior (2010), boa parte dos problemas associados à poluição em áreas urbanas pode ser atribuída ao uso da motocicleta que, embora seja um veículo pequeno e econômico, ainda emite mais poluentes que os demais tipos de veículos em circulação.

De acordo com esse autor, no período entre 1994 e 2008, as motocicletas aumentaram sua contribuição de menos de 2% da emissão de monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos (HC) na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) para cerca de 17% de CO e 9% de HC, conforme monitorado pela CETESB. Esse grande aumento ocorreu devido às vendas exponenciais de motocicletas, que chegaram a atingir 1,8 milhão de unidades em 2008.

De acordo com Alvares Junior (2010), mesmo sendo atualmente objeto de programas de controle de emissões, as motocicletas ainda representam desvantagens ambientais em relação a outros modos de transporte. Essas desvantagens são apresentadas pela tabela 2.3, na qual o autor realiza uma comparação dos fatores médios de emissão por passageiro transportado em ônibus, automóveis e motocicletas, para os poluentes atmosféricos mais críticos, segundo a classificação dos órgãos ambientais.

Tabela 2.3 – Quadro comparativo dos fatores de emissão médios por passageiro de ônibus, automóveis e motocicletas

Parâmetro	Ônibus		Automóvel		Motocicleta	
	Nº Passag	FE/passag (g/km.pass)	Nº Passag	FE/passag (g/km.pass)	Nº Passag	FE/passag (g/km.pass)
MP	40	0,013	1,5	0,053 (4 vezes mais que ônibus)	1	0,05 (4 vezes mais que ônibus)
NOx	40	0,26	1,5	0,5 (2 vezes mais que ônibus)	1	0,13 (metade do ônibus)
HC	40	0,055	1,5	0,73 (13 vezes mais que ônibus)	1	1,51 (27 vezes mais que ônibus)
CO ₂	40	19	1,5	133 (7 vezes mais que ônibus)	1	50 (2,5 vezes mais que ônibus)
Ocupação do espaço viário (m ² /passag)	40	1,1	1,5	5,3 (5 vezes mais que ônibus)	1	3 (3 vezes mais que ônibus)

* Um ônibus retira 27 automóveis e 40 motocicletas de circulação

** Fatores de emissão médios extraídos do Relatório de Qualidade do Ar no Estado de São Paulo - 2009

Fonte: Alvares Junior (2010).

Percebe-se, assim, que a motocicleta apresenta maior custo social do que os demais veículos em circulação, por ser considerada como o veículo mais poluente, com maior índice de acidentes e que possui um comportamento mais desrespeitoso do que os demais veículos em circulação.

Devido à forma como esses *motoboy*s realizam suas operações de transporte de carga (motofrete) e no intuito de reduzir o nível de acidentes provocados pelo tráfego de motocicletas nas vias urbanas, as entidades governamentais responsáveis estabeleceram leis e regras a respeito dos limites de capacidade de carga e de velocidades máximas permitidas.

Nesse aspecto, cabe mencionar que uma legislação do CONTRAN, prevista na resolução nº356 em 2 de agosto de 2010, estabelece os requisitos mínimos de segurança para o transporte remunerado de passageiros (mototáxi) e de cargas (motofrete) em motocicletas e motonetas.

Quanto aos dispositivos para o transporte de carga em motos, a legislação do CONTRAN estabelece que:

Art. 9º Os dispositivos de transporte de cargas em motocicleta e motoneta poderão ser do tipo fechado (baú) ou aberto (grelha), alforjes, bolsas ou caixas laterais, desde que atendidas as dimensões máximas fixadas nesta Resolução e as especificações do fabricante do veículo no tocante à instalação e ao peso máximo admissível.

§ 1º Os alforjes, as bolsas ou caixas laterais devem atender os seguintes limites máximos externos:

I - largura: não exceder as dimensões máximas dos veículos, medida entre a extremidade do guidon ou alavancas de freio à embreagem, a que for maior, conforme especificação do fabricante do veículo;

II - comprimento: não exceder a extremidade traseira do veículo; e

III - altura: não superior à altura do assento em seu limite superior.

§ 2º O equipamento fechado (baú) deve atender aos seguintes limites máximos externos:

I - largura: 60 cm, desde que não exceda a distância entre as extremidades internas dos espelhos retrovisores;

II - comprimento: não exceder a extremidade traseira do veículo; e

III - altura: não exceder a 70 cm de sua base central, medida a partir do assento do veículo.

§ 3º O equipamento aberto (grelha) deve atender aos seguintes limites máximos externos:

I - largura: 60 cm, desde que não exceda a distância entre as extremidades internas dos espelhos retrovisores;

II - comprimento: não exceder a extremidade traseira do veículo; e

III - altura: a carga acomodada no dispositivo não poderá exceder a 40 cm de sua base central, medida a partir do assento do veículo.

§ 4º No caso do equipamento tipo aberto (grelha), as dimensões da carga a ser transportada não podem extrapolar a largura e comprimento da grelha.

§ 5º Nos casos de montagem combinada dos dois tipos de equipamento, a caixa fechada (baú) não pode exceder as dimensões de largura e comprimento da grelha, admitida a altura do conjunto em até 70 cm da base do assento do veículo.

Quanto ao fator de peso máximo admissível, a CONTRAN determina que o valor de peso depende das especificações determinadas pelo próprio fabricante do veículo.

Na empresa Honda, por exemplo, no caso de transformação de categoria para transporte remunerado de carga, permite-se, para a instalação de um baú que sobrepõe o assento, um peso máximo de 20 kg de carga e, para a instalação de um baú que não sobrepõe o assento, um peso máximo de 7 kg de carga. Na empresa Yamaha, especificou-se que é permitido instalar um bauleto com peso máximo de 5 kg e um baú com peso máximo de 20 kg.

No caso da utilização de um sidecar do tipo baú ou grelha, na empresa *Saidbrasil* (2013), estipula-se um peso máximo de 150 kg de carga, de acordo com as exigências do DENATRAN.

Além desses limites impostos para a capacidade de carga, há também algumas regras que visam a estabelecer o nível de velocidade adequada dos veículos em determinadas vias.

Nesse aspecto, cabe mencionar que o CTB estabeleceu os Limites de velocidade pelo Artigo 61, previsto na Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997, de modo a conscientizar os condutores a respeito da velocidade em que devem transitar e prover maior segurança nas condições do trânsito brasileiro.

A esse respeito, os limites de velocidade foram definidos como:

Art. 61. A velocidade máxima permitida para a via será indicada por meio de sinalização, obedecidas suas características técnicas e as condições de trânsito.

§ 1º Onde não existir sinalização regulamentadora, a velocidade máxima será de:

I – Nas vias urbanas:

- a) oitenta quilômetros por hora, nas vias de trânsito rápido;
- b) sessenta quilômetros por hora, nas vias arteriais;
- c) quarenta quilômetros por hora, nas vias coletoras;
- d) trinta quilômetros por hora, nas vias locais;

II – Nas vias rurais:

- a) nas rodovias:
 - 1) 110 (cento e dez) quilômetros por hora para automóveis, camionetas e motocicletas; (Redação dada pela Lei nº 10.830, de 2003)
 - 2) noventa quilômetros por hora, para ônibus e microônibus;
 - 3) oitenta quilômetros por hora, para os demais veículos;
- b) nas estradas, sessenta quilômetros por hora.

§ 2º O órgão ou entidade de trânsito ou rodoviário com circunscrição sobre a via poderá regulamentar, por meio de sinalização, velocidades superiores ou inferiores àquelas estabelecidas no parágrafo anterior

Limites como esses impostos ao cenário brasileiro de trânsito buscam reduzir os acidentes provocados pelo comportamento negativo dos motoboys no trânsito que, segundo Vasconcelos (2008), pode ser explicado pela condição de trabalho desses motoboys, que estabelece uma remuneração por produção, o que, por sua vez, acaba resultando em alta pressão sobre o seu nível de produtividade.

Em relação aos moradores das regiões onde transita, o motociclista é responsável pelo “efeito barreira” (prejuízo que a circulação de veículos causa nas relações sociais dos moradores), principalmente em relação aos custos de emissão de poluentes (Vasconcelos, 2008).

Vasconcelos (2008) salienta que, em seus impactos gerais, a moto como veículo de transporte possui grandes vantagens em termos de custos de operação e facilidade de estacionamento; no entanto, sua utilização gera maiores impactos negativos, ou seja maiores custos sociais do que os outros veículos motorizados.

Dessa forma, as vantagens dos custos de operação e as desvantagens dos custos sociais associadas à utilização da motocicleta são comparadas às da utilização de outros tipos de veículos de transporte, de acordo com a tabela 2.4 e as figuras 2.20, 2.21 e 2.22.

Tabela 2.4 – Planilha de custo operacional por quilometragem rodada

Tipo de Veículo	Combustível	Indicação de Cálculos (em R\$/Km)				Despesas Indiretas (20% do Subtotal)	Custo por Km Rodado
		Preço/Consumo	Manutenção	Outros	Subtotal		
Motocicleta	Gasolina	0,083	0,007	0,119	0,202	0,040	0,242
Caminhão GMC 6.150	Diesel	0,366	0,119	0,257	0,623	0,125	0,748
Caminhão Toco L1113	Diesel	0,522	0,140	0,176	0,698	0,140	0,838
Caminhão Truc L2013	Diesel	0,609	0,140	0,340	0,949	0,190	1,139
Kombi 1.6 Standard	Gasolina	0,358	0,011	0,122	0,480	0,096	0,576
Microônibus	Diesel	0,366	0,075	0,619	0,985	0,197	1,182
Ônibus 18-310	Diesel	0,609	0,071	0,833	1,442	0,288	1,730
Parati 1.8 MI	Gasolina	0,250	0,029	0,114	0,364	0,073	0,437
Santana 2.0 MI	Gasolina	0,250	0,029	0,129	0,379	0,076	0,455
Sprinter 313 Luxo	Diesel	0,313	0,031	0,323	0,636	0,127	0,763

Fonte: Adaptado de Universidade Federal de Viçosa –Divisão do Transporte (2006).

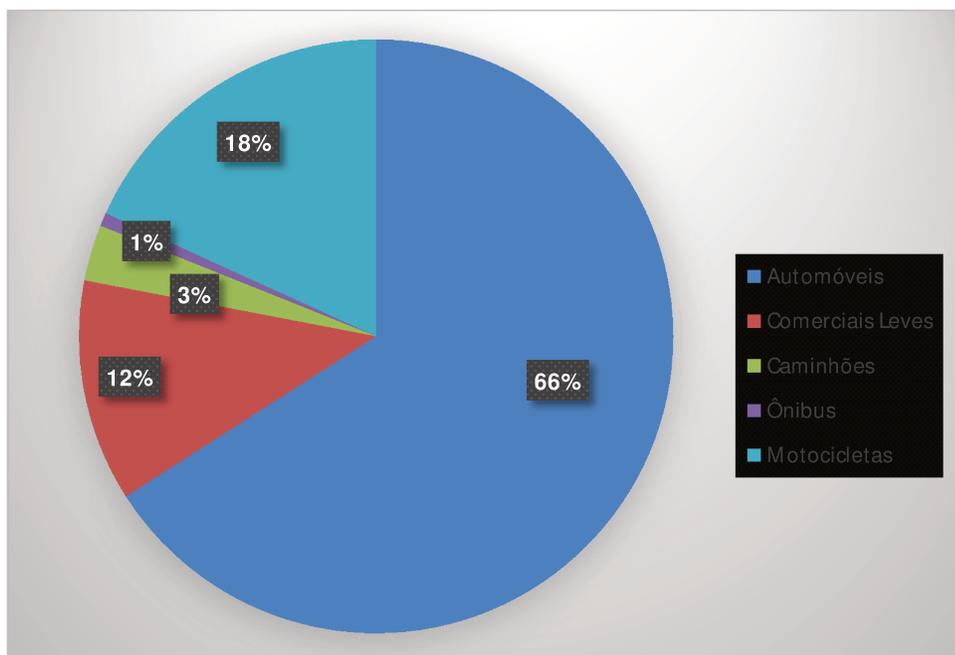


Figura 2.20 – Estimativa percentual da frota circulante no Estado de São Paulo em 2012

Fonte: Adaptado de CETESB (2012)

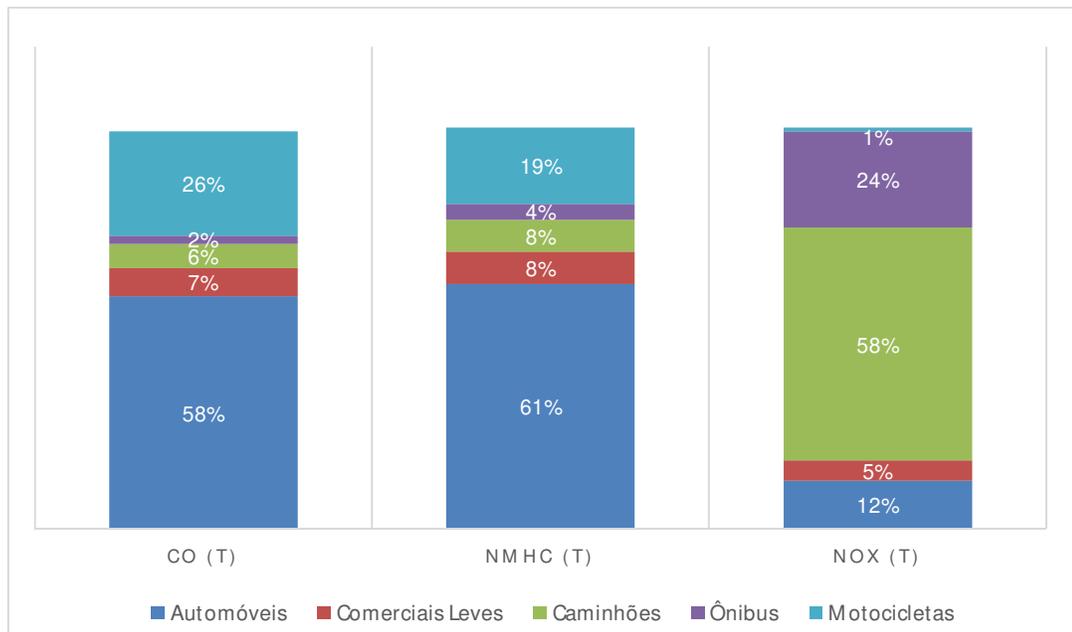


Figura 2.21 – Contribuição percentual de cada categoria de veículos na emissão de poluentes no Estado de São Paulo em 2012

Fonte: CETESB (2012)

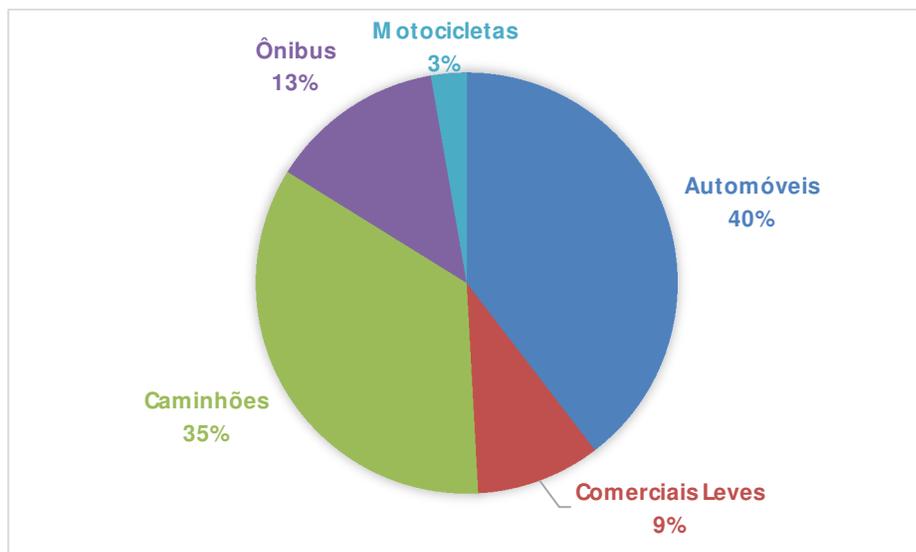


Figura 2.22 – Contribuição percentual de cada categoria de veículos na emissão de GEE no Estado de São Paulo em 2012

Fonte: CETESB (2012)

De acordo com a tabela 2.4, o custo operacional da motocicleta tem um valor muito menor que o dos outros tipos e modelos de transporte. Essa redução de custos está ligada ao baixo consumo de combustível por quilômetro (Preço/Consumo) e ao baixo custo requerido para a manutenção do veículo.

Na figura 2.20, é possível perceber que há uma quantidade de motocicletas circulantes no Estado de São Paulo 1,5 vez maior do que a quantidade de veículos comerciais leves, 6 vezes maior do que a quantidade de caminhões em geral e 18 vezes maior do que a quantidade de ônibus; no entanto, São Paulo possui uma frota de motocicletas quase 4 vezes menor do que a quantidade de automóveis circulantes.

Além disso, as figuras 2.21 e 2.22 mostram que, em relação aos custos sociais, a motocicleta se destaca como a segunda maior categoria de veículos responsável pelo nível de emissão de poluentes para o Estado de São Paulo, o que, por sua vez, apresenta relação direta com o tamanho da frota e a taxa de fatores médios de emissão para cada tipo de veículo.

Dessa maneira, é possível perceber que, apesar dos enormes custos sociais que as motocicletas representam para a população, sua frota circulante vem apresentando um aumento considerável em muitas áreas urbanas, resultante de atrativos pelo baixo custo de aquisição e de combustível, além das facilidades proporcionadas em relação ao estacionamento e circulação em locais cada vez mais congestionados. No intuito de diminuir os problemas e as externalidades que a motocicleta acarreta, políticas de desincentivo contra o seu uso vêm sendo discutidas e apresentadas, assim como o incentivo do uso de transportes alternativos, como, por exemplo, bicicletas.

2.7. Os custos de Emissões de Gases Poluentes Resultantes das Operações de Transporte

A maior participação de veículos motorizados em operações e atividades que requerem a movimentação de pessoas ou objetos entre locais distintos vem aumentando a quantidade de queima de combustíveis fósseis, que constitui uma das principais causas das emissões de gases de efeito estufa (IPEA 2011) relacionadas ao aquecimento global no planeta e a diversos problemas prejudiciais à saúde humana. Caso essa emissão poluente torne-se exacerbada, a sustentabilidade

ambiental poderá entrar em colapso, o que, por sua vez, irá comprometer o bem-estar e a saúde da humanidade.

Graças à importância que o transporte representa para a mobilidade de carga e de pessoas entre diferentes locais, faz-se necessário encontrar soluções que busquem reduzir os níveis de emissão desses gases poluentes.

De acordo com o comunicado do IPEA de 2011, dentre os gases causadores do efeito estufa (GEE) encontram-se o dióxido de carbono (CO₂) como o principal poluente dessa categoria (devido à grande quantidade emitida pela queima de combustíveis fósseis) e outros gases poluentes classificados como locais.

Segundo o IPEA (2011), esses poluentes locais possuem vida meio curta, o que faz com que atuem no efeito estufa em curto prazo. Alguns deles catalisam reações de poluentes locais secundários, além de ser responsáveis por diversos problemas prejudiciais à saúde humana.

Entre os poluentes veiculares locais, os principais são o monóxido de carbono (CO), os hidrocarbonetos (HC), os materiais particulados (MP), os óxidos de nitrogênio (NO_x) e os óxidos de enxofre (SO_x), que provocam problemas de saúde e externalidades negativas para o meio ambiente. Os impactos causados pela emissão desses poluentes locais são apresentados pela tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Efeitos Nocivos dos principais poluentes veiculares locais na atmosfera

Poluente	Símbolo	Impacto
Monóxido de Carbono	CO	Atua no sangue, reduzindo a oxigenação e podendo até mesmo causar a morte após determinado período de exposição à determinada concentração.
Óxidos de nitrogênio	NOx	É parte do “ <i>smog</i> ” fotoquímico e da chuva ácida. É um precursor do ozônio (O ₃), que causa e/ou piora problemas nas vias respiratórias humanas. Também provoca danos a lavouras.
Hidrocarbonetos (compostos orgânicos voláteis)	HC	Combustíveis não queimados ou parcialmente queimados formam o “ <i>smog</i> ” e compostos cancerígenos. É um precursor do ozônio (O ₃).
Material Particulado	MP	Pode penetrar nas defesas do organismo, atingir os alvéolos pulmonares e causar irritações, asma, bronquite e câncer de pulmão. Degrada os imóveis próximos aos corredores de transporte.
Óxidos de Enxofre	SOx	Forma a chuva ácida e degrada a vegetação e imóveis, além de provocar problemas de saúde.

Fonte: IPEA (2011)

A estimativa dos níveis de emissão de gases poluentes pode ser realizada de duas maneiras, de acordo com os tipos de dados disponíveis.

De acordo com a CETESB (2012), a realização dessa estimativa é feita a partir das metodologias *Top-Down* e *Bottom-Up*.

A metodologia *Top-Down* pode ser utilizada para se estimar o nível de emissão de poluentes a partir do consumo de combustível da área geográfica em questão, em cujo caso é necessário utilizar os fatores de emissão de combustível, e não o veículo. Essa metodologia é apresentada pela equação 2.9.

$$E = C_{comb} * F_e \quad (2.9)$$

Onde:

E é o fator de emissão do poluente no período considerado (ton/ano)

C_{comb} é o consumo de combustível observado nas regiões de interesse (m³/ano)

F_e é o fator de emissão do combustível considerado (g/m³)

A metodologia *Bottom-Up* pode ser utilizada para se estimar o nível de emissão de poluentes a partir da frota de veículos, da distância percorrida e dos fatores de emissão dos veículos. Essa metodologia é apresentada pela equação 2.10.

$$E = F_e * I_u * F_r \quad (2.10)$$

onde:

E é o fator de emissão do poluente no período considerado (ton/ano)

F_e é o fator de emissão dependente do tipo do veículo, do tipo de poluente e do combustível utilizado (g/km)

I_u é a intensidade de uso, ou a quilometragem anual percorrida pelo veículo (km/ano)

F_r é o tamanho ou a quantidade da frota circulante, que depende do tipo de veículo e do ano de fabricação (número de veículos).

A principal diferença que existe entre essas duas metodologias está relacionada com o nível de confiança dos dados que cada indivíduo possui. A metodologia *Top-Down* necessita de uma grande quantidade de informações relacionadas com o suprimento de combustíveis, enquanto a metodologia *Bottom-Up* requer algumas informações detalhadas que normalmente não se encontram disponíveis.

Dentre as informações necessárias para a aplicação da metodologia *Bottom-Up*, a CETESB publica anualmente, desde 2002, relatórios contendo dados como: fatores médios de emissão de gases poluentes (em g/km), autonomia dos diferentes tipos de veículos (em km/L) e outros dados importantes. Alguns dos dados necessários para a aplicação do método *Bottom-Up* são apresentados pelas tabelas 2.6 e 2.7.

Tabela 2.6 – Fatores médios de emissão de veículos comerciais leves novos

Ano	Combustível	Poluentes Veiculares (g/Km)			
		CO	HC	NOx	CO ₂
2009	Gasolina C	0,22	0,020	0,03	231
	Flex-Gasol. C	0,22	0,070	0,03	224
	Flex-Etanol	0,46	0,019	0,03	208
	Diesel	0,28	0,033	0,68	269
2010	Gasolina C	0,26	0,031	0,02	246
	Flex-Gasol. C	0,20	0,060	0,04	266
	Flex-Etanol	0,47	0,031	0,04	245
	Diesel	0,21	0,070	0,72	265
2011	Gasolina C	0,30	0,030	0,02	224
	Flex-Gasol. C	0,23	0,040	0,03	241
	Flex-Etanol	0,68	0,090	0,02	234
	Diesel	0,15	0,047	0,61	263
2012	Gasolina C	0,28	0,025	0,01	222
	Flex-Gasol. C	0,24	0,038	0,04	243
	Flex-Etanol	0,73	0,101	0,05	238
	Diesel	0,05	0,029	0,31	254

Fonte: CETESB (2012)

Tabela 2.7 – Fatores médios de emissão de motocicletas e similares

Ano	Motor (Cap. Vol.)	Combustível	Poluente Veiculares (g/Km)			
			CO	HC	NOx	CO ₂
2009	<= 150 cc	Gasolina	1,09	0,17	0,10	61
	>150 e <=500 cc		1,07	0,12	0,11	87
	>= 501 cc		1,02	0,15	0,11	143
2010	<= 150 cc	Gasolina	0,68	0,17	0,07	52
	> 150 cc		1,14	0,12	0,09	79
	<= 150 cc	Flex-Gasolina	0,75	0,15	0,05	51
	<= 150 cc	Flex-Etanol	0,58	0,16	0,07	51
2011	<= 150 cc	Gasolina	0,61	0,20	0,08	56
	> 150 cc		1,03	0,11	0,09	71
	<= 150 cc	Flex-Gasolina	0,76	0,14	0,06	50
	<= 150 cc	Flex-Etanol	0,68	0,16	0,06	49
2012	<= 150 cc	Gasolina	0,51	0,17	0,08	56
	> 150 cc		0,99	0,11	0,09	83
	<= 150 cc	Flex-Gasolina	0,74	0,14	0,04	50
	<= 150 cc	Flex-Etanol	0,90	0,16	0,04	47

Fonte: CETESB (2012)

A partir dessas informações, é possível fazer uma estimativa do nível de emissão de poluentes em determinado local ou para alguma operação de transporte, desde que os demais dados, tais como distância de percurso e tamanho da frota de veículos, estejam disponíveis no ambiente de mensuração para possibilitar a realização desses cálculos.

Com isso, a aplicação de metodologias que sirvam para estimar o nível de poluentes permite determinar uma maneira quantitativa na busca de preservação do meio ambiente, do bem-estar social e de um desenvolvimento sustentável que assegure a qualidade de vida das gerações futuras.

2.8. Sistemas de Informação Geográfica

A informação vem se tornando um recurso cada vez mais importante em qualquer organização, privada ou pública (federal, estadual ou municipal), já que é responsável por gerar recursos econômicos pela redução de tempo nos processos de tomada de decisões. Assim sendo, a manipulação de informações relacionadas com problemas urbanos e ambientais vem apresentando uma crescente demanda de técnicas apoiadas no uso de computadores e de imagens (que registram esses tipos de informações) obtidas através de sensores orbitais instalados a bordo de satélites espaciais. O avanço da informática permitiu que essas informações coletadas pudessem ser integradas com um suporte geográfico por intermédio de Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) (Silva, 2007).

Esses Sistemas de Informações Geográficas são ferramentas que permitem armazenar, manipular, sintetizar, pesquisar, editar, visualizar e analisar as informações referentes a entidades geograficamente referenciadas em um ambiente computacional, no intuito de auxiliar em decisões que envolvem inventários, estimativas, planejamento e modelagem de dados geográficos (Silva, 2007).

Os SIGs são caracterizados como mecanismos que integram dados geográficos provenientes de dados espaciais (pontos, linhas, polígonos e células) e dados tabulares (que descrevem cada uma das entidades espaciais, tais como variáveis, classes, valores, nomes e outros), cujo objetivo é prover suporte à tomada de decisões para o gerenciamento de uso do solo,

recursos hídricos, ecossistemas aquáticos e terrestres, ou quaisquer entidades distribuídas espacialmente (Silva, 2007).

De acordo com Matos (2008), os principais tipos de modelos de dados geográficos que podem ser representados em um SIG são:

- Os modelos vetoriais (*vector*), cujo elemento básico de representação é o ponto, definido pelas suas coordenadas geográficas. Nesses tipos de modelos, as linhas existem como linhas poligonais geradas a partir de uma sequência desses pontos;
- Os modelos matriciais (*raster*), cuja representação do espaço é constituída por uma matriz de células (denominadas pixels), associada a valores que permitem reconhecer objetos sob a forma de uma imagem digital.

Com base nessas informações, Matos (2008) identifica que a principal diferença entre ambos esses tipos de modelos está no fato de que, nos modelos matriciais, o espaço é particionado a priori e não após a identificação de entidades.

Atualmente, de acordo com Rocha (2000), há um grande número de Sistemas de Informação Geográfica com diferentes características possíveis em termos de tipos de estruturas de dados, modelo de banco de dados, sistemas de análise e outras.

Apesar de os SIGs possuírem habilidades diferentes, Rocha (2000) apresenta alguns módulos encontrados na maior parte desses programas. Esses módulos são:

- Sistemas de Aquisição e Conversão dos Dados, constituídos de programas ou funções de um programa que têm a capacidade de importar os formatos de dados disponíveis;
- Bancos de Dados Espaciais, que descrevem a forma e a posição das características da superfície do terreno;
- Bancos de Dados de Atributos, que descrevem os atributos ou qualidades dessas características;
- Sistemas de Gerenciamento de Banco de Dados (SGBD), que armazenam e recuperam informações de acordo com uma simplificação do mundo real, em que cada entidade física é representada com maior ou menor grau de detalhe, de acordo com as necessidades de uso ou aplicação dessas informações;

- Sistemas de Análise Geográfica, que ampliam a capacidade de um SIG, de modo a possibilitar a análise de dados relacionados a localização, extensão, correlação e evolução de determinado fenômeno de interesse;
- Sistemas de Processamento de Imagens, que fazem o processamento de imagens de Sensoriamento Remoto através da conversão dessas mesmas imagens em dados de mapas, interpretados de acordo com vários processos de classificação;
- Sistemas de Modelagem Digital do Terreno (MDT), que geram Modelos Digitais do Terreno, os quais apresentam, como resultado, cartas de declividade, curvas de nível, coropletas, e outros;
- Sistemas de Análises Estatísticas, que oferecem procedimentos estatísticos e rotinas especializadas para a análise estatística dos dados espaciais;
- Sistemas de Apresentação Cartográfica, que permitem a extrapolação de elementos selecionados do banco de dados e a produção de mapas, gráficos, relatórios e tabelas no monitor de vídeo, ou cópia impressa, utilizando uma impressora ou plotter.

Segundo Kennedy (2010), uma das operacionalizações dos SIGs é o uso da informação advinda de sensores remotos, como o GPS que registra o posicionamento de seres vivos (humanos, animais ou vegetais) e/ou de entidades geográficas (montanhas, estradas, cidades, planícies, estações de rádio e outros).

De acordo com Kennedy (2010), com o uso de um GPS, é possível coletar as informações relacionadas com posições em coordenadas geográficas geodésicas (latitude, longitude e altura geométrica) ou coordenadas cartesianas geodésicas (X, Y, Z) que podem ser integradas em um ambiente SIG no processo de tratamento das informações espaciais.

Há diferentes tipos de sistemas de coordenadas que são registrados em um SIG.

Nesse aspecto, Rocha (2000) apresenta os seguintes tipos de sistemas de coordenadas como sendo os principais tipos de sistemas trabalhados em um ambiente SIG:

- Coordenadas Geodésicas, que são as coordenadas denominadas por latitudes (φ), referenciadas a partir do Equador de 0° a 90° , no hemisfério Norte, e de 0° a 90° no

hemisfério Sul; e por longitudes (λ), referenciadas a partir do *Greenwich*, de 0° a 180°, na direção Leste, ou de 0° a 180°, na direção Oeste;

- Coordenadas Cartesianas, que são as coordenadas que possuem sua origem no centro da Terra, onde os eixos X e Y pertencem ao plano do Equador, e o eixo Z coincide com o eixo de rotação da Terra, passando pelo meridiano de *Greenwich*;
- Coordenadas Plano-Retangulares, que são as coordenadas medidas na superfície esférica e representadas sobre uma superfície plana, sendo que esse processo de medição é realizado a partir de uma projeção dos pontos medidos em uma superfície esférica de referência (Datum), passando por um processo de deformação dessa superfície esférica de referência para torná-la plana, para em seguida estabelecer um sistema de coordenadas plano e escolher a escala para fazer com que a porção da superfície medida caiba no papel.

No sistema de coordenadas Plano-Retangulares, Rocha (2000) salienta que a maior parte das cartas confeccionadas no Brasil são executadas utilizando-se o sistema de projeção UTM.

De acordo com Rocha (2000), a projeção UTM é um sistema de coordenadas retangulares que apresenta a vantagem de permitir representar grandes áreas da superfície terrestre, sobre um plano, com poucas deformações e com apenas um grupo de fórmulas. Esse sistema de projeção pode ser visualizado como um cilindro secante à superfície de referência, orientado de forma que o eixo do cilindro esteja no plano do Equador, na qual sua área de projeção, denominada de *fuso* ou *zona*, compreende apenas uma parcela da superfície de referência, onde cada um desses fusos ou zonas é representado pelo número do fuso ou pela longitude do seu meridiano central.

Os SIGs têm diversos tipos de aplicações práticas. Com base em Matos (2008), foram identificados cinco grandes tipos de domínios para a aplicação de SIGs:

- Informação cadastral e infraestruturas, integrando repositórios exaustivos de características geográficas e suportando operações de monitorização e gestão intensivas, na medida em que o sistema será objeto de procedimentos de gestão continuados, com reduzida necessidade de análise espacial (por exemplo: cadastro predial; cadastro de uma rede de abastecimento de água);

- Planejamento e gestão de recursos naturais, modelando características geográficas num sistema que suporta operações de monitorização e gestão esporádicas, mas que já requer operações de análise espacial e de suporte à decisão (por exemplo: elaboração e gestão de um plano diretor municipal; estudo para a localização de escolas; gestão de florestas);
- Modelação espacial e temporal, em que a predominância é quase exclusiva às operações de análise espacial e cálculo (por exemplo: delimitação de zonas de habitat de uma espécie; propagação de um poluente em cursos de água);
- Visualização de informação geográfica, onde a representação das características geográficas é feita de forma a privilegiar as características de comunicação, abrangendo não só os suportes analógicos como também os diversos processos de visualização de informação em suporte digital (por exemplo: produção de cartografia impressa; apresentação de mapas e roteiros através da *web*);
- Navegação, onde os requisitos operacionais de utilização influenciam decisivamente a forma de modelagem; a navegação é entendida em sentido lato como qualquer processo de utilização da informação geográfica para apoio a movimentação e pesquisa diretamente no mundo real (por exemplo: sistemas de informação para navegação em navios ou em automóveis).

Segundo Câmara et al. (1996), os SIGs têm propiciado, aos pesquisadores e analistas, um ganho expressivo de informações socioeconômicas e ambientais, permitindo uma compreensão em diversas áreas, de modo a determinar onde e como alocar recursos para remediar problemas ou garantir a preservação de determinadas características no ambiente em que vivemos.

Na classe de aplicações socioeconômicas, os SIGs permitem realizar tarefas tais como: o acompanhamento e inventário de cadastros imobiliários rurais ou urbanos; a definição de uma política para o uso de solo; aplicações envolvendo serviços de utilidade pública (redes de telefonia, eletricidade, esgotos, transportes); sistemas de auxílio à navegação; estudos de marketing; alocação de recursos em geral para a manutenção ou expansão da infraestrutura de uma região. Nesse tipo de aplicação, o uso de um SIG pode promover benefícios como redução dos casos de disputa de propriedades, simplificação do processo de reforma agrária, monitoração do mercado de terras ou até maior eficiência na cobrança de impostos (Câmara et al., 1996).

Por outro lado, na classe de aplicações ambientais, os SIGs também podem ser utilizados na coleta, análise e manipulação de informações relacionadas com o meio ambiente, incluindo a ecologia, o clima, o gerenciamento florestal e a poluição, e/ou informações relacionadas com o uso dos recursos naturais, envolvendo extrativismo vegetal, extrativismo mineral, energia, recursos hídricos e Oceania (Câmara et al., 1996).

Desse modo, por tratarem de problemas de manipulação de informações que existem em um contexto espaço-temporal, os Sistemas de Informação Geográfica têm recebido cada vez mais atenção e importância por parte de diferentes entidades governamentais. E, como consequência da quantidade crescente de informações a serem lidadas no dia a dia, diversas administrações municipais, regionais e nacionais têm utilizado cada vez mais os SIGs como uma importante ferramenta de auxílio à tomada de decisões, tanto para a definição de novas políticas de planejamento quanto para a avaliação das decisões tomadas (Câmara et al., 1996).

2.9.O Programa ArcGIS

O estudo foi desenvolvido considerando-se o georreferenciamento para análise das soluções. Para aplicá-lo, utilizou-se o programa ArcGIS, disponível na UNICAMP, já que ele que permitia a interação com o mapa do campus cedido pela Prefeitura em AUTOCAD.

Em termos gerais, o ArcGIS pode ser definido como um sistema que permite coletar, organizar, gerenciar, analisar e distribuir informações geográficas que podem ser aplicadas em projetos governamentais, científicos, educacionais, de negócios, ou de outros tipos (ArcGIS, 2013).

Esse sistema pode ser utilizado como uma infraestrutura para criar mapas e disponibilizar informações geográficas em um departamento, em toda uma empresa, entre múltiplas organizações e comunidades de usuários, ou em sites de internet aos quais qualquer pessoa pode ter acesso.

Isso pode permitir, por exemplo, que trabalhadores utilizem dispositivos móveis para atualizar medições em tempo real no campo, que especialistas analisem essas informações em computadores e que planejadores realizem estudos de impacto sobre os resultados de sua análise,

tudo de maneira simultânea. Em seguida, os mapas e dados resultantes do projeto em questão são publicados para acesso público na internet, permitindo não somente que seus usuários vejam esses resultados, mas também que combinem os dados desses resultados com outros dados para criar mapas adicionais que possam ser utilizados de novas maneiras (ArcGIS, 2013).

As principais funcionalidades do ArcGIS incluem:

- Criação e utilização de mapas inteligentes que contenham informações para apoiar consultas, análises, planejamento e gestão. Um mapa elaborado pelo ArcGIS pode conter informações como topografia, imagens, ruas, terrenos, oceanos, hidrologia, uso da terra, geologia, parcelas de terrenos da cidade e infraestrutura (ArcGIS, 2013).
- Compilação, em um único mapa geográfico coerente (ArcGIS, 2013), de informações geográficas a partir de múltiplas fontes (dados geográficos, dados tabulares, arquivos do tipo KML, planilhas, fotos e vídeos geomarcados, dados do tipo CAD, dados do tipo *feed* de sensores, imagens aéreas e de satélites e outras).
- Criação, projeção, gerenciamento, manutenção e uso de bases de dados geográficos em formato de *layers* (camadas) do tipo fronteiras administrativas, redes de serviços públicos, instalações, hidrografia, altitude, solos e assim por diante. Além disso, arquivos históricos também podem ser criados para permitir que as alterações feitas nos dados ao longo do tempo sejam revistas e monitoradas (ArcGIS, 2013).
- Solução de problemas com o uso de análise espacial para a obtenção de novas informações que possibilitem uma melhor tomada de decisão a partir dos dados apresentados. O uso da análise espacial permite a aplicação de operações matemáticas, estatísticas e geográficas nos dados mapeados para criar visualizações de propriedades espaciais como densidade, distribuição, análise de clusters, fluxos, proximidade e conectividade. Algumas das ferramentas utilizadas para análise espacial no ArcGIS incluem sobreposição para combinar a geometria e atributos de diferentes *layers* de dados, mapeamento de densidade, análise de cluster para identificação de bairros, análise de proximidade, análise de superfície para trabalhar com fenômenos que variam continuamente ao longo do espaço e análises temporais para detectar mudanças em fenômenos ao longo do tempo (ArcGIS, 2013).

- Criação de aplicativos personalizados para a realização de análise geográfica, na qual um usuário desenvolve e adiciona novas funcionalidades de SIG para analisar e solucionar problemas específicos de acordo com os critérios estabelecidos pelo usuário do ArcGIS (ArcGIS, 2013).
- Comunicação e compartilhamento de informações entre diferentes tipos de públicos como planejadores, empresários, funcionários públicos eleitos, clientes, estudantes ou colegas de trabalho (ArcGIS, 2013).

Todas essas funcionalidades do ArcGIS permitem que esse sistema possa ser aplicado em áreas de consciência operacional, operações de campo (como inspeção móvel e implantação de resposta), pesquisa de mercado, gestão de recursos, operações logísticas, educação e outras (ArcGIS, 2013). As características do ArcGIS tornam essa ferramenta um poderoso sistema de informações geográficas para a criação, manipulação e compartilhamento de mapas e informações geográficas.

3. METODOLOGIA DE PESQUISA

Este trabalho se originou com o estudo do tema de logística sustentável, tendo como foco a utilização de meios de transporte logístico-sustentáveis, neste caso, a bicicleta. Ele está relacionado a um estudo experimental desenvolvido pela aplicação de diferentes metodologias de construção de roteiros de transporte de carga em diferentes heurísticas que utilizaram dados de entrada obtidos em uma situação hipotética na região da Universidade Estadual de Campinas.

Realizou-se uma análise do modelo de roteiro empregado na região pretendida e, a partir dessa análise, entendeu-se que seria necessário explorar diferentes situações hipotéticas que sugerissem a utilização de diferentes pequenos roteiros para executar a operação logística pretendida com o tipo de transporte escolhido no tema de estudo.

Dessa forma, ficou decidido pela análise comparativa dos métodos de divisão de distritos de Hojati (1996), Clarke e Wright (Novaes, 2007) e Voronoi (Novaes, 2007) como metodologias adequadas de construção de múltiplos roteiros de distribuição de produtos para serem aplicadas na área de análise pretendida, utilizando-se a bicicleta como o tipo de transporte logístico escolhido para este estudo.

3.1. Etapas de Desenvolvimento

Foram desenvolvidas as seguintes etapas neste estudo:

1. Definição do tema de pesquisa na proposta de estudo.
2. Elaboração da revisão bibliográfica preliminar para estudo e compreensão dos seguintes processos complementares relacionados aos assuntos básicos abordados na pesquisa: a entrega de pequenas encomendas, a utilização da bicicleta no transporte de carga, a utilização e a problemática dos veículos motorizados no transporte de carga, os custos de emissões de gases poluentes resultantes das operações de transporte, e a aplicação do programa ArcGIS.
3. Definição do objetivo de pesquisa adotado na proposta de estudo.

4. Elaboração de uma revisão bibliográfica definitiva contendo os temas principais de estudo e uma descrição dos modelos de estudo, explicando os métodos de construção de roteiros (*Districting*, Clarke e Wright, Diagrama de Voronoi) utilizados como premissas de entendimento de estudo para a aplicação das heurísticas empregadas na análise do estudo pretendido.
5. Descrição do cenário selecionado para a aplicação do experimento na presente pesquisa, utilizado como premissa para a elaboração de um estudo da operação de distribuição de pequenas encomendas em regiões de pequeno porte.
6. Análise dos procedimentos de aplicação dos modelos analisados na situação prática considerada.
7. Comparação entre a situação tradicional e os modelos operacionais estudados e, de forma mais objetiva, a comparação da operação de coleta e entrega realizada com o uso de bicicletas e das motocicletas, com a operação de coleta e entrega realizada com o uso de veículo utilitário motorizado.
8. Análise dos resultados e do desempenho dos modelos, explicando quais foram os resultados de análise obtidos e o comportamento dos modelos elaborados no estudo pretendido.
9. Apresentação das conclusões finais do trabalho.

Esse procedimento de pesquisa é ilustrado pela figura 3.1.

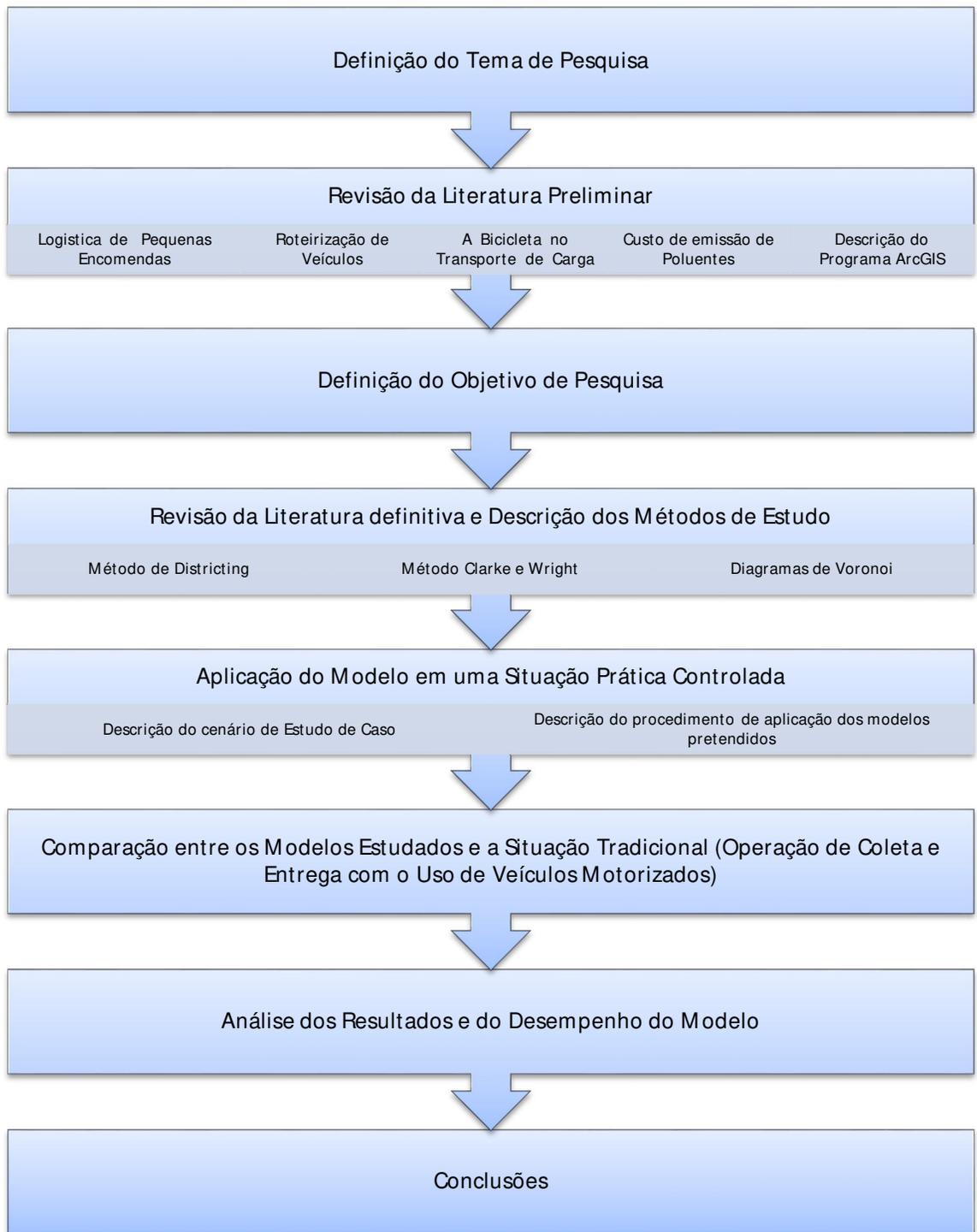


Figura 3.1 – Fluxograma do Procedimento de Pesquisa Adotado na Elaboração do Estudo Pretendido

3.2. Os Métodos de Construção de Roteiros Aplicados ao Estudo Pretendido

O estudo e a análise dos métodos de roteirização de veículos foram realizados no intuito de apresentar e comparar alguns desses métodos que apresentem soluções básicas para um problema de distribuição física condicionado às restrições de limite de tempo de viagem e de capacidade de carga de veículo.

Tomando como referência o tipo de veículo (bicicleta), o perfil do produto (pequenas encomendas) e o tipo de cenário (região de pequeno porte), foi realizada uma pesquisa teórica com o intuito de encontrar modelos de construção de roteiros que permitissem adequar as características do veículo (capacidade de carga restrita, distância de mobilidade reduzida) com as características do cenário de estudo (múltiplos pontos de entrega e/ou coleta de produtos com alto nível de dispersão entre si).

Essa pesquisa demonstrou a necessidade de buscar métodos de construção de roteiros que permitissem realizar um processo de divisão da região de análise em bolsões ou zonas de entrega e/ou coleta.

Foi feita, então, uma escolha por métodos de criação de múltiplas zonas ou roteiros (*Districting*, Clarke e Wright e diagrama de Voronoi) que pudessem adequar as limitações existentes no tipo de veículo considerado nesse estudo às características vigentes no cenário utilizado como aplicação de estudo de caso teórico, permitindo, assim, a validação da proposta vigente neste estudo.

Tal escolha foi feita, em parte, porque o problema a ser tratado não constituía um problema de grande porte, e, portanto, poderia vir a apresentar uma solução relativamente boa com certo nível de rapidez e facilidade. Os métodos heurísticos pretendidos na presente pesquisa podem vir a ser utilizados para fornecer soluções rápidas e eficientes que satisfaçam aos critérios existentes no cenário de estudo a ser analisado.

Uma vez realizada a escolha dos métodos pretendidos, foi feito um estudo mais aprofundado do procedimento de aplicação desses métodos de modo a resumir e definir a ideia desses mesmos métodos.

A seguir, será apresentada uma descrição básica dos métodos heurísticos pretendidos no presente estudo, no intuito de retratar a ideia geral da maneira como o problema de pesquisa será abordado.

3.2.1. O método de *Districting*

A aplicação do método de divisão por distritos consiste no procedimento de divisão de um território em distritos de acordo com diferentes critérios ou restrições, a fim de estabelecer algum processo de planejamento que tenha propósitos administrativos (Galvão et al., 2004).

Dessa maneira, o procedimento para a aplicação do método de *Districting* é realizado com base na abordagem de Hess et al. (1965), adaptada por Hojati (1996) para tratar do problema de transporte capacitado. Essa abordagem é apresentada pela figura 3.2.

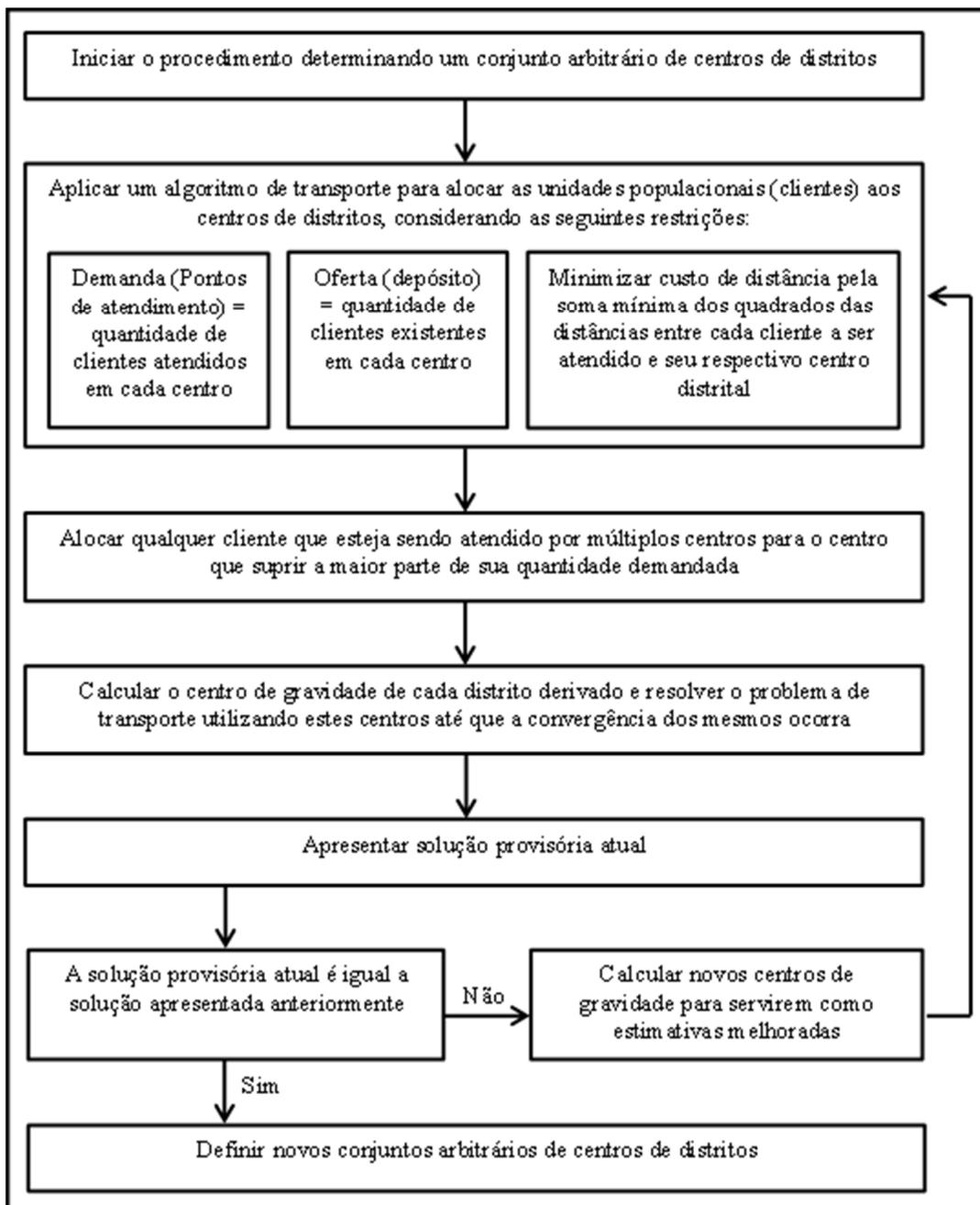


Figura 3.2 – Fluxograma do método de *Districting*

Fonte: Hess et al. (1965), Hojati (1996).

A aplicação do método de Divisão por distritos será realizada com o programa “Gera_Distritos” elaborado por Novaes (2014) em linguagem pascal, utilizando o método heurístico de *Districting* (figura 3.2) baseado em Hojati (1996).

De acordo com Novaes (2014), o algoritmo de Hojati (1996) aplicado para o programa “Gera_Distritos” é declarado da seguinte forma:

- (a) Começar com um conjunto arbitrário de distritos (Seja por exemplo, $m = 4$)
- (b) Para cada distrito, determinar seu centro de gravidade
- (c) Formar uma matriz (problema do transporte), com m linhas e n colunas, onde n é o número de pontos a serem atendidos (tabela 3.1):

Tabela 3.1 – Esboço da matriz de distância

	1	2	3	n	$\sum m$	
m	1					P/m
	2					P/m
	3					P/m
	4					P/m

- i) $x_{ij} = 1$, se o ponto j for alocado ao distrito i , e $x_{ij} = 0$, caso contrário
- ii) Seja P a população total
- iii) Seja C_{ij} o custo de alocar j para i , sendo igual à distância de j ao centro do distrito i . :

$$d_{ij}$$

- (d) Deve-se determinar x_{ij} de forma que a soma dos custos (as distâncias) seja mínima

$$\min c = \sum_i \sum_j x_{ij} \cdot c_{ij} \tag{3.1}$$

- (e) Tratando como um problema de transporte clássico, considerar:

- i) Restrição de igualdade de votantes: $\sum_j x_{ij} = \frac{P}{m}$ para $i = 1, 2, \dots, n$ (3.2)

- ii) Restrição nas colunas: $\sum_{i=1}^m x_{ij} = 1$ (3.3)

A partir desse processo de cálculo, o programa “Gera_Distritos” seleciona os pontos a serem escolhidos na formação de cada distrito, considerando que a quantidade de distritos é predeterminada como uma variável de entrada do programa.

3.2.2. O Método de Clarke e Wright

A aplicação do método Clarke e Wright consiste em definir um ou mais roteiros de distribuição com base nos ganhos obtidos a partir da combinação de pares de clientes (i, j) existentes nesses mesmos roteiros, ao mesmo tempo em que se procura respeitar as restrições de tempo de entrega e de capacidade do veículo, com o objetivo de obter uma economia na distância total a ser percorrida e no tamanho da frota que será empregada para servir a todas as paradas estabelecidas (Novaes, 2007).

Dessa maneira, a aplicação do método de Clarke e Wright foi realizada com base na abordagem de Ballou (2006) e de Novaes (2007), que buscam construir roteiros visando a minimizar a distância total percorrida pelos veículos da frota. Essa abordagem é apresentada pela figura 3.3.

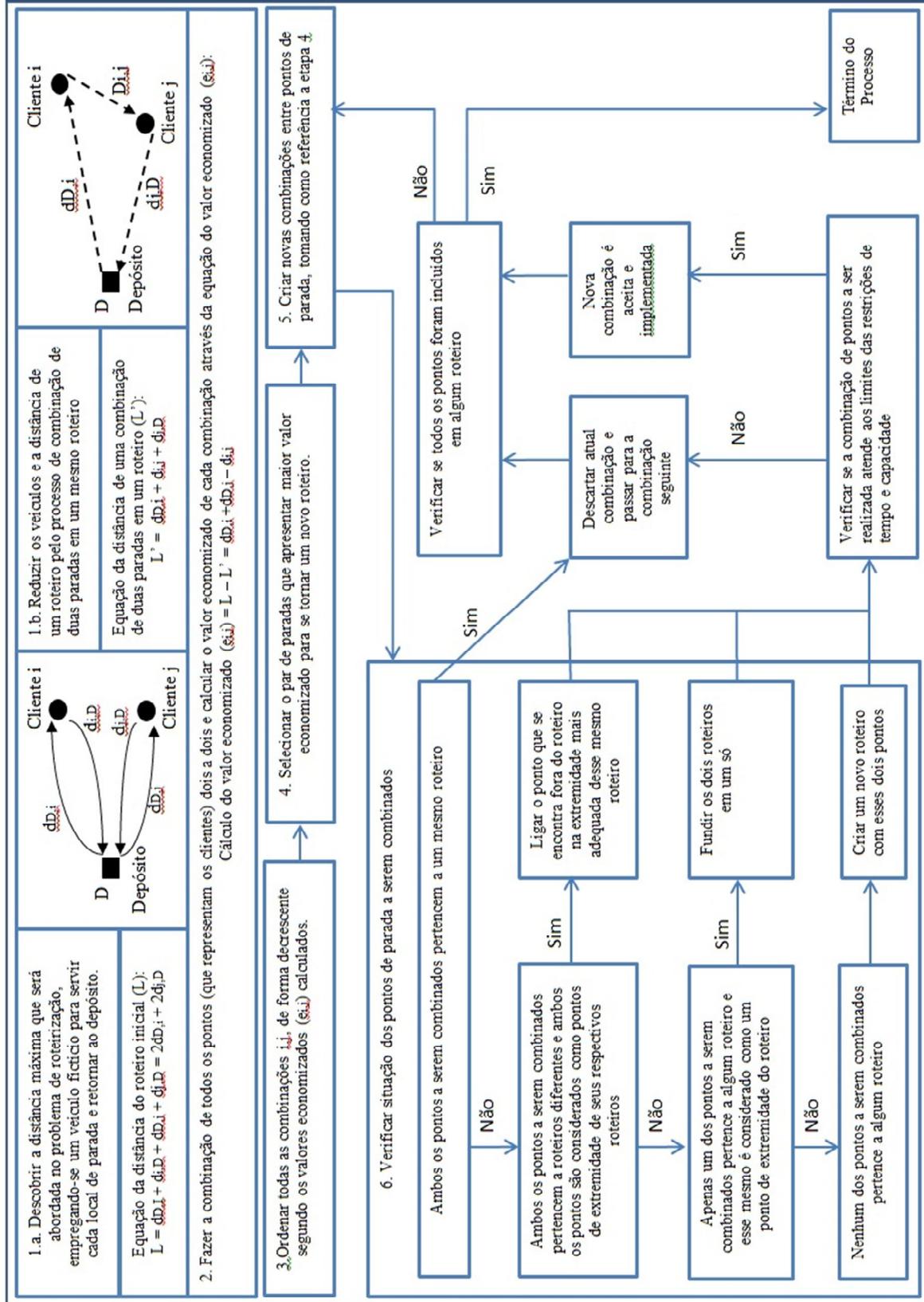


Figura 3.3 – Fluxograma do método de Clarke e Wright

Fonte: Adaptado de Ballou (2006), Novaes (2007)

A aplicação do método Clarke e Wright foi realizada utilizando-se o programa “Clark Wright” elaborado por professor Bez e Adriano (2014), com o objetivo de apresentar uma solução de economia de custo baseada na minimização da distância total percorrida pela frota de veículos a partir do tempo máximo permitido em roteiro e da velocidade média (km/h) do veículo em percurso.

3.2.3. O método de diagrama de Voronoi

A aplicação do método de diagrama de Voronoi consiste em subdividir um determinado espaço métrico determinado pela distância em grupos de objetos (subconjuntos) existentes nesse mesmo espaço. Nesse contexto, de acordo com Davis Jr (1999), o diagrama de Voronoi é formado com base na regra de que, dado um conjunto de locais (pontos) em um plano, esse plano será dividido em polígonos associados à área de influência de cada local. A descrição geral do processo é apresentada pela figura 3.4.

A aplicação do diagrama de Voronoi foi realizada com a utilização do *plugin ET Surface* 4.0 (ET SpatialTechniques), implementado no programa ArcGIS 10.1, para servir como uma ferramenta que possa executar a divisão espacial geográfica pretendida na área de análise a partir do método de diagrama de Voronoi.

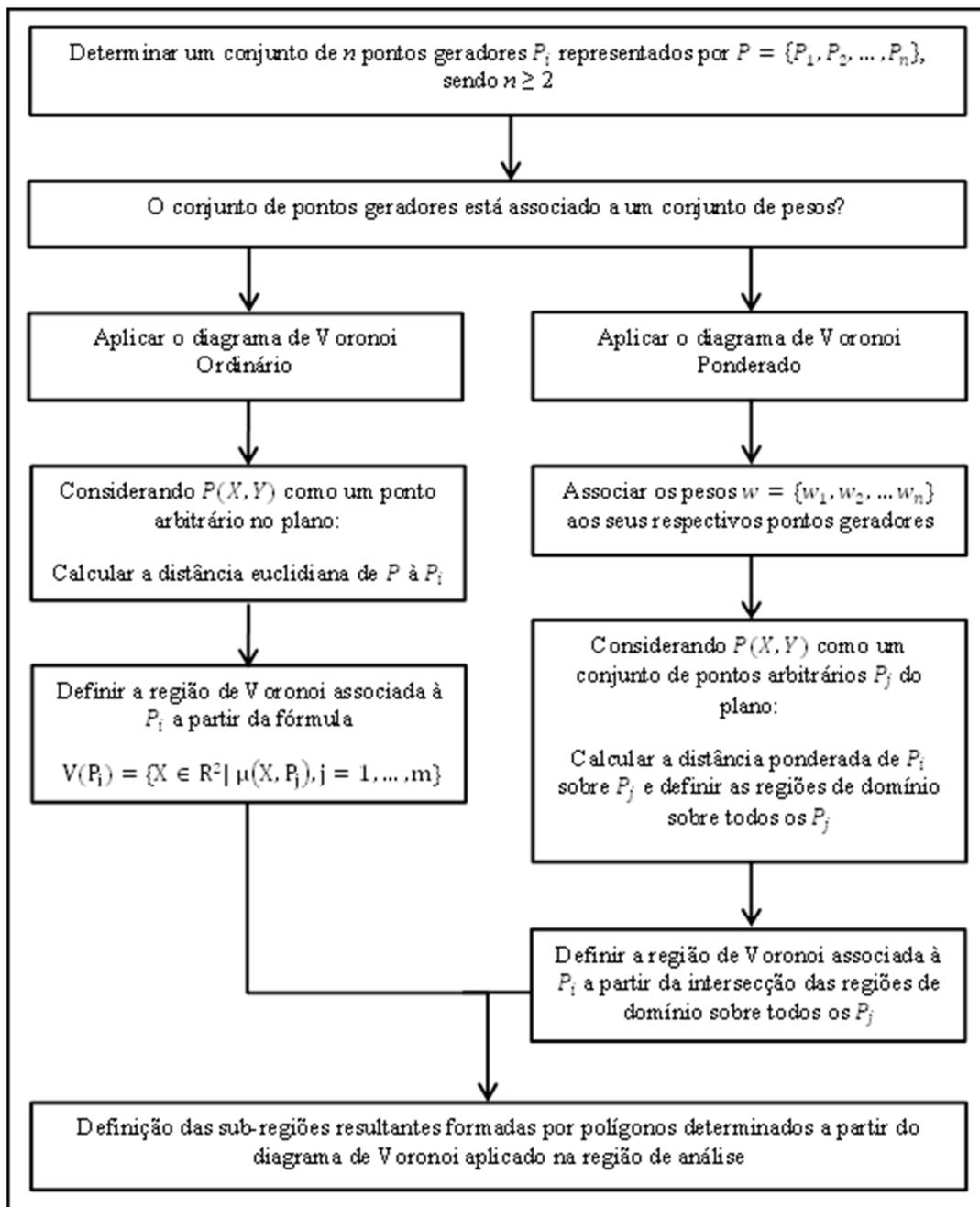


Figura 3.4 – Fluxograma do método de diagrama de Voronoi

Fonte: Adaptado de Novaes (2007).

3.3. Procedimento de Análise

Para realizar o procedimento de análise da operação de coleta e entrega de pequenas encomendas a partir dos métodos pretendidos, foi realizada uma pesquisa envolvendo a operação de troca de malotes entre as unidades da UNICAMP e o setor de expedição da universidade utilizando um veículo motorizado do tipo Kombi.

Dessa maneira, o cenário de referência foi considerado como a situação existente, e as variáveis de entrada consideradas na análise desse cenário foram:

- coordenadas geográficas dos pontos do roteiro (em formato UTM);
- distância de percurso em cada roteiro;
- peso dos pontos de troca;
- peso máximo permitido de carga;
- volume máximo permitido de carga;
- velocidade média de percurso.

Os dados obtidos para essas variáveis de entrada foram aplicados nos programas relacionados com cada método heurístico pretendido na presente pesquisa. E, uma vez realizada essa aplicação, foram apresentados seus resultados através das seguintes variáveis de saída:

- distância total de percurso para cada roteiro;
- peso total de carga para cada roteiro;
- tempo total de operação.

Através de cálculos adicionais, foram determinadas as seguintes variáveis:

- nível de emissão de poluentes;
- tamanho da frota de veículos;
- custos operacionais de cada tipo de veículo considerado.

Em uma etapa seguinte, essas variáveis de saída serão estruturadas em uma planilha (tabela 3.2) de modo a possibilitar a correta análise e comparação entre os resultados pretendidos pela presente pesquisa.

Tabela 3.2 – Tabela das variáveis de saída finais dos modelos de estudo

Método de aplicação	Quantidade de roteiros	Distância máxima de percurso	Tempo máximo de operação	Nível de emissão de poluentes	Tamanho da frota
<i>Districing</i>	Quanto roteiros foram formados pela aplicação do método pretendido	Quanto foi a distância máxima percorrida no roteiro a partir da aplicação do método pretendido	Quanto foi o tempo máximo de permanência no roteiro a partir da aplicação do método pretendido	Quanto foi o nível de CO ₂ emitido a partir da distância máxima de percurso	Qual foi o tamanho da frota para cobrir a operação a partir da aplicação do método pretendido
Clarke e Wright					
Voronoi					

A comparação, na presente pesquisa, será realizada de duas maneiras diferentes:

- evidenciando as diferenças entre as variáveis de saída apresentadas por cada um dos programas utilizados;
- definição dos custos operacionais e sociais apresentados por cada tipo de modal de transporte considerado no estudo.

As variáveis de saída consideradas na comparação foram as seguintes:

- distância (em metros)
- peso de carga (em quilos) – só no modelo *Districing*
- quantidade de pontos atendidos em cada roteiro;
- tempo de operação.

Na definição dos custos operacionais e sociais, foram utilizadas as seguintes variáveis:

- distância máxima de viagem;
- tempo de ciclo;
- custo variável do uso de transporte por unidade de distância;
- nível de emissão de poluentes;
- tamanho da frota.

Na definição dos custos operacionais e sociais e no dimensionamento de frota, foram utilizados os valores constantes na tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Valores considerados da definição dos custos operacionais, sociais e de dimensionamento de frota.

Tipo de dado	Veículo	Valor	Fonte de dado
Peso máximo permitido (Kg)	Bicicleta	20	Entrevista com empresa <i>Courriers</i> (2014)
	Motocicleta	20	Manual Técnico da Honda
	Kombi	1000	Entrevista com DGA (Setor de Expedição, 2013)
Custo variável por quilometragem (R\$/Km)	Bicicleta	0,121	Pesquisa realizada pelo Engenheiro Marcelo Daniel Coelho na Coppe - UFRJ
	Motocicleta	0,390	Adaptação da tabela da Divisão dos transportes, atualizada com dados de 2014
	Kombi	1,422	
Custo de aquisição do veículo zero (R\$)	Bicicleta	3.000,00	Entrevista com empresa <i>Courriers</i> (2014)
	Motocicleta	6.200,00	Fontes diversas
	Kombi	61.990,00	
Fator de emissão de CO ₂	Bicicleta	21	Entrevista com empresa <i>Courriers</i> (2014)
	Motocicleta	132	CETESB (2012)
	Kombi	222	

É importante destacar que nenhum dos métodos pretendidos elaborou roteiros com base na capacidade máxima de carga permitida do veículo, ou seja, o cálculo e a elaboração dos roteiros/distritos não considerou a variável de capacidade de peso do veículo. Para esse tipo de situação, é considerado que o veículo tem maior extrapolação por peso da carga do que pelas dimensões (comprimento, largura, profundidade). Nessa circunstância, é realizado o cálculo de dimensionamento de frota para determinar o número de veículos ou viagens necessárias para cobrir cada roteiro elaborado com o uso da bicicleta e da motocicleta.

O procedimento para dimensionamento de frota foi realizado conforme a seguinte itemização adaptada de Stringher (2004):

- capacidade útil do veículo: dado apresentado na tabela 3.3
- carga por período a ser transportada: dado declarado com base na solução do programa (peso de carga da operação)
- tempo total por viagem: $t_i + t_v + t_e + t_d$ (3.4)

onde:

- t_i - tempo de ida;
- t_v - tempo de volta;
- t_e - tempo de espera;
- t_d - tempo de descanso.
- tempo de período operacional para coleta/entrega: meio período diário = 4 horas = 240 minutos;
- número de veículos necessários na frota: $\frac{\text{Tempo total de viagens}}{\text{Tempo de período operacional}}$ (3.5)

Na determinação dos custos operacionais, foi empregada a formulação sugerida por Novaes et al. (2008):

- custo por quilograma transportado - CCT: $CCT = \frac{\text{custo por quilômetro rodado} \times \text{quilometragem total a ser percorrida}}{\text{carga útil do veículo}}$ (3.6)

- custo da carga total transportada - CTT: $CTT = \text{carga total transportada} \times \text{custo por quilograma transportado}$ (3.7)

Para os cálculos de custo por quilômetro rodado, custo por quilograma transportado e emissão de poluentes, foi considerado que o cálculo é realizado para a operação como um todo utilizando-se apenas um veículo, ou seja, o tamanho da frota é igual a um veículo.

Desse modo, as tabelas acima serão utilizadas para comparar as soluções obtidas a partir da aplicação dos métodos propostos e verificar qual é a metodologia mais viável para tratar do problema de pesquisa pretendido.

Em um segundo momento, os resultados apresentados nessa mesma tabela serão comparados com o modelo de transporte atualmente utilizado (cenário de referência) na operação vigente do cenário de estudo de caso dessa pesquisa, de modo a verificar-se o rendimento do cenário atual (uso da Kombi na operação) quando comparado com o cenário alternativo (uso de bicicleta na operação).

Por fim, será realizada uma análise conclusiva voltada para os ganhos de eficiência demonstrados pela presente pesquisa e pelo estudo do tema em questão.

4. CENÁRIO DE ESTUDO

Esta pesquisa, que desenvolve a análise da distribuição de pequenas encomendas utilizando a bicicleta como veículo de transporte de carga, pretendeu identificar um cenário real que permitisse a avaliação do desempenho e eficiência desse serviço no que diz respeito ao transporte.

Considerando as peculiaridades da carga, foi identificado, como fonte de uma situação real, o serviço de coleta e distribuição dos malotes da UNICAMP. O sistema existente promove a transferência de pacotes entre 50 pontos de origem ou destino e o setor de expedição. Para permitir a identificação das variáveis que interferem na pesquisa-objeto, a situação foi avaliada a partir de pesquisa de campo e entrevista com os funcionários envolvidos na operação.

4.1. Declaração do Cenário de Estudo

O cenário selecionado para aplicação do experimento na presente pesquisa foi o campus principal da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) em Campinas. A universidade possui, nesse campus, vinte e duas unidades de ensino e pesquisa divididas em doze faculdades e dez institutos (Portal UNICAMP, 2013).

Dentro do campus da universidade, a Diretoria Geral de Administração (DGA) é o departamento responsável pelas funções administrativas e de serviços da Universidade (Portal DGA, 2013). O setor de expedição integra uma das áreas da DGA e é o setor da UNICAMP responsável pelas operações de coleta, entrega, separação, armazenamento, distribuição e transporte de documentos e correspondências recebidas e enviadas pela Universidade. Essas operações cobrem o ambiente interno (Unidades/Órgãos da UNICAMP) e o ambiente externo à Universidade. Nesta pesquisa, será analisada a operação de distribuição interna de malotes realizada pelo setor de expedição do DGA como o cenário de referência para a experimentação teórica pretendida.

4.2. O Processo de Distribuição Interna do Setor de Expedições

Para a operação de distribuição interna, o setor de expedição é responsável pela tarefa de trocar as correspondências que precisam ser trocadas (enviadas e/ou recebidas) entre as diferentes unidades físicas da universidade (reitorias, coordenadorias, unidades de ensino e outros setores). A operação existente é realizada através de dois roteiros de viagem diferentes, cada um responsável pelo atendimento a 25 pontos de coleta ou entrega de pacotes.

Os pacotes a serem transferidos são acondicionados em malotes, e a coleta e a distribuição dos malotes são realizadas por um veículo motorizado. O setor de expedição conta ainda com dois carrinhos-plataforma (um para cada roteiro) para transferência entre o veículo e a seção de expedição do malote, mesas para separação e organização da correspondência de acordo com as Unidades da UNICAMP e escaninhos para armazenamento da correspondência recebida na expedição. Esses dispositivos são ilustrados pela figura 4.1



Figura 4.1 – Dispositivos utilizados na distribuição interna dos malotes

A operação existente para a coleta e a entrega de malotes é realizada em pontos definidos próximos aos prédios das unidades atendidas.

Essa operação utiliza grandes malotes (figura 4.2) em que são inseridos diversos tipos de correspondência em papel (jornais, documentos, contratos, revistas e outros tipos de encomendas). A figura 4.3 apresenta um exemplo da correspondência que normalmente é transferida no interior dos malotes.



Figura 4.2 – Malotes utilizados na distribuição interna da correspondência



Figura 4.3 – Exemplos de correspondência transportada nos malotes

Outros tipos de correspondência, tais como processos amarrados e caixas ou pacotes contendo objetos desconhecidos pelos funcionários da expedição, são transportados em separado e fora dos malotes (figura 4.4).



Figura 4.4 – Exemplos de correspondência transportada fora dos malotes

Os malotes utilizados nas operações de distribuição da universidade possuem as seguintes características físicas:

- tecido do tipo lona;
- duas alças de mão;
- visor externo para inserção de cartões contendo o nome da unidade (durante a entrega) e o nome do setor de expedição (durante a coleta);
- peso máximo definido de até 20 kg;
- altura máxima de 62 cm;
- largura máxima de 44 cm;
- profundidade máxima de 16 cm.

O veículo utilizado nas operações de distribuição da universidade corresponde a um modelo Kombi Volkswagen 2012 de combustível duplo (sistema flex).

Nesse veículo, os malotes a serem entregues (malotes repassados do veículo para os patrulheiros dos pontos de troca) são alocados e priorizados em formato LIFO (Last In First Out) no espaço interno destinado aos passageiros (figura 4.5a) de acordo com a sequência de paradas no roteiro vigente, e os malotes de coleta (malotes transferidos dos patrulheiros para o veículo) são alocados no porta-malas do veículo (figura 4.5b).



Figura 4.5 – Alocação dos malotes na Kombi

No setor de expedição, o procedimento da operação de distribuição das encomendas é realizado a partir das seguintes etapas:

1. transferência dos malotes recolhidos durante o roteiro de viagem do veículo para o carrinho-plataforma do roteiro correspondente;
2. deslocamento do carrinho-plataforma até o interior da seção de expedição e transferência do malote para a mesa de triagem;
3. carregamento, no veículo, dos malotes que serão entregues nos pontos de entrega do roteiro de viagem subsequente;
4. abertura dos malotes recolhidos da viagem anteriormente realizada;
5. triagem e separação das correspondências nas mesas;
6. carregamento da correspondência nos escaninhos de destino;

7. inserção da correspondência nos malotes com os respectivos nomes das unidades de destino;
8. organização dos malotes no carro-plataforma de acordo com a política LIFO (*last in first out*);
9. deslocamento do carrinho plataforma até o local de estacionamento do veículo de transporte e transferência dos malotes para o interior do veículo conforme o arranjo anteriormente estabelecido.

No momento em que o veículo inicia seu procedimento de distribuição nos roteiros de viagem, é executado o procedimento de troca entre os malotes a serem enviados e coletados nas várias unidades da UNICAMP.

Essa tarefa de troca entre os malotes envolve três elementos humanos:

- o motorista, responsável por dirigir o veículo durante o percurso de viagem para a troca dos malotes;
- o patrulheiro embarcado no veículo, responsável pela distribuição dos malotes de entrega durante o percurso de viagem e pelo recebimento e alocação dos malotes coletados na parte traseira do veículo;
- os patrulheiros dos pontos de troca, responsáveis pela entrega dos malotes de saída das unidades e pelo recebimento dos malotes de entrada.

Em alguns casos, pode ser necessária a presença de patrulheiro adicional para facilitar a transferência dos malotes. A presença do ajudante é importante para que a distribuição dos malotes consiga ocorrer de maneira rápida e eficiente.

Outra situação na qual o patrulheiro adicional é necessário é quando há um malote muito pesado (acima de 10 quilos, podendo chegar até 20 quilos algumas vezes), juntamente com a possibilidade de que haja a entrega de correspondência enviada fora dos malotes. Nesses casos, os funcionários da Seção de Expedição se comunicam por telefone com o responsável pelo expediente da unidade envolvida e solicitam a presença do patrulheiro adicional no local de troca habitual.

Na operação de troca dos malotes, é sempre necessário que haja um malote em cada parte da operação, mesmo que esteja vazio, para a próxima operação de entrega de correspondência à unidade. Mesmo que ambos os malotes (de coleta e de entrega) estejam vazios durante a troca, essa troca deverá ser efetuada de qualquer maneira.

Nos pontos de troca de malotes, a presença do patrulheiro deve ocorrer com 15 minutos de antecedência em relação ao horário estabelecido no roteiro de viagem, em função da variação do horário de chegada do veículo em algum dos pontos de troca, de acordo com o trânsito e o congestionamento das vias na Universidade.

4.3. Elaboração da operação de transferência de malotes no aplicativo SIG

A partir dos dados coletados, foram determinadas as coordenadas dos pontos de parada do veículo que realiza a operação de troca dos malotes para a elaboração de um mapa em sistema de informações georreferenciadas (GIS). Essas coordenadas foram coletadas utilizando-se o aparelho GPS Garmin eTrex que possui as seguintes especificações:

- tamanho de 11cm x 5cm x 3cm;
- peso de 150 gramas aproximadamente;
- tempo de aquisição dos registros entre 15 segundos e 45 segundos (dependendo da temperatura climática);
- frequência de atualização de 1/segundo, contínuo;
- precisão de 15 metros rms (*root mean square*).

Esse dispositivo é apresentado pela figura 4.6, e as coordenadas dos locais de troca de malotes registradas por ele são apresentadas pelas tabelas 4.1 e 4.2.



Figura 4.6 – GPS utilizado no registro das coordenadas dos pontos de troca dos malotes

As coordenadas apresentadas nas tabelas 4.1 e 4.2 encontram-se registradas com elipsoide SAD-69, no sistema de projeção UTM. Essas coordenadas foram registradas na zona de longitude 23, considerando que os seis primeiros números representam a translação Norte, registradas no banco de dados do programa ArcGIS como coordenadas em X, e os sete últimos números representam a translação Leste, registradas no banco de dados do programa ArcGIS como coordenadas em Y.

Tabela 4.1 – Coordenadas dos pontos de troca dos malotes – Primeiro Roteiro

Pontos de entrega dos malotes (UTM) – Primeiro Roteiro de Troca de Malotes				
Ponto	Nome das unidades servidas no ponto de troca	Coordenadas UTM		
		Zona	X	Y
Inicial/Final	DGA	23k	288058	7474483
1	PRP/CADI/PRDU/PG/CORI/SG/EXTECAMP/PRE/CEDES/INOVA/GR/CGU	23k	287936	7474474
2	FCM	23k	288329	7473706
3	CECOM	23k	288208	7473915
4	HEMOCENTRO	23k	288228	7473970
5	GASTROCENTO/PRODECAD/CRECHE/AREA SAÚDE	23k	288383	7474042
6	CECI	23k	288351	7474129
7	CAISM/CEB	23k	288126	7474106
8	CT/CPO	23k	288188	7474546
9	TRANSPORTE	23k	288207	7474698
10	AREA DE PRODUÇÃO	23k	288230	7474662
11	GRÁFICA	23k	288250	7474642
12	CEMEQ	23k	288303	7474567
13	CEMIB	23k	288570	7474532
14	LABEURB	23k	288499	7474491
15	EDITORA	23k	288472	7474479
16	FEAGRI	23k	288618	7475030
17	CEBMEG	23k	288699	7475046
18	EMBRAPA/CEPAGRI	23k	288429	7475197
19	CCUEC/CENAPAD/CGI/GGTE	23k	288296	7475267
20	NEPO/NEPP	23k	288189	7475578
21	ADUNICAMP/IC	23k	288049	7475726
22	FEC/RTV	23k	288230	7475421
23	SERGIO PORTO	23k	288525	7474123
24	HC	23k	288247	7474136
25	DGRH/SST/DAB/LABJOR/NIED/PRPG	23k	287834	7474568

Tabela 4.2 – Coordenadas dos pontos de troca dos malotes – Segundo Roteiro

Pontos de entrega dos malotes (UTM) – Segundo Roteiro de Troca de Malotes				
Ponto	Nome das unidades servidas no ponto de troca	Coordenadas UTM		
		Zona	X	Y
Inicial/Final	DGA	23k	288058	7474483
1	NEPAM	23k	288104	7474632
2	CCS	23k	288138	7474529
3	IG	23k	288121	7474518
4	FEEC	23k	287941	7474875
5	FEQ	23k	288018	7474930
6	FEM	23k	288101	7475087
7	FEA/NEPA/IQ	23k	287890	7475045
8	CMU/SAE/DLIE BASICO/STU/CIPA	23k	287759	7475228
9	IF/FE	23k	287988	7475317
10	IE	23k	288008	7475466
11	IMECC	23k	287780	7475418
12	IFCH/CEPETRO	23k	287782	7475456
13	CEL	23k	287785	7475704
14	COMVEST	23k	287814	7475778
15	FUNCAMP	23k	287830	7475819
16	CASA DO LAGO	23k	287677	7475759
17	FEF/CEI	23k	287350	7475547
18	BC/CDMC/POSTO CORI	23k	287411	7475364
19	IEL	23k	287625	7475442
20	IA	23k	287543	7475548
21	CDC	23k	287491	7475565
22	DAC/SAPPE/CLE	23k	287462	7475292
23	SIARQ/DCE	23k	287420	7475181
24	IB	23k	287617	7475052
25	NIPE	23k	287871	7475787

As informações a respeito dos roteiros de viagem de troca de malotes foram obtidas por meio de entrevistas, visitas técnicas ao setor de expedição, pesquisas de campo realizadas junto ao veículo de carga e aquisição de um documento descrevendo o horário das entregas e coletas de malotes (Anexo C).

A partir das informações coletadas, constatou-se que os roteiros de troca de malotes são percorridos duas vezes por dia cada um (nos períodos da manhã e da tarde) e normalmente seguem o padrão estabelecido pelo documento de horário dos malotes. No entanto, devido à

requisição de cumprimento de tempo da operação, ambos os roteiros de viagem podem sofrer alterações no que se refere à ordem de atendimento dos pontos de troca e também aos próprios percursos por onde o veículo irá transitar, em função do volume de congestionamento ou de possíveis fechamentos das vias na universidade. Dessa maneira, os roteiros analisados podem excepcionalmente sofrer alterações devido a incidentes durante a execução de viagem.

Os roteiros levantados na pesquisa de campo são apresentados pelas tabelas 4.3 e 4.4. As distâncias apresentadas foram determinadas a partir da trajetória do veículo nas vias do mapa digital. Os tempos foram cronometrados em viagens realizadas no veículo. As velocidades médias foram calculadas a partir das distâncias estabelecidas e dos tempos de viagem medidos.

Com base em oito pesquisas de campo realizadas a respeito dos roteiros de viagem (duas entrevistas realizadas para os dois períodos do dia em que cada roteiro é atendido), foi possível determinar o tempo médio (em segundos) de percurso e de espera para os pontos de troca atendidos em cada roteiro de viagem, juntamente com as medidas de distância de percurso no sistema viário da universidade entre esses mesmos pontos. Nas tabelas 4.3 e 4.4, as distâncias apresentadas se referem ao trajeto do veículo no segmento viário entre a unidade considerada e a sua anterior no percurso.

Tabela 4.3 – Dados dos roteiros de viagens para as operações de troca de malotes – Primeiro

Roteiro

Roteiro 1 -Medidas dos Pontos de entrega dos malotes					
Primeiro Malote - Saída					
Ponto	Nome das unidades servidas no ponto de troca	Distancia (metros)	Tempo de viagem (segundos)	Tempo de espera (segundos)	Velocidade Média (km/h)
Inicial	DGA	0	0	0	0
1	PRP/CADI/PRDU/PG/CORI/SG/ EXTECAMP/PRE/CEDES/INOVA/GR/CGU	769	175	74	16
2	FCM	1302	172	2	27
3	CECOM	385	43	15	32
4	HEMOCENTRO	54,5	14	13	14
5	GASTROCENTO/PRODECAD/CRECHE/AREA SAÚDE	172	30	13	21
6	CECI	100,5	28	4	13
7	CAISM/CEB	275,5	63	16	16
8	CT/CPO	915	141	17	23
9	TRANSPORTE	376	60	3	23
10	ÁREA DE PRODUÇÃO	43	9	2	17
11	GRÁFICA	28	9	25	11
12	CEMEQ	92	20	6	16
13	CEMIB	492	81	52	22
14	LABEURB	83	20	6	15
15	EDITORA	29	11	31	10
16	FEAGRI	654	78	6	30
17	CEBMEG	338	44	3	28
18	EMBRAPA/CEPAGRI	455	74	18	22
19	CCUEC/CENAPAD/CGI/GGTE	310	56	49	20
20	NEPO/NEPP	639	103	8	22
21	ADUNICAMP/IC	427	69	16	22
22	FEC/RTV	363	47	6	28
23	SERGIO PORTO	1464	144	2	37
24	HC	1181	151	34	28
25	DGRH/SST/DAB/LABJOR/NIED/PRPG	1050	202	52	19
Final	DGA	548	94	0	21
	Total	12545,5	1938	473	553
	Média	482,5	74,5	18,2	21,3

Tabela 4.4 – Dados dos roteiros de viagens para as operações de troca de malotes – Segundo

Roteiro

Roteiro 2 - Medidas dos Pontos de entrega dos malotes					
Segundo Malote - Saída					
Ponto	Nome das unidades servidas no ponto de troca	Distância (metros)	Tempo de viagem (segundos)	Tempo de espera (segundos)	Velocidade Média (km/h)
Inicial	DGA	0	0	0	0
1	NEPAM	370,5	82	16	16
2	CCS	135,5	25	6	20
3	IG	21	9	7	8
4	FEEC	800	195	10	15
5	FEQ	94	30	6	11
6	FEM	224	37	11	22
7	FEA/NEPA/IQ	275	61	17	16
8	CMU/SAE/DLIE BASICO/STU/CIPA	383	85	34	16
9	IF/FE	298	67	6	16
10	IE	251	56	5	16
11	IMECC	394,5	76	5	19
12	IFCH/CEPETRO	224	103	4	8
13	CEL	354	71	11	18
14	COMVEST	80	13	5	22
15	FUNCAMP	77	29	62	10
16	CASA DO LAGO	173	41	4	15
17	FEF/CEI	396	81	7	18
18	BC/CDMC/POSTO CORI	384	195	25	7
19	IEL	905	210	8	15
20	IA	133,5	22	5	22
21	CDC	91	16	8	20
22	DAC/SAPPE/CLE	850	151	46	20
23	SIARQ/DCE	151	42	25	13
24	IB	330	85	15	14
25	NIPE	1477	332	20	16
Final	DGA	1829	329	0	20
	Total	10701	2443	368	413
	Média	411,6	94,0	14,2	15,9

A partir desses dados, foi possível calcular a velocidade média do veículo durante a realização das operações de troca dos malotes e distribuí-la graficamente a partir das figuras 4.7 e 4.8.

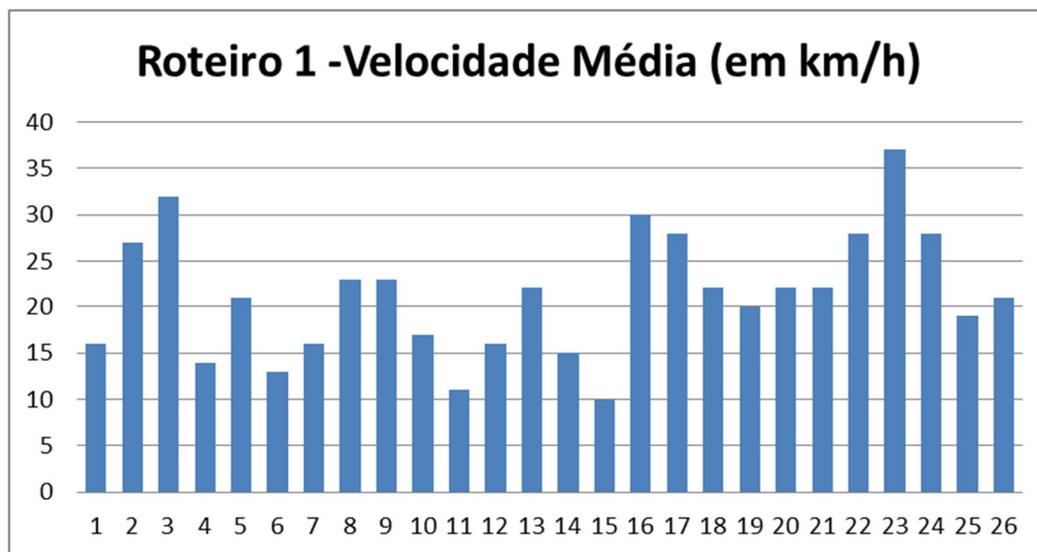


Figura 4.7 – Distribuição da velocidade média de viagem no roteiro 1

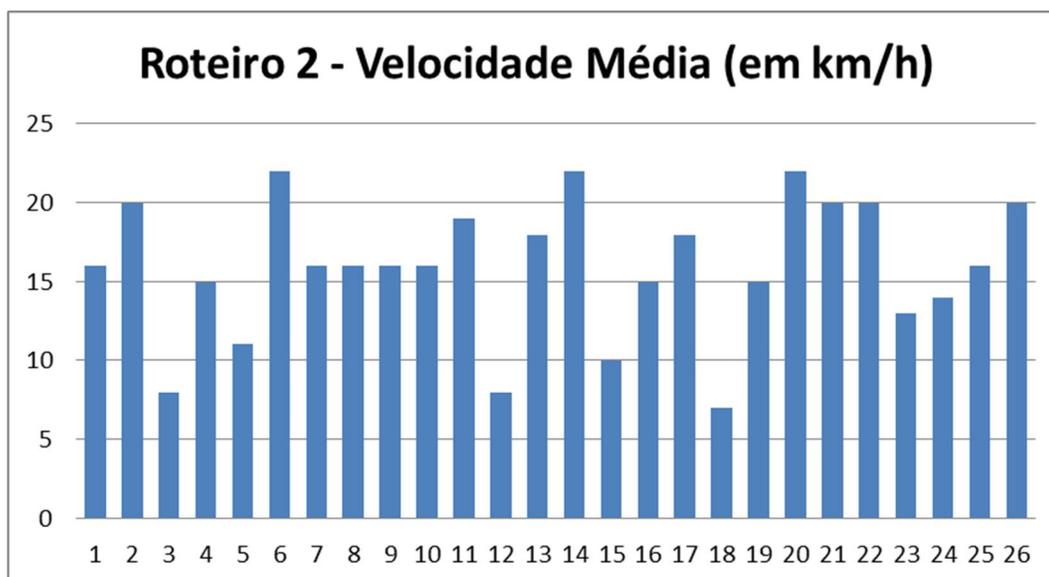


Figura 4.8 – Distribuição da velocidade média de viagem no roteiro 2

Nas figuras 4.7 e 4.8, é possível perceber que, em ambos os roteiros, o veículo viaja a maior parte do percurso no intervalo de velocidade entre 15km/h e 20km/h, sendo que, nas viagens entre os pontos de troca muito próximos um do outro, o veículo reduz sua velocidade

para um intervalo de 10km/h (como é o caso das viagens entre a área de produção e a gráfica, ou do IMECC para o IFCH) e que, quando a distância aumenta entre os pontos visitados, o veículo consegue ganhar mais velocidade e mantê-la entre 25km/h e 30km/h (como é o caso das viagens entre a ADUNICAMP, a FEC e a Sérgio Porto, ou do IEL Para o IA).

Dentre os dados coletados para a elaboração do projeto, constam também as medidas de peso médio dos malotes (em quilogramas) coletadas pelo uso de uma balança comercial (figura 4.9) capaz de pesar até 150kg com divisão de 100 em 100 gramas.



Figura 4.9 – Equipamento utilizado para a pesagem dos malotes

Para o registro de pesagem dos malotes, foram considerados apenas os pesos das encomendas transportadas no interior dos malotes para cada unidade servida pelo setor de expedição. Essas medidas representam o valor médio de três pesagens realizadas durante os momentos de coleta e entrega dos malotes correspondentes de cada unidade atendida pelo setor de expedição. As medidas de peso médio dos malotes das unidades da universidade são apresentadas pelas tabelas 4.5 e 4.6.

Tabela 4.5 – Peso dos malotes das unidades da UNICAMP – Primeiro Roteiro (Continua)

Ponto de troca	Distribuição dos pesos dos malotes (em kg) - Roteiro 1						
	Unidade	Coleta	% Coleta	Carga total/pto	Entrega	% Entrega	Carga total/pto
1	PRP	4,6	2,34	51,2	1,4	0,75	46,8
	CADI	5,9	2,99		6,5	3,49	
	PRDU	0,5	0,25		0,3	0,16	
	PG	4,7	2,39		3,5	1,88	
	CORI	3,6	1,83		3,1	1,66	
	SG	17,3	8,78		17,7	9,50	
	Extecamp	2,4	1,22		1,4	0,75	
	PRE	3,4	1,73		4,1	2,20	
	CEDES	1,3	0,66		1,1	0,59	
	INOVA	4,4	2,23		3,0	1,61	
	GR/CGU	3,1	1,57		4,7	2,52	
2	FCM	11,8	5,99	11,8	11,6	6,22	11,6
3	CECOM	3,9	1,98	3,9	4,0	2,15	4,0
4	Hemocentro	4,2	2,13	4,2	3,0	1,61	3,0
5	Gastrocentro	1,2	0,61	5,2	0,8	0,43	4,8
	ProdeCAD	0,5	0,25		1,1	0,59	
	Creche	1,9	0,96		2,3	1,23	
	Área Saúde	1,6	0,81		0,6	0,32	
6	CECI	2,4	1,22	2,4	3,7	1,98	3,7
7	CAISM	0,8	0,41	2,0	0,7	0,38	3,4
	CEB	1,2	0,61		2,7	1,45	
8	CT	3,5	1,78	5,9	1,1	0,59	2,4
	CPO	2,4	1,22		1,3	0,70	
9	Transporte	2,0	1,02	2,0	2,4	1,29	2,4
10	Área de Produção	4,3	2,18	4,3	2,7	1,45	2,7
11	Gráfica	1,7	0,86	1,7	0,8	0,43	0,8
12	CEMEQ	0,4	0,20	0,4	0,8	0,43	0,8
13	CEMIB	1,5	0,76	1,5	2,8	1,50	2,8
14	LABEURB	3,7	1,88	3,7	4,2	2,25	4,2
15	Editora	4,5	2,28	4,5	4,1	2,20	4,1
16	FEAGRI	1,2	0,61	1,2	2,5	1,34	2,5
17	CEBMEG	2,8	1,42	2,8	2,0	1,07	2,0
18	EMBRAPA	4,6	2,34	6,7	2,6	1,39	5,5
	CEPAGRI	2,1	1,07		2,9	1,56	

Tabela 4.5 – Peso dos malotes das unidades da UNICAMP – Primeiro Roteiro (Conclusão)

Ponto de troca	Distribuição dos pesos dos malotes (em kg) - Roteiro 1						
	Unidade	Coleta	% Coleta	Carga total/pto	Entrega	% Entrega	Carga total/pto
19	CCUEC	3,5	1,78	10,2	1,5	0,80	6,9
	CENAPAD	1,8	0,91		1,8	0,97	
	CGI	2,5	1,27		2,1	1,13	
	GGTE	2,4	1,22		1,5	0,80	
20	NEPO	1,5	0,76	5,1	1,7	0,91	5,7
	NEPP	3,6	1,83		4,0	2,15	
21	ADUNICAMP	4,7	2,39	8,2	2,9	1,56	5,8
	IC	3,5	1,78		2,9	1,56	
22	FEC	4,4	2,23	7,2	3,2	1,72	6,6
	RTV	2,8	1,42		3,4	1,82	
23	Sergio Porto	2,3	1,17	2,3	3,1	1,66	3,1
24	HC	15,6	7,92	15,6	15,4	8,26	15,4
25	DGRH	14,9	7,56	33,0	13,9	7,46	35,4
	SST	3,1	1,57		3,7	1,98	
	DAB	2,0	1,02		4,3	2,31	
	LABJOR	1,4	0,71		1,0	0,54	
	NIED	3,7	1,88		4,2	2,25	
	PRPG	7,9	4,01		8,3	4,45	
Peso Total		197,0	100,00	197,0	186,4	100	186,4
Peso Médio		3,8			3,6		

Tabela 4.6 – Peso dos malotes das unidades da UNICAMP – Segundo Roteiro (Continua)

Ponto de troca	Distribuição dos pesos dos malotes (em kg) - Roteiro 2						
	Unidade	Coleta	% Coleta	Carga total/pto	Entrega	% Entrega	Carga total/pto
1	NEPAM	1,6	1,14	1,6	0,5	0,36	0,5
2	CCS	1,5	1,07	1,5	2,7	1,96	2,7
3	IG	2,7	1,92	2,7	3,3	2,40	3,3
4	FEEC	1,9	1,35	1,9	2,1	1,53	2,1
5	FEQ	2,3	1,63	2,3	0,9	0,65	0,9
6	FEM	2,1	1,49	2,1	3	2,18	3
7	FEA	2,8	1,99	12,2	2	1,45	9,7
	NEPA	1	0,71		0,5	0,36	
	IQ	8,4	5,97		7,2	5,23	
8	CMU	2,7	1,92	13,0	2,8	2,03	13,3
	SAE	3,3	2,35		3,8	2,76	
	DLIE Básico	3,6	2,56		3,9	2,83	
	STU	2	1,42		0,9	0,65	
	CIPA	1,4	1,00		1,9	1,38	
9	IF	8,1	5,76	9,6	8,5	6,18	10,9
	FE	1,5	1,07		2,4	1,74	
10	IE	2,6	1,85	2,6	3,7	2,69	3,7
11	IMECC	7,9	5,61	7,9	7,5	5,45	7,5
12	IFCH	7	4,98	8,2	7,3	5,31	9,4
	CEPETRO	1,2	0,85		2,1	1,53	
13	CEL	1,3	0,92	1,3	1,9	1,38	1,9
14	Comvest	2,9	2,06	2,9	3,6	2,62	3,6
15	FUNCAMP	15,2	10,80	15,2	16,1	11,70	16,1
16	Casa do Lago	2	1,42	2	1,9	1,38	1,9
17	FEF	1,8	1,28	5,8	2,4	1,74	6,2
	CEI	4	2,84		3,8	2,76	
18	BC	2	1,42	5,9	2,1	1,53	5,9
	CDMC	0,7	0,50		0,5	0,36	
	POSTO CORI	3,2	2,27		3,3	2,40	
19	IEL	2,8	1,99	2,8	2,2	1,60	2,2
20	IA	3,2	2,27	3,2	1,1	0,80	1,1
21	CDC	0,9	0,64	0,9	1,4	1,02	1,4
22	DAC	7,5	5,33	13,7	6,9	5,01	11,6
	SAPPE	4,2	2,99		3,3	2,40	
	CLE	2	1,42		1,4	1,02	
23	SIARQ	11,9	8,46	15,6	10,7	7,78	13,2
	DCE	3,7	2,63		2,5	1,82	

Tabela 4.6 – Peso dos malotes das unidades da UNICAMP – Segundo Roteiro (Conclusão)

Ponto de troca	Distribuição dos pesos dos malotes (em kg) - Roteiro 2						
	Unidade	Coleta	% Coleta	Carga total/pto	Entrega	% Entrega	Carga total/pto
24	IB	2,4	1,71	2,4	2,4	1,74	2,4
25	NIPE	3,4	2,42	3,4	3,1	2,25	3,1
Peso Total		140,7	100	140,7	137,6	100	137,6
Peso Médio		3,6			3,5		

A partir das tabelas 4.5 e 4.6, pode-se perceber que o volume da correspondência colocada dentro dos malotes varia de peso, podendo chegar a zero (malote vazio) ou até 20 quilos. Nessas tabelas, identificou-se que, durante o primeiro roteiro de viagens, o maior peso médio de malotes encontrado corresponde às unidades HC e DGRH, que correspondem a um peso médio entre 14 e 16 quilos e que, durante o segundo roteiro de viagens, o maior peso médio encontrado corresponde às unidades FUNCAMP, com peso médio de 15 quilos, e ao SIARQ, com peso médio de 11,5 quilos.

Conforme informação dos funcionários do setor, esse peso pode variar bastante de acordo com o dia da semana (de segunda a sexta-feira), do período do dia (manhã ou tarde), da época do ano (início das aulas, férias, final de ano), de acordo com alguma unidade da Universidade (DGRH, PRPG, Reitoria, etc.), ou de algum evento especial (quando o tribunal de contas se encontra na UNICAMP, por exemplo). Adicionalmente, é possível perceber que, entre os dois tipos de roteiros de viagem, o primeiro apresenta uma quantidade maior de malotes a serem trocados, tanto no período da manhã quanto no período da tarde. E, em contraste com isso, o período da tarde apresenta malotes mais pesados (com maior quantidade de correspondências) do que o período da manhã.

4.4. Avaliação do Desempenho da Situação Existente

Na pesquisa desenvolvida, a base de dados empregada no experimento vigente foi aplicada no programa ArcGIS 10.1, no qual foram registradas as coordenadas pontuais e os pesos médios de cada ponto do roteiro. Esses arquivos foram extraídos da base de dados geográfica da universidade desenvolvida pela empresa FotoTerra em 23 de janeiro de 2013 e que atualmente se encontra disponível na prefeitura da UNICAMP.

A partir da aplicação desses dados no programa ArcGIS, foram desenvolvidos dois mapas de cenário na escala 1:10.047 contendo os seguintes *layers* cada um:

- um *layer* de linha contendo o limite legal do território da UNICAMP;
- um *layer* de ponto contendo a localização e os pesos dos malotes dos pontos onde são efetuadas as trocas;
- um *layer* de ponto contendo a localização do Setor de Expedição;
- um *layer* de linha contendo o traçado da rota que o veículo segue para efetuar as trocas dos malotes.

Os mapas desenvolvidos no programa ArcGIS são apresentados pelas figuras 4.10, 4.11, e 4.12.

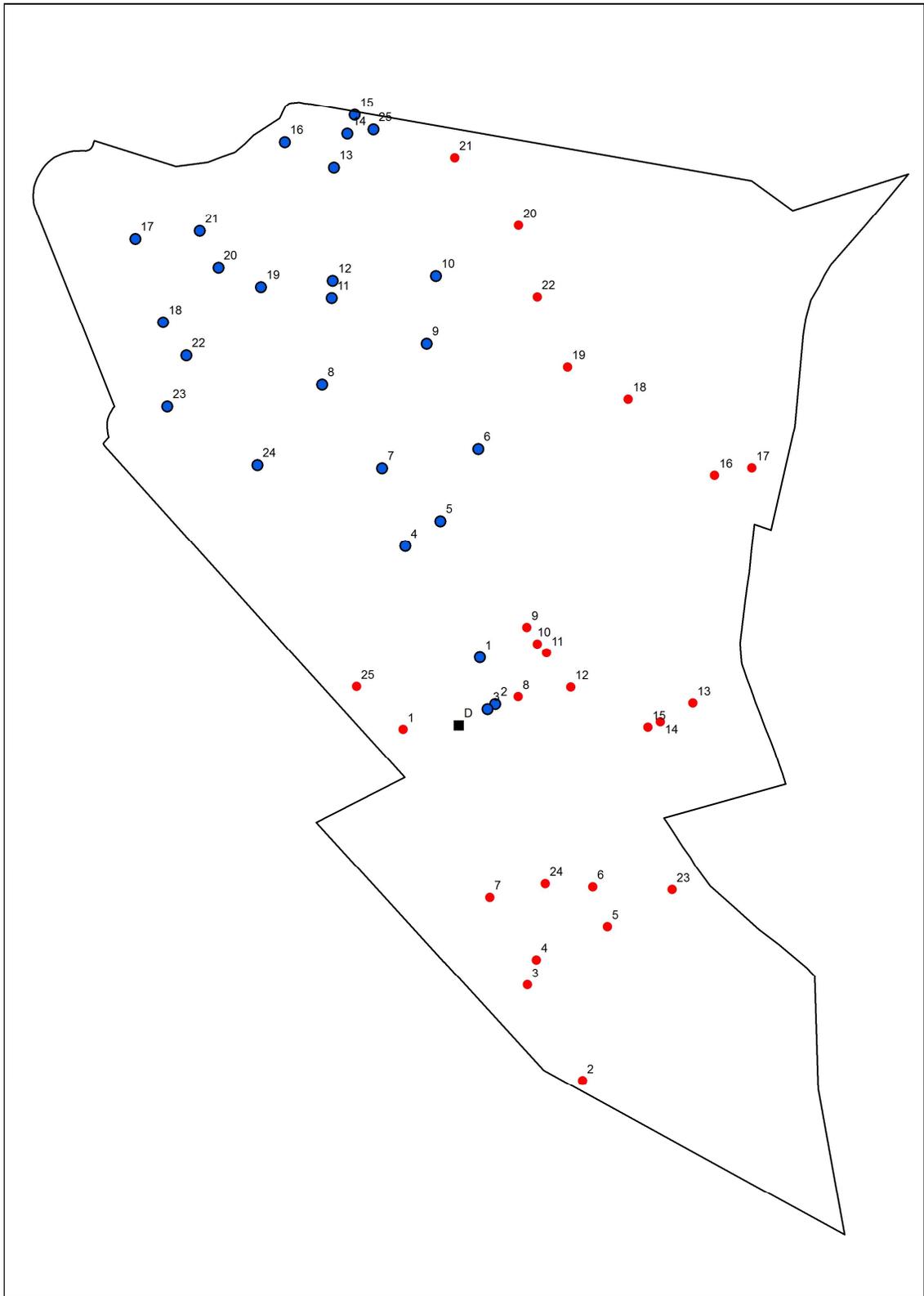


Figura 4.10 – Mapa dos pontos de troca de malotes dos roteiros 1(vermelho) e 2 (azul)

Na figura 4.10, são apresentadas as localizações dos pontos de troca de malotes que cobrem os dois roteiros de viagem dentro do limite legal da UNICAMP, cujo perímetro corresponde a uma extensão de 8.187,5 metros. Nessa figura, os pontos foram enumerados de acordo com a ordem em que foram visitados pelo veículo de operação (Kombi) durante as operações de troca dos malotes, tal como registrado pelas tabelas 4.1 e 4.2 (cenário de referência), considerando-se, neste caso, que os pontos de cor vermelha correspondem aos pontos visitados no roteiro 1, os pontos de cor azul correspondem aos pontos visitados no roteiro 2, e o ponto D de cor preta corresponde ao local do Setor de Expedição (considerado como depósito para o estudo de caso).

Definidos os locais dos pontos de troca, os mapas contendo esses dois roteiros de viagem são apresentados pelas figuras 4.11 e 4.12.

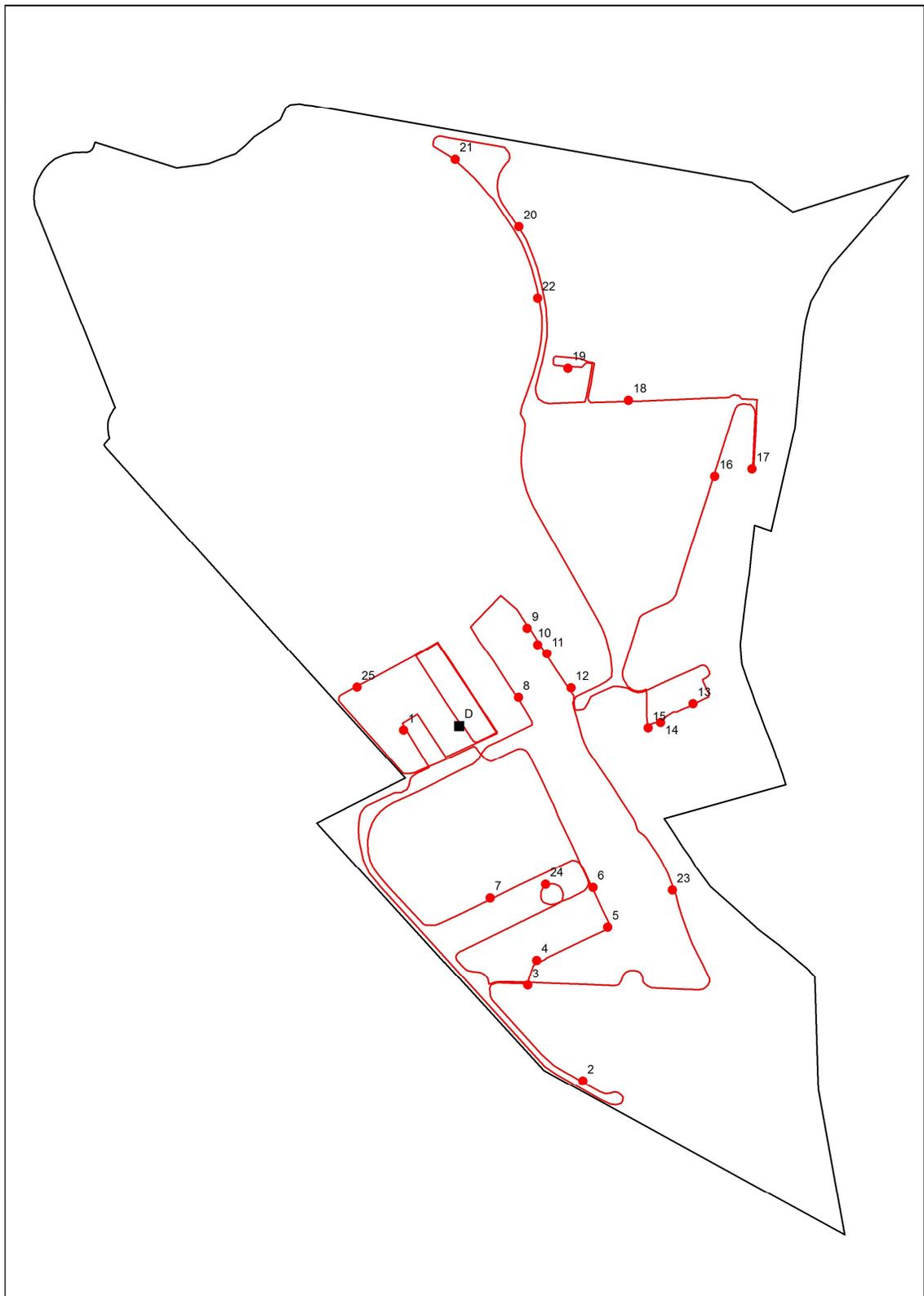


Figura 4.11 – Mapa da operação de troca dos malotes do roteiro 1

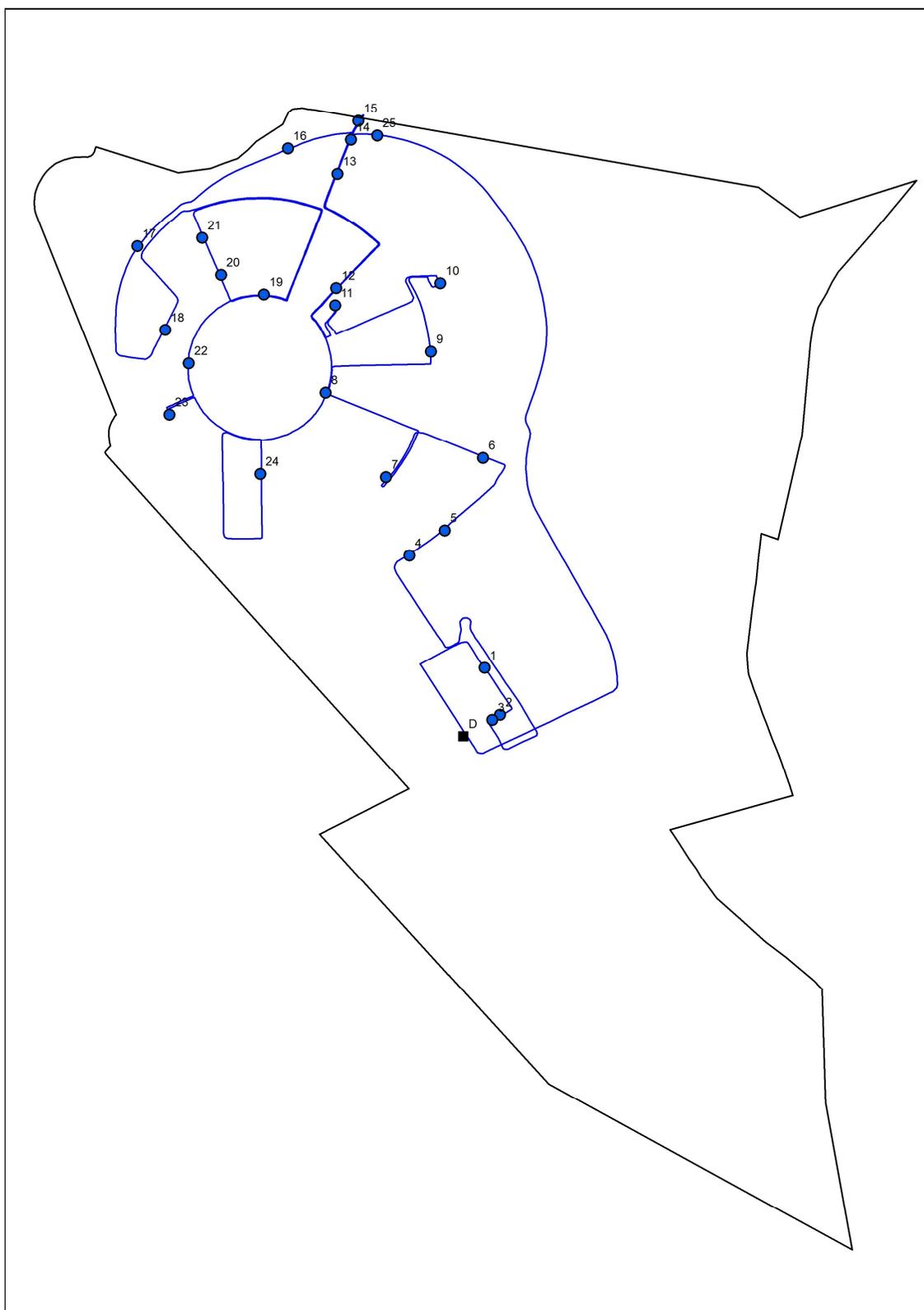


Figura 4.12 – Mapa da operação de troca dos malotes do roteiro 2

Nas figuras 4.11 e 4.12, são apresentados os dois roteiros de viagem que correspondem às duas operações de troca de malotes realizadas na universidade. Esses dois roteiros possuem, respectivamente, distâncias de percurso de cerca de 12.545 metros e 10.720 metros. A partir das informações registradas nesses mapas, foi considerado que os pontos de troca de malotes seriam os pontos geradores da região de análise. E, uma vez definida geograficamente a localização desses pontos geradores, foi considerado que os pontos de ambos os roteiros de viagem seriam tratados como um só cenário de viagem, no qual os 25 pontos de cada roteiro seriam retratados como 50 pontos de um roteiro, de modo a facilitar a análise pelas heurísticas pretendidas. Definido o procedimento de registro dos dados de entrada relacionados com o cenário de estudo, procedeu-se à etapa de aplicação prática dos modelos empregados na análise e à construção dos roteiros de distribuição com o uso da bicicleta.

5. APLICAÇÃO PRÁTICA

Neste capítulo, serão apresentados os procedimentos de aplicação dos modelos propostos neste estudo. As heurísticas mencionadas nos capítulos anteriores serão agora descritas de maneira mais detalhada.

Esse tipo de aplicação tem como objetivo determinar métodos de criação de roteiros e de zoneamento que façam a alocação de frotas de bicicletas ou motocicletas para realizar o transporte dos malotes trocados entre as unidades da UNICAMP.

5.1. Apresentação das Variáveis Tratadas

Nas heurísticas, foram empregados programas computacionais que utilizaram as variáveis de entradas apresentadas na tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Variáveis de entrada dos modelos computacionais

	Coordenadas dos pontos	Indicação do número de pontos a serem atendidos	Número de roteiros	Peso dos malotes nos pontos
<i>Districting</i>	Específico (1)	Sim	Sim	Sim
Clarke e Wright	UTM	Não	Não	Não
Voronoi	UTM	Não	Não	Sim
	Coeficiente k de distância (2)	Limitação de tempo de roteiro	Tempo médio de espera	Velocidade média do veículo (km/h)
<i>Districting</i>	Sim	Não	Sim	Sim
Clarke e Wright	Sim	Sim	Sim	Sim
Voronoi	Não	Não	Não	Não

(1) Em função do programa de aplicação, estabeleceu-se uma malha de coordenada específica com números de menor tamanho (apenas três casas). Assim, estabeleceu-se um par de eixos X,Y que envolvesse apenas o campus da UNICAMP, e as várias coordenadas foram determinadas a partir das diferenças obtidas entre os valores das coordenadas dos pontos e da origem arbitrada.

(2) A variável k corresponde a um fator corretivo que pretende corrigir a distância a ser utilizada nos cálculos do programa. Esta correção deve ser feita, pois as distâncias entre os pontos são definidas a partir das coordenadas espaciais dos pontos em linha reta, e não das distâncias reais do percurso pelo sistema viário convencional.

Nenhum dos programas baseados nos métodos de *Districting*, Clark & Wright e Voronoi utilizados nesta pesquisa tem como variável a capacidade de transporte do veículo em estudo.

Para a realização da comparação pretendida entre os diferentes programas, é necessário destacar as variáveis de saída de cada uma dos programas considerados. As variáveis de saída que serão registradas e apresentadas por cada modelo computacional encontram-se na tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Variáveis de saída dos modelos computacionais

	Distância entre os pontos	Distância total de cada percurso	Quantidade de pontos em roteiro	
<i>Districting</i>	Não	Sim	Sim	
Clarke e Wright	Sim	Sim	Não fornece; Exige contagem	
Voronoi	Não	Não	Não	
	Sequenciamento dos pontos	Sequenciamento otimizado dos pontos (método <i>2-opt</i>)	Somatória dos maiores pesos transportados	Área e perímetro de abrangência de cada ponto
<i>Districting</i>	Sim	Sim	Sim	Não
Clarke e Wright	Sim	Não	Não	Não
Voronoi	Não	Não	Não	Sim
	Tempo total do roteiro	Centro de gravidade de cada roteiro	Indicação da economia de percurso	Resultado gráfico
<i>Districting</i>	Sim	Sim	Não	Não
Clarke e Wright	Sim	Não	Sim	Sim
Voronoi	Não	Não	Não	Sim

5.2. Aplicação Prática do Método de *Districting*

A aplicação do método de *Districting* foi realizada com o uso do programa computacional “Gera_Distritos”, desenvolvido por Novaes e sua equipe em 2014 (vide Anexo E).

Segundo Novaes (2014), a aplicação do programa “Gera_Distritos” determina, para N pontos existentes, um roteiro baseado na minimização da soma dos quadrados das distâncias entre esses N pontos e os baricentros de cada distrito baseado no pressuposto de Hojati (1996) de que a distância a ser minimizada é a distância entre um centro e uma unidade de população, calculada como o quadrado da distância euclidiana entre os centros de gravidade de cada distrito e suas respectivas unidades populacionais.

De acordo com Novaes (2014), esse método de cálculo do quadrado da distância euclidiana entre os baricentros de cada distrito e suas unidades populacionais promove mais força no procedimento de cálculo, de modo a evitar que o modelo aloque um ponto a um distrito muito longe, ou seja, o método do quadrado da distância euclidiana é calculado para garantir uma maior aglutinação dos pontos em cada distrito.

Desse modo, o procedimento de cálculo do programa “Gera_Distritos”, conforme Novaes (2014), foi estruturado com base em dois critérios: formar roteiros que possuam pesos mais ou menos equilibrados entre eles e, simultaneamente, considerar os pontos mais próximos entre eles. E para isso, o programa define o peso dos pontos em cada roteiro, a partir do cálculo do maior peso (entre coleta e entrega de cada ponto) ao longo do roteiro.

Dessa maneira, o programa “Gera_Distritos” busca uma solução que consiga fazer convergir os critérios de equilíbrio de pesos entre os roteiros e a maior proximidade entre pontos do roteiro. A solução é obtida a partir dos roteiros formados com base nesses dois critérios.

Como foi explicado anteriormente na aplicação do programa “Gera_Distritos”, as coordenadas UTM foram convertidas no sistema cartesiano específico para permitir uma melhor resolução do programa. Na tabela 5.3, as coordenadas apresentadas estão em seus valores convertidos.

Tabela 5.3 – Coordenadas registradas no processo de execução do programa “Gera_Distritos”

N	Coordenadas em X e Y		N	Coordenadas em X e Y	
	X	Y		X	Y
Depósito (0)	938	1128			
1	816	1119	26	984	1277
2	1209	351	27	1018	1174
3	1088	560	28	1001	1163
4	1108	615	29	821	1520
5	1263	687	30	898	1575
6	1231	774	31	981	1732
7	1006	751	32	770	1690
8	1068	1191	33	639	1873
9	1087	1343	34	868	1962
10	1110	1307	35	888	2111
11	1130	1287	36	660	2063
12	1183	1212	37	662	2101
13	1450	1177	38	665	2349
14	1379	1136	39	694	2423
15	1352	1124	40	710	2464
16	1498	1675	41	557	2404
17	1579	1691	42	230	2192
18	1309	1842	43	291	2009
19	1176	1912	44	505	2087
20	1069	2223	45	423	2193
21	929	2371	46	371	2210
22	1110	2066	47	342	1937
23	1405	768	48	300	1826
24	1127	781	49	497	1697
25	714	1213	50	751	2432

Com isso, a aplicação do método de *Districting* pelo programa “Gera_Distritos” foi executada, considerando-se os dados de entrada apresentados pela tabela 5.4, a seguir. Nesta tabela, as letras em parênteses correspondem à denominação das variáveis no programa.

Tabela 5.4 – Dados de entrada do programa “Gera_Distritos”

Nome do Veículo		Número de distritos (M)			Número de pontos do roteiro (N)	Velocidade do veículo (V)		Coeficiente de distância k (Kd)	Tempo médio de parada (TPar) (min)
						Bike	Moto		
Bike	Moto	4	5	6	50	20	40	1,78	1,0

A partir desses dados de entrada, o programa “Gera_Distritos” forneceu os seguintes resultados, apresentados pela tabela 5.5 como as variáveis de saída do programa.

Tabela 5.5 – Variáveis de saída do programa “Gera_Distritos”

M	Função Objetivo	Rota	Número de pontos	Distância total de cada percurso (metros)	Somatória dos maiores pesos transportados (Kg)	Tempo total do roteiro (min)	
						Bike	Moto
4	391,9	1	12	6674	101,8	20,0	16,0
		2	12	7071	62,6	22,5	17,2
		3	12	7180	91,2	21,6	16,8
		4	14	6416	88,3	19,7	16,9
5	257,6	1	15	6586	108,2	25,3	20,2
		2	3	5835	31,0	7,9	5,5
		3	10	6855	66,7	19,5	14,8
		4	10	4893	65,8	16,8	13,4
		5	12	6224	72,8	17,2	14,6
6	153,8	1	8	3617	86,6	13,3	10,6
		2	11	6204	46,3	16,9	14,0
		3	3	4722	25,3	6,9	5,0
		4	9	5305	65,2	17,0	13,0
		5	10	6291	64,4	16,4	13,2
		6	9	5630	57,6	13,8	11,4

As aplicações apresentadas na tabela 5.5 forneceram os seguintes tipos de viagens, mostradas pela tabela 5.6

Tabela 5.6 – Sequenciamento de roteiros do programa “Gera_Distritos”

M	Rota	Sequência otimizada (método <i>2-opt</i>)																
		D	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	D
4	1	D	1	7	4	3	2	5	6	8	11	10	9	22				D
	2	D	24	12	15	14	13	17	16	18	19	20	21	27				D
	3	D	23	28	26	30	31	34	35	39	33	32	29	25				D
	4	D	36	37	38	50	40	41	44	45	46	42	43	47	48	49		D
5	1	D	1	7	4	3	2	5	6	14	17	18	9	10	11	12	8	D
	2	D	21	22	24													D
	3	D	27	26	25	31	20	19	16	13	15	23						D
	4	D	28	30	34	35	39	37	36	33	32	29						D
	5	D	49	48	47	43	42	46	45	41	40	50	38	44				D
6	1	D	1	7	4	3	2	5	6	8								D
	2	D	9	10	11	12	14	17	16	18	19	20	21					D
	3	D	22	27	24													D
	4	D	28	23	13	15	26	30	31	32	25							D
	5	D	29	33	44	42	41	40	38	37	36	35						D
	6	D	34	50	39	45	46	43	47	48	49							D

Esses roteiros são ilustrados com o auxílio da ferramenta ArcGIS, sendo que os roteiros definidos pela tabela 5.6 são ilustrados em mapas na escala 1:10.047 pelas figuras 5.1, 5.2, e 5.3

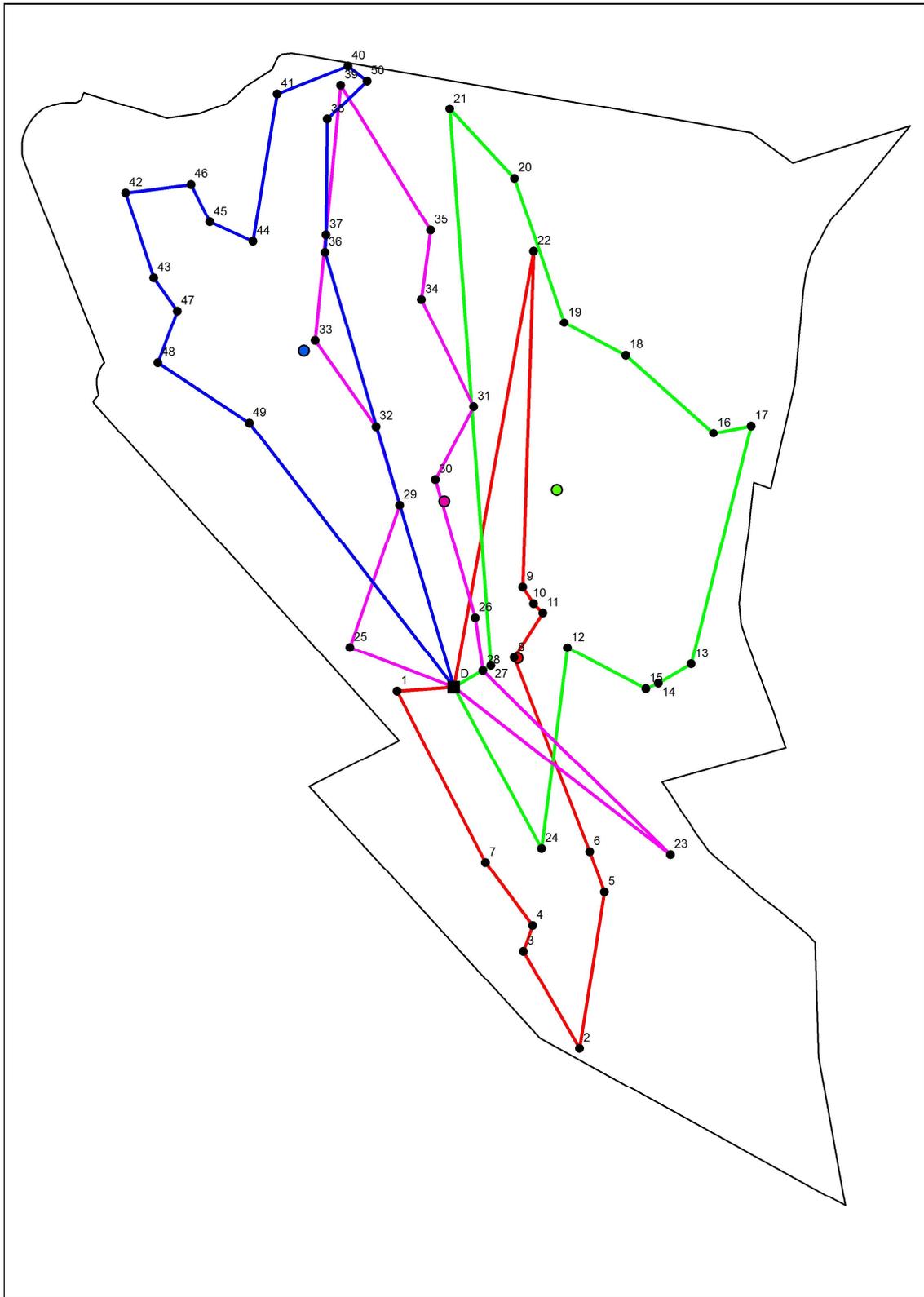


Figura 5.1 – Mapa elaborado com o uso do programa ArcGIS da operação de 4 roteiros apresentada pelo programa “Gera_Distritos”

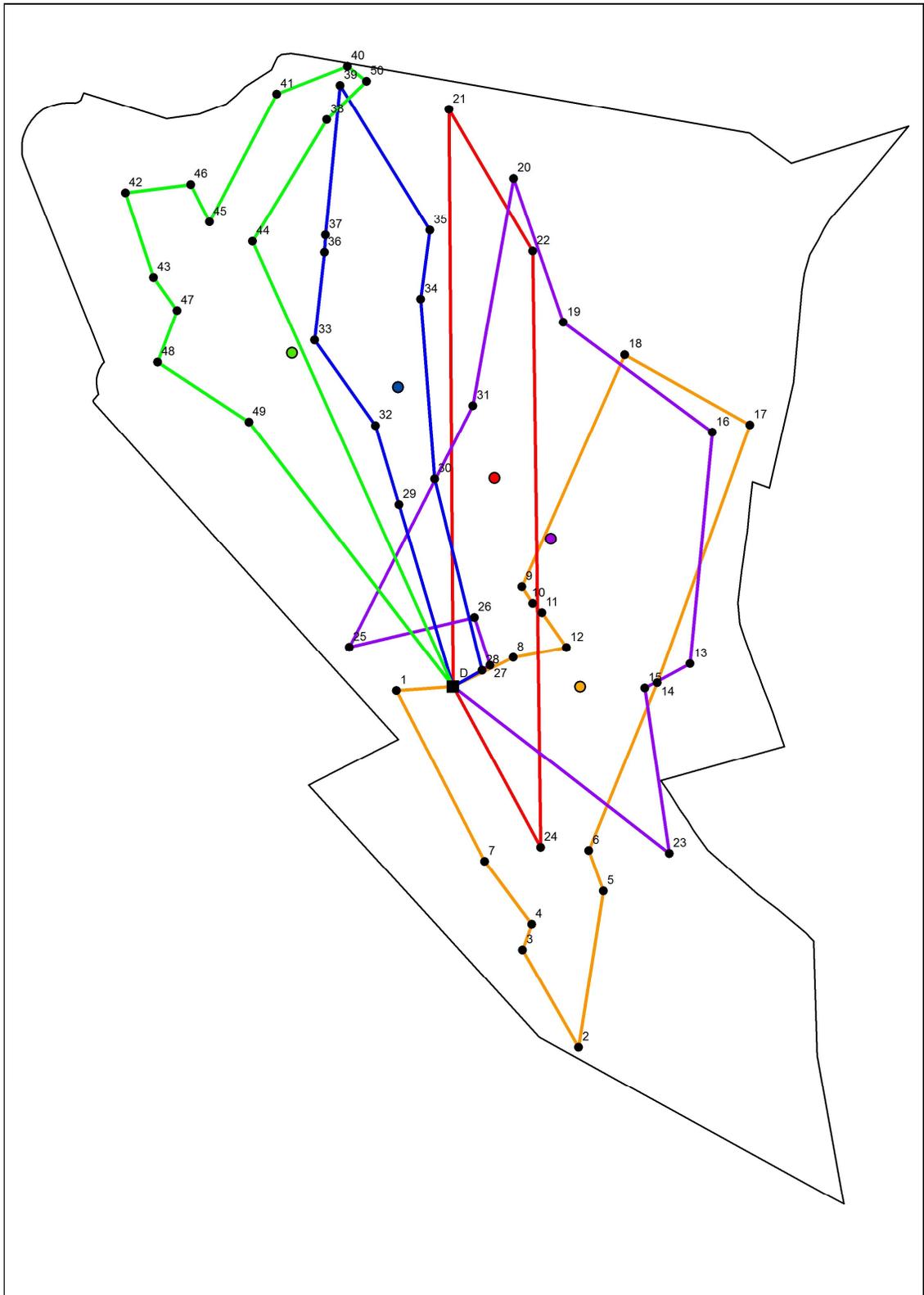


Figura 5.2 – Mapa elaborado com o uso do programa ArcGIS da operação de 5 roteiros apresentada pelo programa “Gera_Distritos”

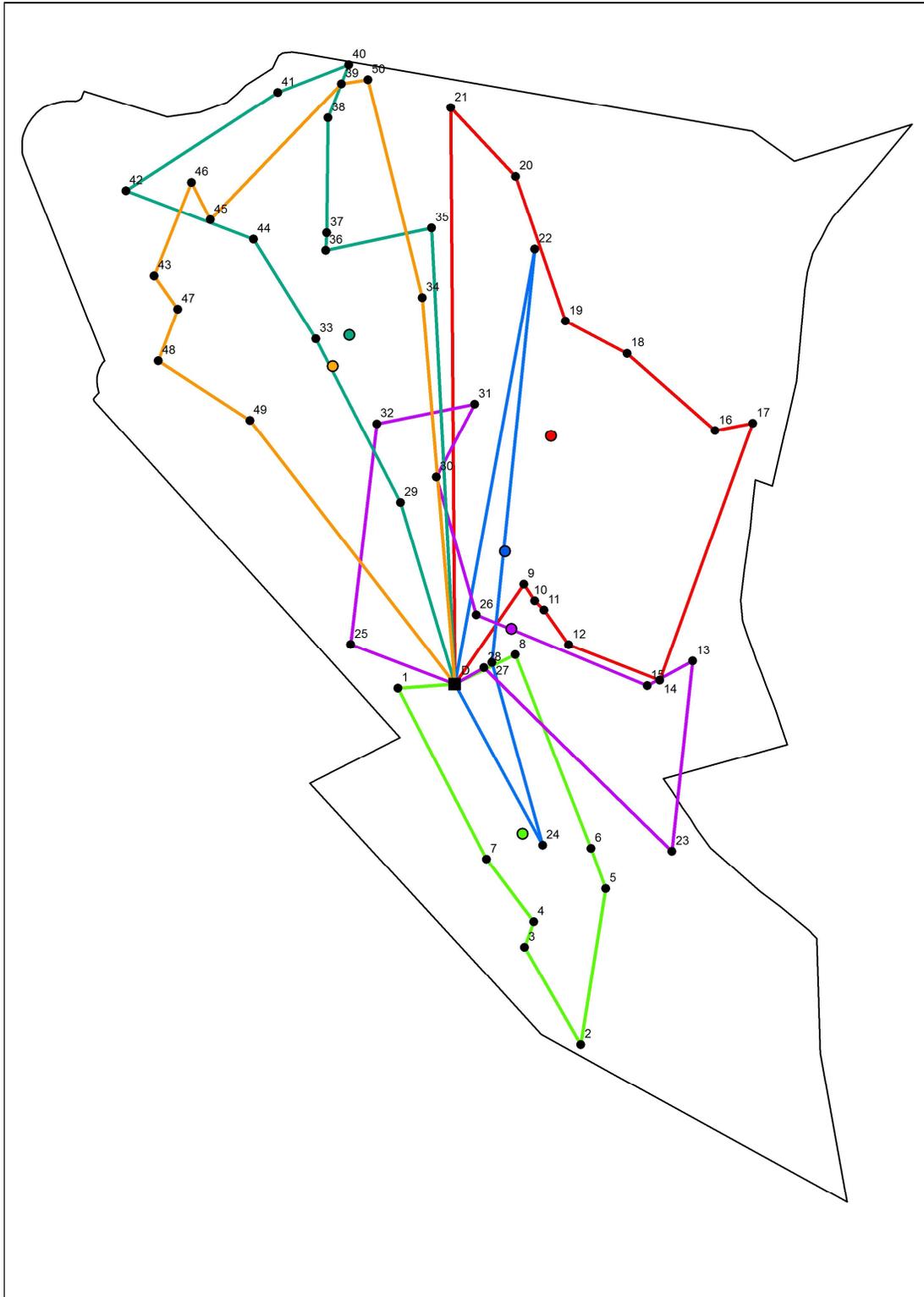


Figura 5.3 – Mapa elaborado com o uso do programa ArcGIS da operação de 6 roteiros apresentada pelo programa “Gera_Distritos”

Nas figuras 5.1, 5.2, e 5.3, os pontos coloridos representam os respectivos pontos de gravidade de cada roteiro elaborado pelo programa “Gera_Distritos”.

As soluções gráficas obtidas permitiram concluir que:

- O programa formula roteiros com base na heurística de *Districting* de Hojati (1996) para fornecer uma solução alternativa em relação ao problema de transporte e não oferece uma solução de acordo com o critério de distritos distintos, e com roteiros com trajetória que se cruzam. A solução de Hojati tenta igualar a medida de peso entre roteiros e, ao mesmo tempo, formar roteiros com base na distância mínima de percurso.
- Nesse ponto, o programa “Gera_Distritos” considera a variável de peso no cálculo para a formação de roteiros. O programa consegue fornecer soluções com um mínimo de 4 rotas e um máximo de 15 rotas.
- O programa “Gera_Distritos” está em fase de desenvolvimento. A versão atual do programa ainda não consegue identificar a melhor solução para o objeto de estudo.
- A aplicação do programa “Gera_Distritos” foi uma tentativa para a resolução da situação de estudo. Como é observado nas tabelas 5.5, e 5.6, e nas figuras 5.1, 5.2, e 5.3, a tentativa de aplicação do programa “Gera_Distritos” não apresentou os resultados esperados quanto à formação de distritos distintos; ao invés disso, o programa apresentou soluções em formato de roteiros. Segundo Novaes (2014), o problema, nesse caso, foi que a regra de aplicação do programa não considera mais apenas o critério de igualdade de peso entre os distritos. Nesse caso, a regra considera que cada entrega não é independente uma da outra, e, dessa forma, define que se deve formar um roteiro, considerando que a restrição do modelo está ligada ao próprio roteiro. Isso significa que a regra se refere a outra combinação de pontos. Como resultado, a convergência do modelo se dá quando a solução $x_{ij}^{(B)}$ em um estágio B se iguala à solução $x_{ij}^{(A)}$ do estágio anterior. E, portanto, a otimização que ocorre dentro do roteiro não condiz com a regra de otimização dos distritos determinada no problema dos votos proposto por Hojati (1996).

5.3. Aplicação Prática do Método de Clarke e Wright

A aplicação do método Clarke e Wright foi realizada com o uso do programa “Clarke Wright”, que vem sendo desenvolvido por Bez (2014) e sua equipe.

Na figura 5.4, apresentam-se um modelo geral de tela de execução do programa e o seu modo de funcionamento. Na coluna da esquerda, estão apresentados os dados de saída referentes aos cálculos de valor economizado de percurso, os sequenciamentos de pontos que formam os diferentes roteiros, a distância total de cada rota e o tempo total de percurso em cada rota.

- A janela **Tempo máximo por rota (min)**, na qual é registrada a variável de entrada de tempo máximo em minutos de permanência do veículo em um roteiro para executar a operação de distribuição.
- A janela **Velocidade média (km/h)**, na qual é registrada a variável de entrada de velocidade média do veículo durante o percurso de rota.
- O botão **Iniciar**, que inicia o procedimento de cálculo do método Clarke e Wright, carregando em memória o arquivo de pontos “pontos.txt” e processando esses mesmos pontos para gerar a(s) rota(s) de menor custo.
- O botão **Mapa**, que abre uma nova tela com o Google Maps, para visualizar a(s) rota(s) no mapa.
- O botão **Reiniciar**, que limpa as informações de saída do programa.

Na parte de soluções, o programa apresenta os seguintes resultados relacionados com os conceitos:

- custo da rota, que representa a distância total percorrida em cada rota;
- tempo da rota, que corresponde ao tempo total gasto em cada roteiro.

Este programa “Clarke Wright” apresenta um resultado gráfico no qual os traçados dos roteiros são definidos em um mapa do Google Maps.

Quando se clica no botão **Mapa**, o programa abre uma nova tela com o Google Maps, apresentando os sequenciamentos dos pontos de cada roteiro e seus respectivos traçados de percurso de viagem. Esse resultado gráfico está apresentado, em forma geral, na figura 5.5.

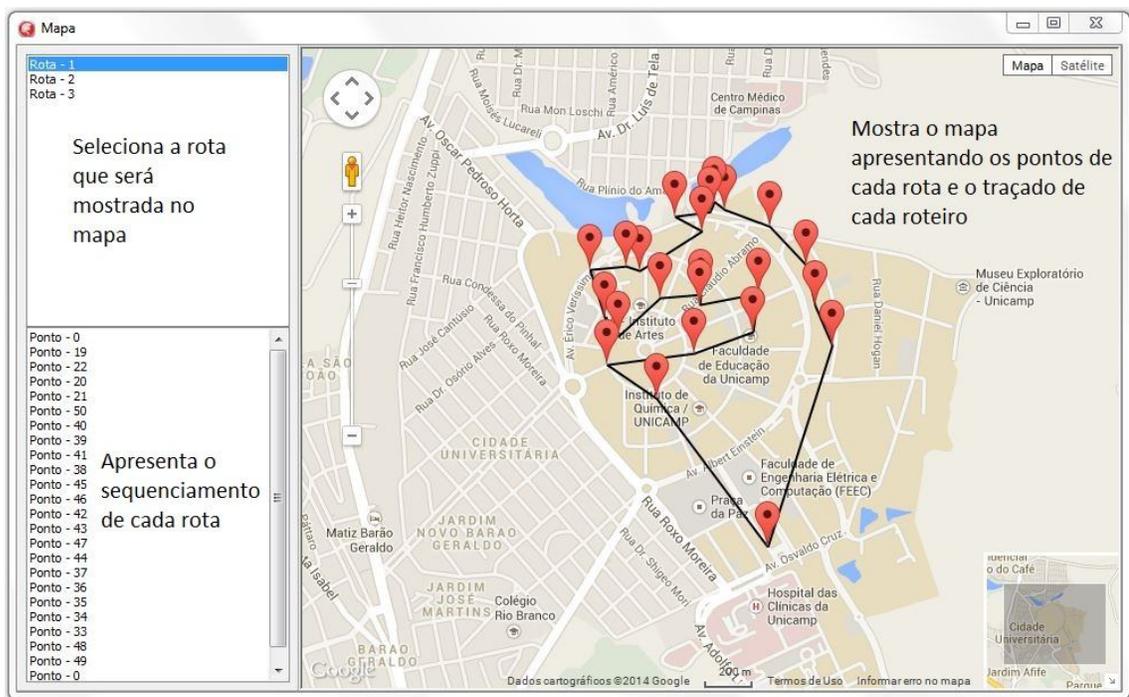


Figura 5.5 – Tela do Mapa de Percurso

Na tela do Mapa de Percurso, é possível visualizar a(s) rota(s) no mapa ao clicar na lista à esquerda. O uso dessa tela promove melhorias no aspecto visual e funcional que fornecem melhor entendimento das soluções encontradas pelo programa.

As aplicações do programa “Clark Wright” foram realizadas considerando-se as variáveis de entrada apresentadas na tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Dados de entrada do programa “Clarke Wright”

Veículo	Velocidade Média (km/h)	Coeficiente de distância k	Tempo médio de parada (min)	Número de rotas	Tempo de permanência em roteiro (min)	
					Min	Max
Bike	20	1,78	1,0	3	39	53
				4	33	38
				5	27	32
				6	24	26
Moto	40	1,78	1,0	3	28	40
				4	23	27
				5	20	22
				6	16	19

As variáveis de entrada apresentadas na tabela 5.7 correspondem aos cenários de operação de distribuição com o uso de bicicleta e com o uso de motocicletas.

Ambas as operações contiveram respectivamente 3, 4, 5 e 6 rotas de distribuição conforme os valores definidos pela variável Tempo máximo por rota (min), de acordo com o método de funcionamento do programa “Clarke Wright”.

A partir da aplicação desse programa, foram obtidos os seguintes resultados de operação apresentados nas tabelas 5.8 e 5.9 como as variáveis de saída do programa:

Tabela 5.8 – Variáveis de saída do programa “Clarke Wright” para bicicleta

Veículo	Rotas	Número da rota	Distância total de cada percurso (m)		Tempo total do roteiro (min)	
			Min	Max	Min	Max
Bike	3	1	7589,37	9352,21	40	52
		2	7876,67	4004,00	39	20
		3	6861,98	5190,00	39	34
	4	1	6468,64	7158,94	32	37
		2	6785,97	6785,32	32	35
		3	5912,89	7900,64	34	41
		4	3730,70	328,59	20	3
	5	1	4874,12	6445,33	23	31
		2	5565,45	6177,43	26	29
		3	5787,96	4004,00	26	20
		4	4787,15	4816,51	26	23
		5	4735,49	2500,70	26	19
	6	1	5415,34	5415,34	23	23
		2	4962,58	5085,77	23	25
		3	5378,92	5548,97	23	25
		4	4004,00	2873,61	20	11
		5	4816,51	4773,49	23	25
		6	2500,70	3702,04	19	23

Tabela 5.9 – Variáveis de saída do programa “Clarke Wright” para motocicleta

Veículo	Rotas	Número da rota	Distância total de cada percurso (m)		Tempo total do roteiro (min)	
			Min	Max	Min	Max
Moto	3	1	7158,94	9352,21	27	38
		2	7463,72	4004,00	27	14
		3	6890,58	5189,96	27	26
	4	1	6445,33	6609,52	22	26
		2	6520,47	4004,00	22	14
		3	5115,20	6879,84	22	26
		4	5133,58	1932,59	20	13
	5	1	6332,27	6445,30	19	21
		2	5902,84	6192,23	20	20
		3	4004,00	4004,00	14	14
		4	5711,85	4816,51	19	16
		5	2500,71	2500,71	15	15
	6	1	5415,34	4874,12	15	15
		2	4962,78	5565,45	15	17
		3	5378,92	5787,96	15	18
		4	4497,08	4723,93	16	18
		5	4566,50	4552,87	15	18
		6	2500,71	684,52	15	3

Os roteiros definidos pelos vários pontos pelo programa “Clark Wright” são apresentados nas tabelas 5.10 e 5.11, respectivamente, para bicicletas e motocicletas.

Tabela 5.10 – Sequenciamento de roteiros pelo programa “Clarke Wright” para bicicletas

Rotas		Sequência de pontos do roteiro	
		Min	Max
3	1	0-35-36-37-44-47-43-42-46-45-38-41-39-40-50-21-20-22-0	0-32-31-19-22-20-21-50-40-39-41-38-45-46-42-43-47-44-37-36-35-34-33-48-49-0
	2	0 - 24 - 6 - 4 - 2 - 3 - 5 - 23 - 28 - 27 - 8 - 30 - 31 - 32 - 1 - 7 - 0	0 - 24 - 4 - 2 - 3 - 5 - 23 - 6 - 7 - 0
	3	0 - 26 - 9 - 10 - 11 - 12 - 15 - 14 - 13 - 16 - 17 - 18 - 19 - 34 - 33 - 48 - 49 - 29 - 25 - 0	0 - 1 - 25 - 29 - 30 - 18 - 17 - 16 - 13 - 14 - 15 - 12 - 11 - 10 - 9 - 26 - 8 - 27 - 28 - 0
4	1	0 - 47 - 43 - 42 - 46 - 45 - 38 - 41 - 39 - 40 - 50 - 21 - 20 - 22 - 0	0 - 36 - 37 - 44 - 47 - 43 - 42 - 46 - 45 - 38 - 41 - 39 - 40 - 50 - 21 - 20 - 22 - 0
	2	0 - 16 - 17 - 18 - 19 - 34 - 35 - 36 - 37 - 44 - 48 - 49 - 33 - 0	0 - 29 - 49 - 48 - 33 - 34 - 35 - 19 - 18 - 17 - 16 - 13 - 14 - 15 - 12 - 26 - 0
	3	0 - 29 - 9 - 10 - 11 - 12 - 15 - 14 - 13 - 23 - 5 - 3 - 2 - 4 - 6 - 24 - 7 - 0	0 - 7 - 1 - 25 - 32 - 31 - 30 - 9 - 10 - 11 - 8 - 23 - 5 - 3 - 2 - 4 - 6 - 24 - 0
	4	0 - 30 - 31 - 32 - 1 - 25 - 26 - 8 - 27 - 28 - 0	0 - 27 - 28 - 0
5	1	0 - 49 - 48 - 47 - 43 - 42 - 46 - 45 - 44 - 0	0 - 47 - 43 - 42 - 46 - 45 - 38 - 41 - 39 - 40 - 50 - 21 - 20 - 0
	2	0 - 35 - 21 - 50 - 40 - 39 - 41 - 38 - 36 - 37 - 0	0 - 33 - 34 - 19 - 22 - 35 - 36 - 37 - 44 - 48 - 49 - 0
	3	0 - 31 - 34 - 20 - 22 - 19 - 16 - 17 - 18 - 30 - 0	0 - 24 - 4 - 2 - 3 - 5 - 23 - 6 - 7 - 0
	4	0 - 7 - 24 - 6 - 4 - 2 - 3 - 5 - 23 - 13 - 14 - 15 - 12 - 0	0 - 32 - 31 - 18 - 17 - 16 - 13 - 14 - 15 - 26 - 0
	5	0 - 1 - 26 - 29 - 25 - 33 - 32 - 9 - 10 - 11 - 8 - 27 - 28 - 0	0 - 1 - 25 - 29 - 30 - 9 - 10 - 11 - 12 - 8 - 27 - 28 - 0
6	1	0 - 38 - 41 - 39 - 40 - 50 - 21 - 35 - 0	0 - 38 - 41 - 39 - 40 - 50 - 21 - 35 - 0
	2	0 - 36 - 37 - 44 - 45 - 46 - 42 - 43 - 47 - 0	0 - 36 - 37 - 44 - 45 - 46 - 42 - 43 - 47 - 48 - 49 - 0
	3	0 - 19 - 22 - 20 - 34 - 33 - 48 - 49 - 0	0 - 31 - 34 - 20 - 22 - 19 - 16 - 17 - 18 - 0
	4	0 - 24 - 4 - 2 - 3 - 5 - 23 - 6 - 7 - 0	0 - 32 - 33 - 0
	5	0 - 32 - 31 - 18 - 17 - 16 - 13 - 14 - 15 - 26 - 0	0 - 24 - 6 - 4 - 2 - 3 - 5 - 23 - 13 - 14 - 15 - 26 - 0
	6	0 - 1 - 25 - 29 - 30 - 9 - 10 - 11 - 12 - 8 - 27 - 28 - 0	0 - 7 - 1 - 25 - 29 - 30 - 9 - 10 - 11 - 12 - 8 - 27 - 28 - 0

Tabela 5.11 – Sequenciamento de roteiros pelo programa “Clarke Wright” para motocicletas

Rotas		Sequência de pontos do roteiro	
		Min	Max
3	1	0 - 36 - 37 - 44 - 47 - 43 - 42 - 46 - 45 - 38 - 41 - 39 - 40 - 50 - 21 - 20 - 22 - 0	0 - 32 - 31 - 19 - 22 - 20 - 21 - 50 - 40 - 39 - 41 - 38 - 45 - 46 - 42 - 43 - 47 - 44 - 37 - 36 - 35 - 34 - 33 - 48 - 49 - 0
	2	0 - 24 - 6 - 4 - 2 - 3 - 5 - 23 - 28 - 27 - 8 - 26 - 25 - 1 - 32 - 31 - 30 - 0	0 - 24 - 4 - 2 - 3 - 5 - 23 - 6 - 7 - 0
	3	0 - 9 - 10 - 11 - 12 - 15 - 14 - 13 - 16 - 17 - 18 - 19 - 35 - 34 - 33 - 48 - 49 - 29 - 0	0 - 1 - 25 - 29 - 30 - 18 - 17 - 16 - 13 - 14 - 15 - 12 - 11 - 10 - 9 - 26 - 8 - 27 - 28 - 0
4	1	0 - 47 - 43 - 42 - 46 - 45 - 38 - 41 - 39 - 40 - 50 - 21 - 20 - 0	0 - 49 - 48 - 47 - 43 - 42 - 46 - 45 - 38 - 41 - 39 - 40 - 50 - 21 - 20 - 22 - 31 - 0
	2	0 - 33 - 34 - 19 - 22 - 35 - 36 - 37 - 44 - 48 - 49 - 29 - 30 - 0	0 - 24 - 4 - 2 - 3 - 5 - 23 - 6 - 7 - 0
	3	0 - 15 - 14 - 13 - 16 - 17 - 18 - 31 - 32 - 9 - 10 - 11 - 12 - 8 - 27 - 0	0 - 29 - 32 - 30 - 33 - 44 - 37 - 36 - 35 - 34 - 19 - 18 - 17 - 16 - 13 - 14 - 15 - 0
	4	0 - 24 - 4 - 2 - 3 - 5 - 23 - 6 - 7 - 1 - 25 - 26 - 28 - 0	0 - 1 - 25 - 26 - 9 - 10 - 11 - 12 - 8 - 27 - 28 - 0
5	1	0 - 43 - 42 - 46 - 45 - 38 - 41 - 39 - 40 - 50 - 21 - 0	0 - 43 - 42 - 46 - 45 - 38 - 41 - 39 - 40 - 50 - 21 - 20 - 0
	2	0 - 49 - 48 - 47 - 44 - 37 - 36 - 35 - 20 - 22 - 19 - 32 - 0	0 - 33 - 34 - 19 - 22 - 35 - 36 - 37 - 44 - 47 - 48 - 49 - 0
	3	0 - 24 - 4 - 2 - 3 - 5 - 23 - 6 - 7 - 0	0 - 24 - 4 - 2 - 3 - 5 - 23 - 6 - 7 - 0
	4	0 - 33 - 34 - 31 - 18 - 17 - 16 - 13 - 14 - 15 - 26 - 0	0 - 32 - 31 - 18 - 17 - 16 - 13 - 14 - 15 - 26 - 0
	5	0 - 1 - 25 - 29 - 30 - 9 - 10 - 11 - 12 - 8 - 27 - 28 - 0	0 - 1 - 25 - 29 - 30 - 9 - 10 - 11 - 12 - 8 - 27 - 28 - 0
6	1	0 - 38 - 41 - 39 - 40 - 50 - 21 - 35 - 0	0 - 49 - 48 - 47 - 43 - 42 - 46 - 45 - 44 - 0
	2	0 - 36 - 37 - 44 - 45 - 46 - 42 - 43 - 47 - 0	0 - 35 - 21 - 50 - 40 - 39 - 41 - 38 - 36 - 37 - 0
	3	0 - 19 - 22 - 20 - 34 - 33 - 48 - 49 - 0	0 - 31 - 34 - 20 - 22 - 19 - 16 - 17 - 18 - 30 - 0
	4	0 - 26 - 24 - 4 - 2 - 3 - 5 - 23 - 6 - 7 - 0	0 - 7 - 24 - 6 - 4 - 2 - 3 - 5 - 23 - 13 - 14 - 15 - 0
	5	0 - 32 - 31 - 18 - 17 - 16 - 13 - 14 - 15 - 0	0 - 26 - 29 - 25 - 33 - 32 - 9 - 10 - 11 - 12 - 8 - 27 - 0
	6	0 - 1 - 25 - 29 - 30 - 9 - 10 - 11 - 12 - 8 - 27 - 28 - 0	0 - 1 - 28 - 0

- na janela inicial (figura 5.7a), o campo 1 corresponde ao registro dos pontos de troca de cada roteiro de viagem; o campo 2 corresponde ao local de destino do arquivo *raster* a ser salvo e seu respectivo nome; e o campo 3 corresponde ao formato desse arquivo;
- na janela seguinte (figura 5.7b), o campo 4 corresponde ao valor estabelecido para os tamanhos de célula de *raster* (célula onde são inseridos os dados do tipo matricial); e o campo 5 corresponde ao campo da tabela onde devem ser inseridos os campos de identificação dos pontos do roteiro.

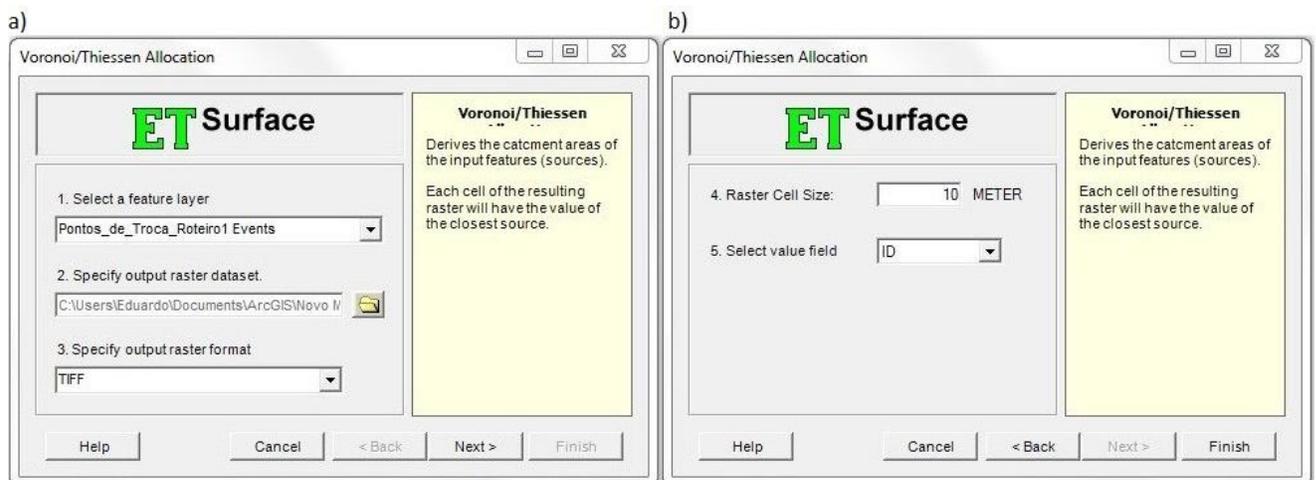


Figura 5.7 – Processo de criação do Diagrama de Voronoi Simples

Concluído esse procedimento, a solução gráfica do diagrama de Voronoi simples é apresentada em um mapa com escala 1:10.047, pela figura 5.8, (na qual o *layer* em formato de *raster* foi convertido em formato de polígono a partir da aplicação do ArcGIS); os respectivos dados de saída desse diagrama são apresentados pela tabela 5.12.

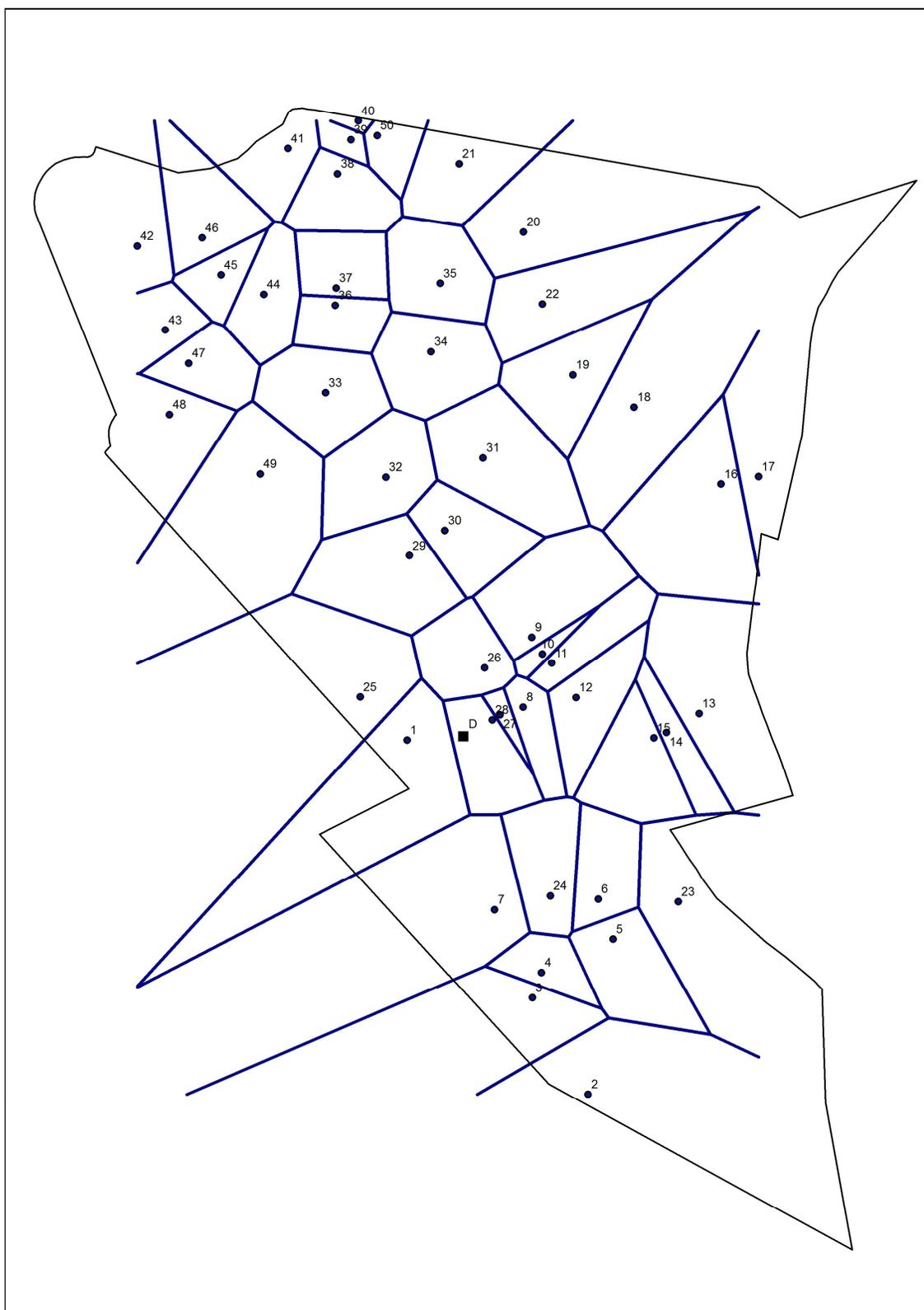


Figura 5.8 – Diagrama de Voronoi Simples aplicado ao cenário de estudo

Tabela 5.12 – Dados de saída do Diagrama de Voronoi Simples (Continua)

ID	Nome	Peso	Área	Perímetro
1	PRP/CADI/PRDU/PG/CORI/SG/EXTECAMP/PRE/CEDES/INOVA/GR/CGU	49	132420	2056
2	FCM	18	269943	2579
3	CECOM	4	260898	2630
4	HEMOCENTRO	4	20030	649
5	GASTROCENTO/PRODECAD/CRECHE/AREA SAÚDE	5	44865	905
6	CECI	3	31566	753
7	CAISM/CEB	3	291027	2644
8	CT/CPO	4	19210	661
9	TRANSPORTE	2	55268	953
10	ÁREA DE PRODUÇÃO	4	5727	504
11	GRÁFICA	1	23932	770
12	CEMEQ	1	36440	939
13	CEMIB	2	141996	1521
14	LABEURB	4	21031	855
15	EDITORA	4	41921	894
16	FEAGRI	2	87689	1273
17	CEBMEG	2	118275	1890
18	EMBRAPA/CEPAGRI	6	155218	1984
19	CCUEC/CENAPAD/CGI/GGTE	9	47900	1015
20	NEPO/NEPP	5	254946	2154
21	ADUNICAMP/IC	7	133287	1675
22	FEC/RTV	7	71699	1414
23	SERGIO PORTO	3	177724	1729
24	HC	16	38238	824
25	DGRH/SST/DAB/LABJOR/NIED/PRPG	34	375343	2683
26	NEPAM	1	33179	693
27	CCS	2	5065	458
28	IG	3	33612	774
29	FEEC	2	59281	973
30	FEQ	2	37745	809
31	FEM	3	67960	1046
32	FEA/NEPA/IQ	11	47696	858
33	CMU/SAE/DLIE BÁSICO/STU/CIPA	13	48897	845
34	IF/FE	8	48012	827
35	IE	2	43261	798
36	IMECC	3	21779	602
37	IFCH/CEPETRO	8	28020	679
38	CEL	9	32017	714
39	COMVEST	2	6969	368

Tabela 5.12 – Dados de saída do Diagrama de Voronoi Simples (Conclusão)

ID	Nome	Peso	Área	Perímetro
40	FUNCAMP	3	52929	998
41	CASA DO LAGO	2	115937	1449
42	FEF/CEI	6	100467	1503
43	BC/CDMC/POSTO CORI	6	40144	818
44	IEL	3	32273	754
45	IA	2	18481	628
46	CDC	1	44120	992
47	DAC/SAPPE/CLE	13	27650	683
48	SIARQ/DCE	14	113254	1616
49	IB	2	159092	1778
50	NIPE	3	30196	907
-	Total	323	4104629	58524

Na solução do diagrama de Voronoi Simples apresentada na figura 5.8, observa-se que, no roteiro traçado, há uma grande quantidade de polígonos com áreas de abrangência pequena na região central em comparação com a maioria dos pontos localizados mais próximos do contorno da área que excedem o limite legal do território da Universidade. Essa maior quantidade de polígonos menores está relacionada com o fato de haver uma menor distância e uma maior concentração entre os pontos de troca localizados na região central do mapa. Por sua vez, muitas das unidades próximas ao limite legal da UNICAMP (pontos 1, 2, 3, 7, 13, 16, 17, 18, 20, 21, 22, 23, 25, 41, 42, 48, 49) encontram-se menos próximas umas das outras e, por essa menor concentração de pontos em seu entorno, formam uma área de abrangência maior e muitas vezes não bem definida.

No entanto, devido ao fato de as encomendas distribuídas entre os pontos localizados nos roteiros de operação possuírem pesos e quantidades com valores diferentes, a variável distância acaba não representando bem o nível de atração desses pontos de troca.

Por esse motivo, na busca da solução adequada, faz-se necessário considerar, além da distância entre os pontos de atendimento na área de atuação, uma variável adicional para o cenário analisado que permita separar a área de operação de acordo também com o tamanho da carga que será distribuída entre os diferentes pontos dos roteiros de operação.

Na tentativa de solução deste problema, faz-se o uso do diagrama de Voronoi Ponderado com peso multiplicativo como forma de determinar a área de abrangência de cada ponto do roteiro em função do poder de atração que este ponto teria.

Na aplicação do diagrama de Voronoi multiplicativo, considera-se, como a variável de atração, o valor médio dos pesos nas trocas em cada ponto do roteiro. Espera-se que a consideração desta variável de atração resulte que, num ponto cuja troca apresente maior peso, ocorra a redução na sua área de cobertura, sugerindo-se assim um maior poder de atração para esse ponto.

Utilizando novamente a ferramenta ET *Surface* (ET SpatialTechniques), foi executado o comando de criação de diagramas de Voronoi multiplicativo para ambos os roteiros de viagem. A metodologia de aplicação do diagrama de Voronoi multiplicativo foi realizada da seguinte maneira:

- Na janela inicial (figura 5.9a), o campo 1 corresponde ao registro dos pontos de troca de cada roteiro de viagem; o campo 2 corresponde ao local de destino do arquivo *raster* a ser salvo e seu respectivo nome; e o campo 3 corresponde ao formato desse arquivo.
- Na janela seguinte (figura 5.9b), o campo 3 corresponde ao campo da tabela onde devem ser inseridos os campos de identificação dos pontos do roteiro; o campo 4 corresponde ao campo da tabela onde devem ser inseridas as informações referentes ao peso estabelecido para cada ponto do mapa; o campo 5 corresponde ao valor estabelecido para os tamanhos de célula de *raster*; e o último campo corresponde ao campo onde é estabelecido o valor mínimo ou máximo de distância permitida entre os pontos do mapa.

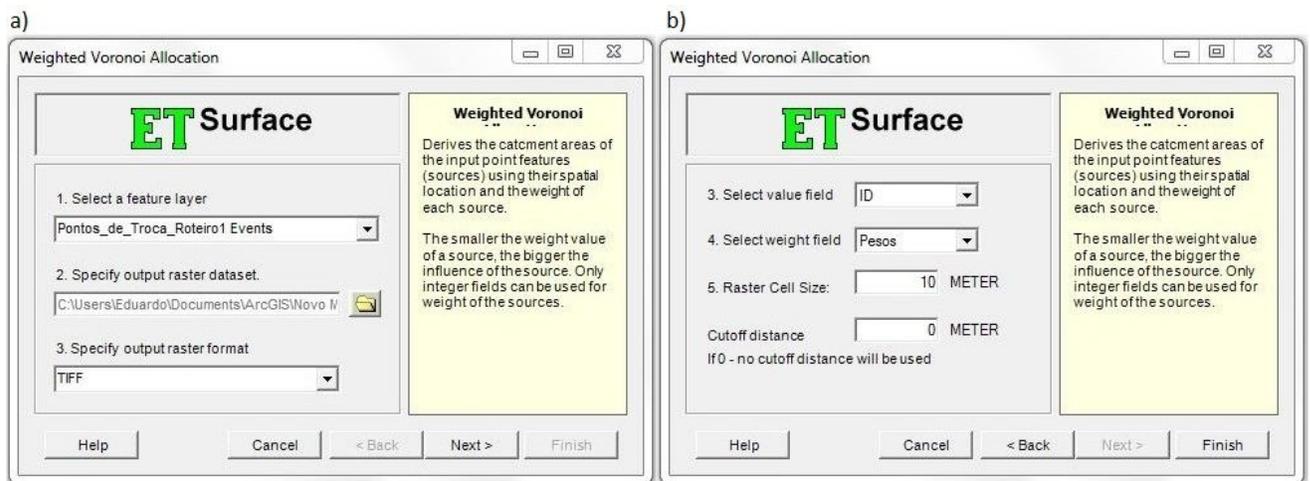


Figura 5.9 – Processo de criação do Diagrama de Voronoi com pesos multiplicativos

Concluído esse procedimento, os seguintes resultados são apresentados em um mapa com escala 1:10.047, pela figura 5.10, (na qual o *layer* em formato de *raster* foi convertido em formato de polígono a partir da aplicação do ArcGIS) e os respectivos dados de saída desse diagrama são apresentados pela tabela 5.13.



Figura 5.10 – Diagrama de Voronoi Com Pesos Multiplicativos aplicado no cenário de estudo

Tabela 5.13 – Dados de saída do Diagrama de Voronoi com Pesos Multiplicativos (Continua)

ID	Nome	Peso	Area	Perimetro
1	PRP/CADI/PRDU/PG/CORI/SG/EXTECAMP/PRE/CEDES/INOVA/GR/CGU	49	222	68
2	FCM	18	6963	342
3	CECOM	4	80346	1125
4	HEMOCENTRO	4	15866	534
5	GASTROCENTO/PRODECAD/CRECHE/ÁREA SAÚDE	5	20686	563
6	CECI	3	32538	715
7	CAISM/CEB	3	77773	1090
8	CT/CPO	4	3380	243
9	TRANSPORTE	2	8644	347
10	ÁREA DE PRODUÇÃO	4	677	121
11	GRÁFICA	1	143832	1998
12	CEMEQ	1	158476	2652
13	CEMIB	2	71680	1146
14	LABEURB	4	6762	364
15	EDITORA	4	6225	325
16	FEAGRI	2	161345	2150
17	CEBMEG	2	28228	1413
18	EMBRAPA/CEPAGRI	6	29252	673
19	CCUEC/CENAPAD/CGI/GGTE	9	19115	530
20	NEPO/NEPP	5	40481	745
21	ADUNICAMP/IC	7	18656	519
22	FEC/RTV	7	20644	540
23	SERGIO PORTO	3	118030	1394
24	HC	16	1749	184
25	DGRH/SST/DAB/LABJOR/NIED/PRPG	34	222	68
26	NEPAM	1	760930	4280
27	CCS	2	4342	258
28	IG	3	10950	537
29	FEEC	2	60291	949
30	FEQ	2	51681	1127
31	FEM	3	63523	931
32	FEA/NEPA/IQ	11	7954	352
33	CMU/SAE/DLIE BÁSICO/STU/CIPA	13	6474	307
34	IF/FE	8	8767	358
35	IE	2	229459	3716
36	IMECC	3	41210	1001
37	IFCH/CEPETRO	8	1585	187
38	CEL	9	1979	192
39	COMVEST	2	32819	933

Tabela 5.13 – Dados de saída do Diagrama de Voronoi com Pesos Multiplicativos (Conclusão)

ID	Nome	Peso	Área	Perímetro
40	FUNCAMP	3	861	126
41	CASA DO LAGO	2	28927	679
42	FEF/CEI	6	1296	166
43	BC/CDMC/POSTO CORI	6	8078	349
44	IEL	3	17016	494
45	IA	2	12109	463
46	CDC	1	159063	3072
47	DAC/SAPPE/CLE	13	4962	277
48	SIARQ/DCE	14	6687	319
49	IB	2	183225	1749
50	NIPE	3	14479	503
51	DIAGRAMA DE VORONOI NÃO RELACIONADO COM NENHUM PONTO	-	24300	2736
52	DIAGRAMA DE VORONOI NÃO RELACIONADO COM NENHUM PONTO	-	33726	793
53	DIAGRAMA DE VORONOI NÃO RELACIONADO COM NENHUM PONTO	-	324	72
54	DIAGRAMA DE VORONOI NÃO RELACIONADO COM NENHUM PONTO	-	5055	286
55	DIAGRAMA DE VORONOI NÃO RELACIONADO COM NENHUM PONTO	-	1509	162
56	DIAGRAMA DE VORONOI NÃO RELACIONADO COM NENHUM PONTO	-	36115	923
-	TOTAL DE DIAGRAMA DE VORONOI QUE COBRE TODOS OS PONTOS	-	2790459	43174
-	TOTAL DE DIAGRAMA DE VORONOI QUE NÃO COBRE NENHUM PONTO	-	101029	4972
-	DIAGRAMA DE VORONOI TOTAL	-	2891488	48146

A partir da aplicação do diagrama de Voronoi Multiplicativo para o cenário de estudo, foi possível observar que as áreas agora produzidas possuem tamanhos diferentes do que aquelas produzidas pela versão anterior. As áreas agora produzidas deixaram de ser definidas por retas e passaram a ser limitadas por arcos de circunferências por causa do emprego da nova variável de atração, além da variável distância (que é a única variável considerada no processo de cálculo do diagrama de Voronoi Simples).

A comparação entre as soluções ora obtidas pelos dois processos de Voronoi demonstra que as áreas obtidas pela segunda metodologia são menores do que aquelas obtidas na primeira solução.

A aplicação do diagrama de Voronoi Ponderado apresentou diversas mudanças para o cenário de roteiro em relação à aplicação do diagrama de Voronoi Simples.

Para o cenário de roteiro, a sobreposição do Diagrama de Voronoi Multiplicativo sobre o Simples fez com que as áreas definidas pelos pontos pertencentes ao roteiro sofressem mudanças como:

- pequenas reduções na área de abrangência dos pontos do roteiro (reduções acima de 10% e abaixo de 40% do tamanho da área de abrangência);
- grandes reduções na área de abrangência dos pontos do roteiro (reduções acima de 40% do tamanho da área de abrangência);
- pequenos aumentos na área de abrangência dos pontos do roteiro (aumentos acima de 10% e abaixo de 40% do tamanho da área de abrangência);
- grandes aumentos na área de abrangência dos pontos do roteiro (aumentos acima de 40% do tamanho da área de abrangência);
- áreas de abrangência que não sofreram mudanças significativas em relação aos seus respectivos tamanhos (aumentos ou reduções de até 10% do tamanho da área de abrangência);
- pontos que ficaram sem áreas de abrangência bem definidas.

As diferenças sofridas a partir da aplicação do diagrama do Voronoi Multiplicativo em relação ao diagrama de Voronoi Simples são apresentadas em um mapa com escala 1:10.047, apresentado na figura 5.11 e pela tabela 5.14.

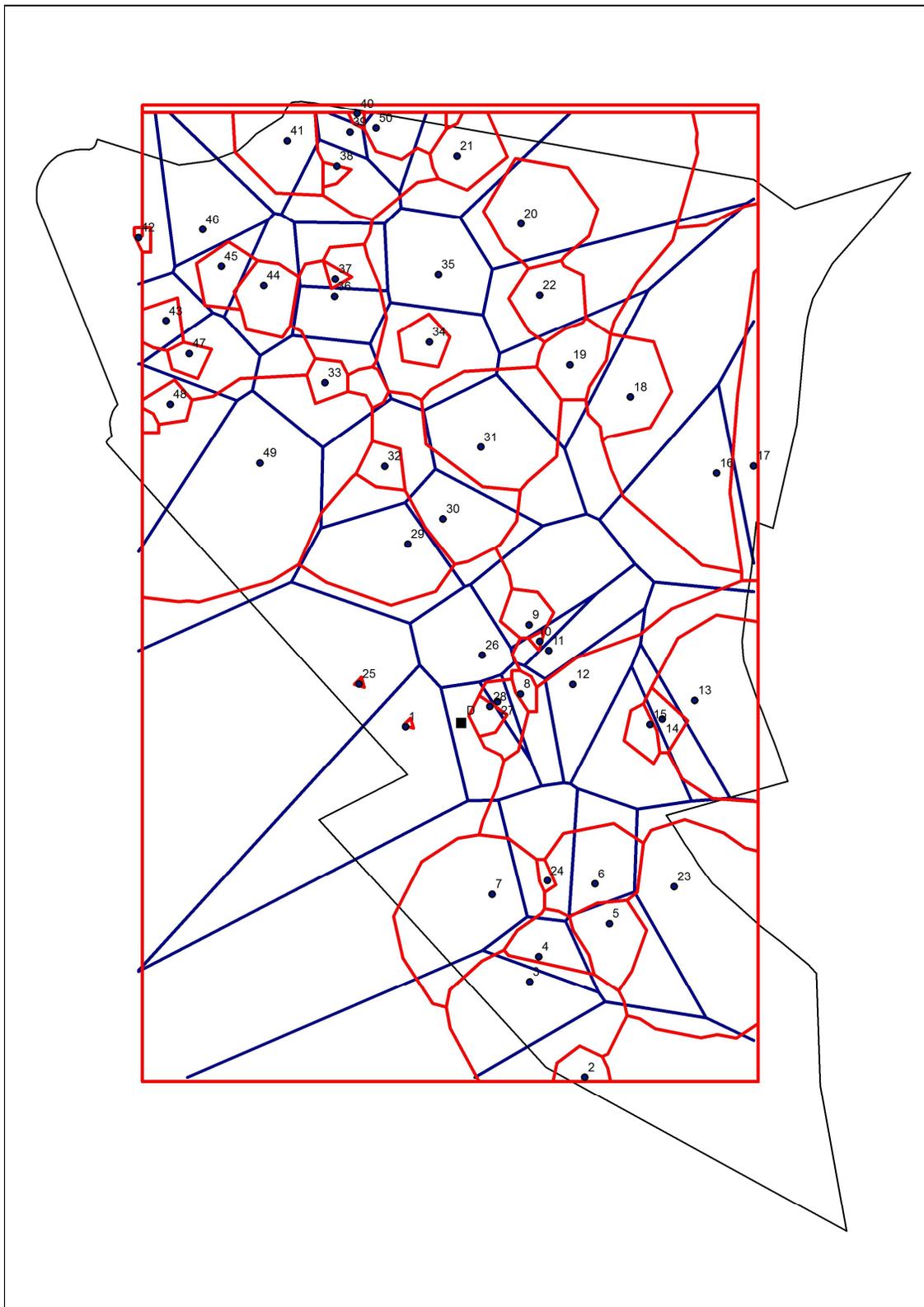


Figura 5.11 – Análise comparativa do diagrama de Voronoi Multiplicativo em relação ao diagrama de Voronoi Simples

Tabela 5.14 – Análise comparativa do diagrama de Voronoi Multiplicativo em relação ao diagrama de Voronoi Simples (Continua)

ID	Area V.M	Area V.S	Relação V.M/V.S	Observações
1	222	132420	99,83%	Grande redução da área de abrangência
2	6963	269943	97,42%	Grande redução da área de abrangência
3	80346	260898	69,20%	Grande redução da área de abrangência
4	15866	20030	20,79%	Pequena redução da área de abrangência
5	20686	44865	53,89%	Grande redução da área de abrangência
6	32538	31566	-3,08%	Pequeno aumento da área de abrangência
7	77773	291027	73,28%	Grande redução da área de abrangência
8	3380	19210	82,40%	Grande redução da área de abrangência
9	8644	55268	84,36%	Grande redução da área de abrangência
10	677	5727	88,18%	Grande redução da área de abrangência
11	143832	23932	-501,00%	Grande aumento da área de abrangência
12	158476	36440	-334,90%	Grande aumento da área de abrangência
13	71680	141996	49,52%	Grande redução da área de abrangência
14	6762	21031	67,85%	Grande redução da área de abrangência
15	6225	41921	85,15%	Grande redução da área de abrangência
16	161345	87689	-84,00%	Grande aumento da área de abrangência
17	28228	118275	76,13%	Grande redução da área de abrangência
18	29252	155218	81,15%	Grande redução da área de abrangência
19	19115	47900	60,09%	Grande redução da área de abrangência
20	40481	254946	84,12%	Grande redução da área de abrangência
21	18656	133287	86,00%	Grande redução da área de abrangência
22	20644	71699	71,21%	Grande redução da área de abrangência
23	118030	177724	33,59%	Pequena redução da área de abrangência
24	1749	38238	95,43%	Grande redução da área de abrangência
25	222	375343	99,94%	Grande redução da área de abrangência
26	760930	33179	-2193,41%	Sem área de abrangência bem definida
27	4342	5065	14,27%	Pequena redução da área de abrangência
28	10950	33612	67,42%	Grande redução da área de abrangência
29	60291	59281	-1,70%	Pequeno aumento da área de abrangência
30	51681	37745	-36,92%	Grande aumento da área de abrangência
31	63523	67960	6,53%	Pequena redução da área de abrangência
32	7954	47696	83,32%	Grande redução da área de abrangência
33	6474	48897	86,76%	Grande redução da área de abrangência
34	8767	48012	81,74%	Grande redução da área de abrangência
35	229459	43261	-430,41%	Grande aumento da área de abrangência
36	41210	21779	-89,22%	Grande aumento da área de abrangência
37	1585	28020	94,34%	Grande redução da área de abrangência

Tabela 5.14 – Análise comparativa do diagrama de Voronoi Multiplicativo em relação ao diagrama de Voronoi Simples (Conclusão)

ID	Area V.M	Area V.S	Relação V.M/V.S	Observações
38	1979	32017	93,82%	Grande redução da área de abrangência
39	32819	6969	-370,93%	Grande aumento da área de abrangência
40	861	52929	98,37%	Grande redução da área de abrangência
41	28927	115937	75,05%	Grande redução da área de abrangência
42	1296	100467	98,71%	Grande redução da área de abrangência
43	8078	40144	79,88%	Grande redução da área de abrangência
44	17016	32273	47,27%	Grande redução da área de abrangência
45	12109	18481	34,48%	Pequena redução da área de abrangência
46	159063	44120	-260,52%	Grande aumento da área de abrangência
47	4962	27650	82,05%	Grande redução da área de abrangência
48	6687	113254	94,10%	Grande redução da área de abrangência
49	183225	159092	-15,17%	Pequeno aumento da área de abrangência
50	14479	30196	52,05%	Grande redução da área de abrangência
T	2790459	4104629	32,02%	Houve redução do tamanho da área total

A partir da figura 5.11, pode-se perceber que algumas áreas de abrangência de alguns pontos de troca acabaram ficando contidas dentro de áreas pertencentes a outros pontos do roteiro.

Para esse tipo de caso, pode-se perceber, por exemplo, que as áreas relacionadas com os pontos 20, 22 e 24 ficaram contidas dentro da área de abrangência do ponto 35. E que o mesmo tipo de situação ocorreu de forma bastante visível para os pontos 36, 37, 42, 43, 44, 45, 47 e 48 em relação ao ponto 46.

Além disso, outra situação distinta ocorreu em relação ao ponto 26, que mostrou não possuir uma área de abrangência bem definida, pois, além de encobrir e reduzir fortemente a área de abrangência dos pontos 1 e 25, ultrapassou os limites legais da área de estudo.

Pode-se perceber também a criação de áreas de abrangência adicionais que não se encontram relacionadas com nenhum ponto do roteiro. Dentre elas, destaca-se o retângulo formado acima do ponto 40.

Por outro lado, a partir dos dados apresentados pela tabela 5.14, percebe-se que ocorreu redução ou aumento nas áreas de abrangência, e a área de abrangência da maior parte dos pontos de troca teve um enorme aumento ou uma enorme redução.

Essas alterações ocorreram porque a variável peso passou a ter relevância no processo de definição de área de abrangência pelo método de diagrama de Voronoi Multiplicativo. Portanto, numa análise preliminar, é possível considerar que o diagrama de Voronoi Multiplicativo permite uma melhor análise de definição de área do que a aplicação do diagrama de Voronoi Simples para a situação em estudo.

Esperava-se que a aplicação dessa metodologia fornecesse soluções de áreas de abrangência que englobassem vários pontos no seu interior, de modo a se dispor de um roteiro de atendimento exclusivo para a área de abrangência majorada. Entretanto, a aplicação de diagramas de Voronoi não forneceu solução adequada para o problema em estudo.

Desse modo, numa tentativa de aperfeiçoamento da solução, realizou-se uma nova aplicação do modelo de diagrama de Voronoi Multiplicativo em combinação com o modelo “Gera_Distritos” (método de *Districting*).

Foram consideradas as soluções anteriores do programa “Gera_Distritos”, uma com quatro centroides e outra com seis centroides. Acrescentou-se ainda outra solução que considerou uma situação com 15 centroides.

Com base nas soluções resultantes da aplicação do programa “Gera_Distritos”, foi possível elaborar mapas ilustrativos dos distritos em formato de roteiros, utilizando-se a ferramenta ArcGIS. Com o uso dessa ferramenta, foi possível gerar soluções gráficas que permitiram a visualização das soluções obtidas na nova aplicação do diagrama de Voronoi multiplicativo combinadas com as soluções apresentadas pelo programa “Gera_Distritos”.

Nessa nova aplicação combinada, o programa “Gera_Distritos” conseguiu definir o centroide de cada novo distrito que inclui vários pontos de troca de malotes.

As soluções gráficas encontradas pela combinação dos diagramas de Voronoi Multiplicativos com o programa “Gera_Distritos” são apresentadas em mapas com escala 1:10.047, ilustrados pelas figuras 5.12, 5.13, 5.14.

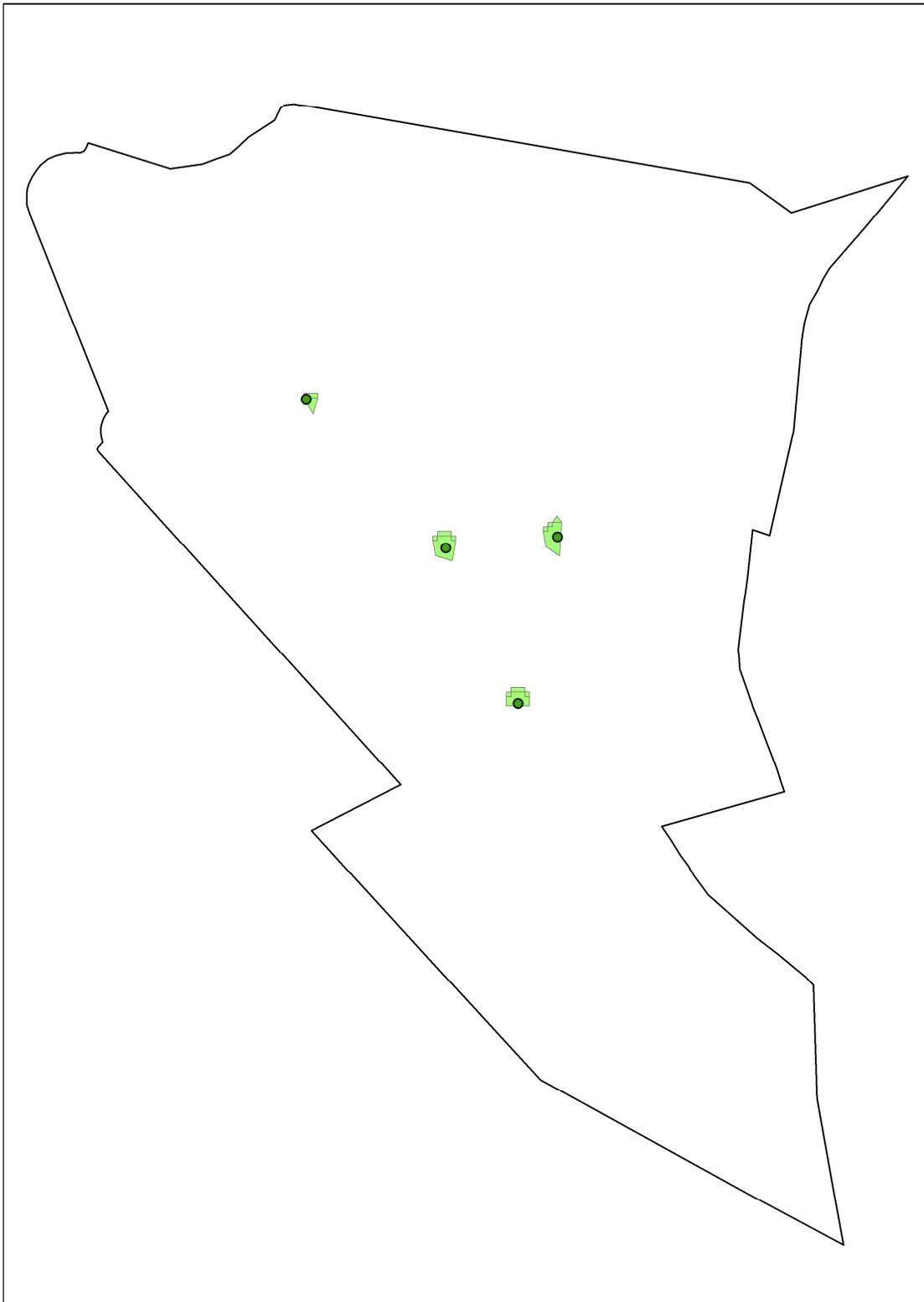


Figura 5.12 – Aplicação combinada do programa “Gera_Distritos” e o Voronoi Multiplicativo com 4 roteiros

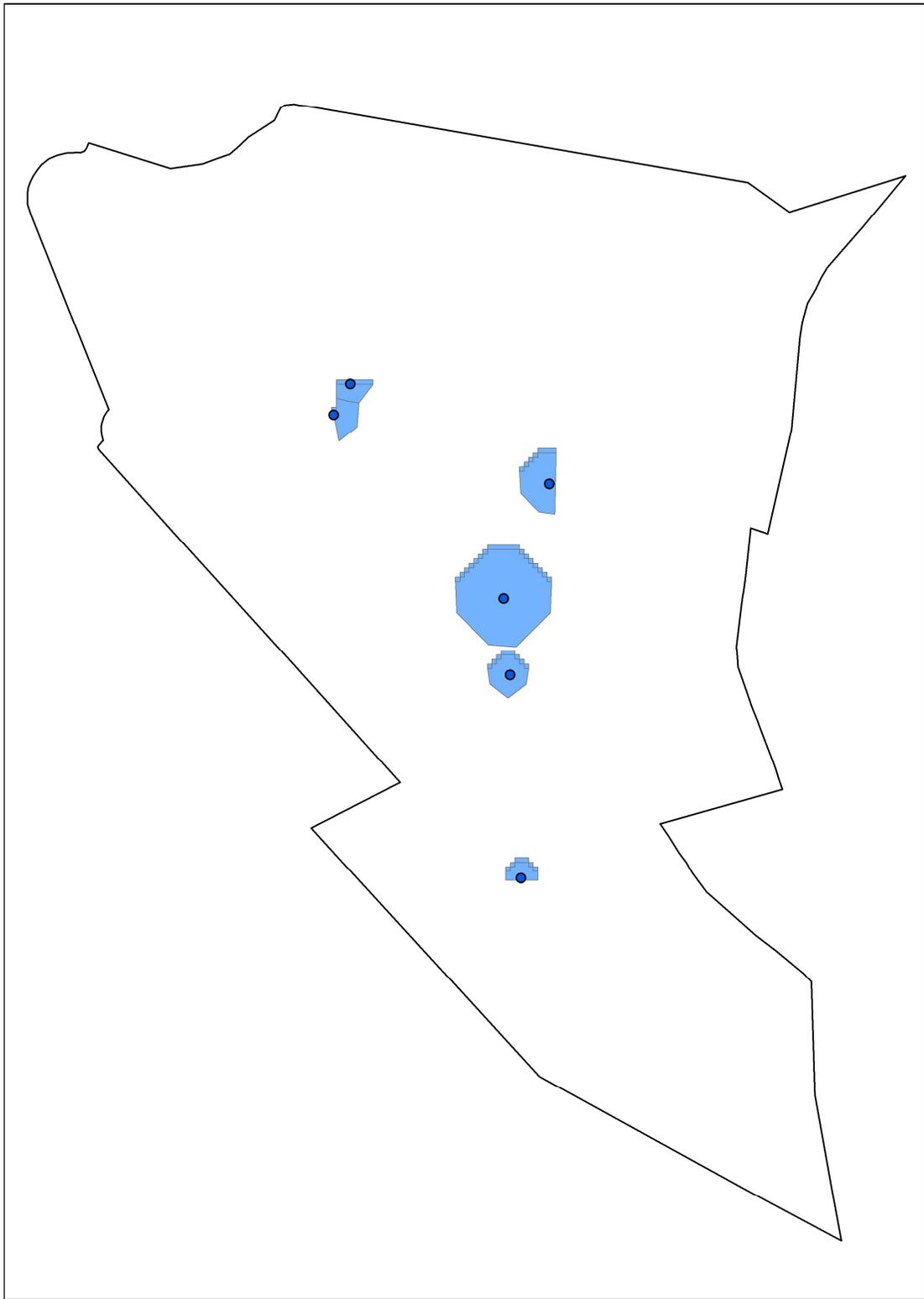


Figura 5.13 - Aplicação combinada do programa “Gera_Distritos” e o Voronoi Multiplicativo com 6 roteiros

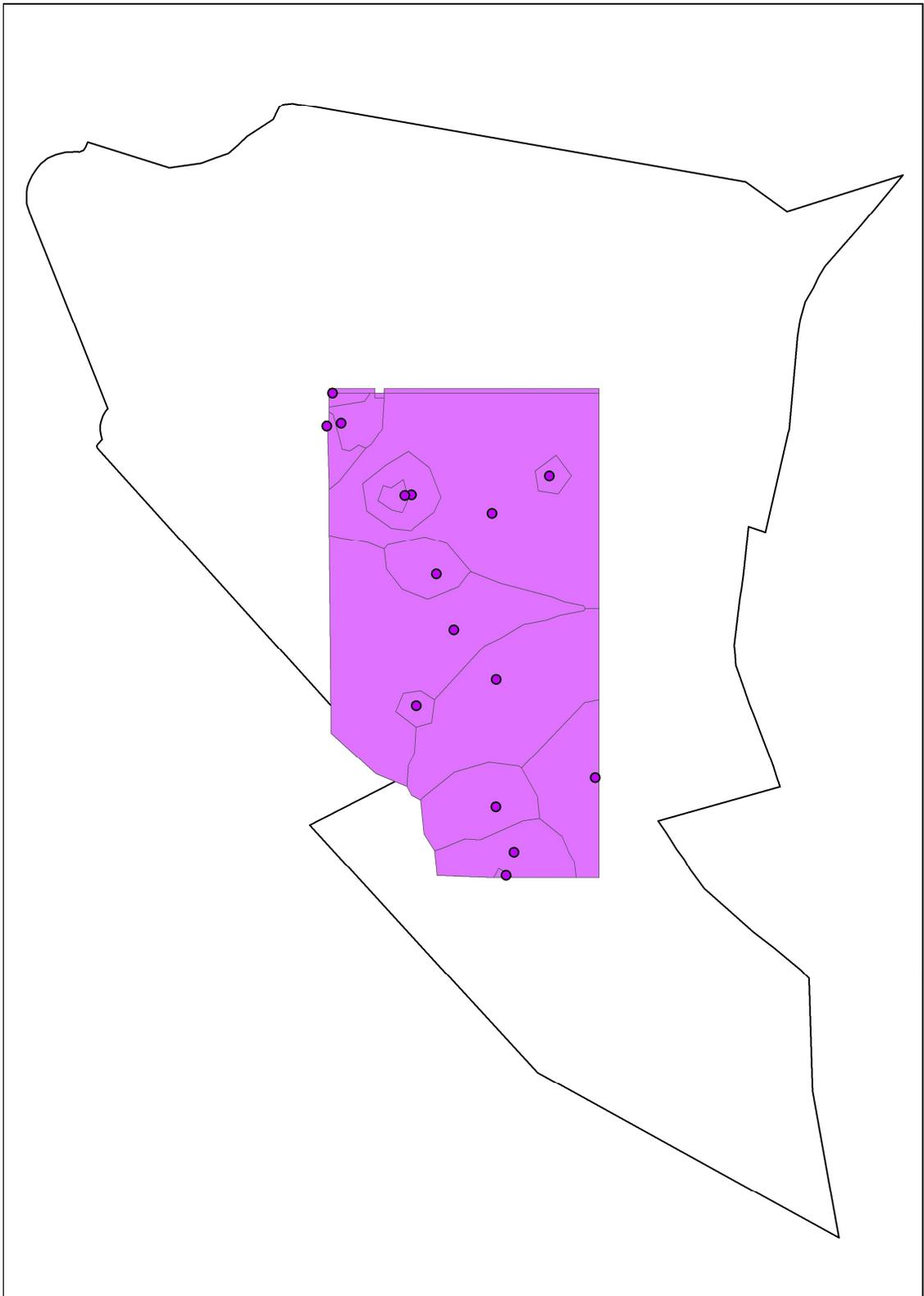


Figura 5.14 - Aplicação combinada do programa “Gera_Distritos” e o Voronoi Multiplicativo com 15 roteiros

A aplicação combinada do programa “Gera_Distritos” com o Voronoi Multiplicativo buscava utilizar os pontos de gravidade definidos pelo programa “Gera_Distritos” para definir áreas de abrangência que pudessem englobar diferentes grupos de pontos dentro da área de análise. Com isso, buscou-se definir novos roteiros com base nesses pontos englobados pelas diferentes áreas de abrangência que pudessem servir como nova medida de comparação em relação à aplicação dos programas “Gera_Distritos” e “Clarke e Wright”.

No entanto, foi possível observar que:

- os diagramas-resultado obtidos da combinação empregada não cobriram toda a área em estudo;
- o emprego da variável de atração considerada resultou em alto valor dos pesos e, conseqüentemente, em áreas pequenas. Esta conclusão fica evidenciada quando se observa a figura 5.12 com 4 centroides e minúsculas áreas em relação à figura 5.13 com 6 centroides e áreas um pouco maiores, e a solução da figura 5.14 para 15 centroides (maior número possível para o programa “Gera_Distritos”) com áreas contíguas.

Portanto, as soluções gráficas apresentadas nas figuras 5.12, 5.13, e 5.14 permitem afirmar que a combinação do programa “Gera_Distritos” e o Voronoi Multiplicativo não se mostraram adequadas à plena resolução do problema analisado.

6. ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS OBTIDOS

Este capítulo apresenta a comparação do modelo “Gera_Distritos” com o modelo “Clark Wright” quando aplicados ao estudo de viabilização da bicicleta e motocicleta em operações de distribuição de pequenas encomendas.

A aplicação desses modelos resultou na elaboração de diferentes soluções com diferentes roteiros na região de análise, e a comparação desenvolvida tem como objetivo identificar eventuais lacunas entre esses modelos.

O procedimento de análise comparativa foi desenvolvido conforme os seguintes itens:

- a. comparação das diferentes soluções apresentadas pelas múltiplas aplicações das duas heurísticas;
- b. análise comparativa entre as soluções selecionadas;
- c. análise comparativa das soluções selecionadas com a situação existente.

6.1. Comparação das Diferentes Soluções Apresentadas pelas Múltiplas Aplicações das Duas Heurísticas

Nesta etapa, as soluções obtidas em cada programa foram submetidas a um método de análise isolada de conteúdo, com o objetivo de selecionar as soluções consideradas como as mais compatíveis para cada caso e submetê-las a uma análise comparativa. Portanto, inicialmente buscou-se determinar cada uma das soluções oferecidas por cada um dos programas em específico e comparar uma com a outra.

O processo de comparação das soluções foi realizado de modo a permitir selecionar inicialmente as duas soluções de roteiros mais adequadas.

Com base nessa premissa, o procedimento de seleção das duas soluções foi realizado de acordo com os seguintes critérios, em ordem de relevância:

- 1º. menor variação entre as somatórias dos maiores pesos transportados;
- 2º. menor variação entre a quantidade de pontos servidos por roteiro;

3º. menor variação de distância total em cada percurso;

4º. menor variação de tempo total de roteiro.

Esses critérios foram considerados na análise e na comparação das soluções apresentadas pela tabela 6.1, com dados de saída do programa “Gera_Distritos” e pela tabela 6.2 com as medidas de dispersão das soluções apresentadas pelo programa “Gera_Distritos”.

Nas tabelas, foram acrescentados os valores totais das seguintes variáveis: número de pontos, distância de percurso, somatória dos maiores pesos transportados e o tempo total de roteiro.

Tabela 6.1 – Dados de saída do programa “Gera_Distritos”

Nº de roteiros	Rota	Número de pontos	Distância (metros)	Somatória dos maiores pesos transportados (Kg)	Tempo total de roteiro (min)	
					Bike	Moto
4	1	12	6674	101,8	20	16
	2	12	7071	62,6	22,5	17,2
	3	12	7180	91,2	21,6	16,8
	4	14	6416	88,3	19,7	16,9
	Σ	50	27341	343,9	83,8	66,9
5	1	15	6586	108,2	25,3	20,2
	2	3	5835	31	7,9	5,5
	3	10	6855	66,7	19,5	14,8
	4	10	4893	65,8	16,8	13,4
	5	12	6224	72,8	17,2	14,6
	Σ	50	30393	344,5	86,7	68,5
6	1	8	3617	86,6	13,3	10,6
	2	11	6204	46,3	16,9	14
	3	3	4722	25,3	6,9	5
	4	9	5305	65,2	17	13
	5	10	6291	64,4	16,4	13,2
	6	9	5630	57,6	13,8	11,4
	Σ	50	31769	345,4	84,3	67,2

A busca para determinar as soluções com menor variação para o programa “Gera_Distritos” foi realizada com a comparação das dispersões obtidas a partir das fórmulas estatísticas apresentadas nas tabelas 6.2.

Tabela 6.2 – Medidas de dispersão das soluções apresentadas pelo programa “Gera_Distritos”

Nº de roteiros	Medidas de dispersão	Número de pontos	Distância (metros)	Somatória dos maiores pesos transportados (Kg)	Tempo total de roteiro (min)	
					Bike	Moto
4	Média	12,50	6835,25	85,98	20,95	16,73
	Variância amostral	1,00	125400,92	276,51	1,76	0,26
	Desvio Padrão amostral	1,00	354,12	16,63	1,33	0,51
	Coefficiente de variação	8,00	5,18	19,34	6,34	3,06
	Amplitude Total	2,00	764,00	39,20	2,80	1,20
5	Média	10,00	6078,60	68,90	17,34	13,70
	Variância amostral	19,50	586595,30	752,64	39,36	27,90
	Desvio Padrão amostral	4,42	765,90	27,43	6,27	5,28
	Coefficiente de variação	44,16	12,60	39,82	36,18	38,56
	Amplitude Total	12,00	1693,00	77,20	17,40	14,70
6	Média	8,33	5294,83	57,57	14,05	11,20
	Variância amostral	7,87	1014926,97	423,19	14,82	10,78
	Desvio Padrão amostral	2,80	1007,44	20,57	3,85	3,28
	Coefficiente de variação	33,66	19,03	35,74	27,40	29,32
	Amplitude Total	8,00	2674,00	61,30	10,10	9,00

Em uma primeira análise, foi possível perceber que, na aplicação do programa “Gera_Distritos”, a operação realizada com 4 roteiros possui em comparação com as operações realizadas com 5 e com 6 roteiros, uma divisão mais equilibrada das seguintes medidas: distância total de roteiro, somatória dos maiores pesos transportados e, principalmente, número de pontos atendidos por roteiro. Na operação realizada com 5 roteiros, ocorre uma variação maior nos

valores de número de pontos atendidos, peso e distância em relação à operação com 4 roteiros. Mas, quando a operação com 5 roteiros é comparada com a de 6 roteiros, a variação é menor.

Na aplicação do programa “Gera_Distritos”, também foi possível perceber que a variável de velocidade média do veículo não influi na formação de roteiro. Nem os pontos a serem formados em cada roteiro, nem o processo de sequenciamento desses pontos em cada roteiro mudam em função de a velocidade do veículo ser mais alta ou mais baixa. A única coisa que muda nesse caso é o tempo total do roteiro, que diminui em relação ao aumento da velocidade do veículo. O uso da motocicleta (40 km/h) em comparação com a bicicleta (20 km/h) reduz em média 20% do tempo total em roteiro, não importando a quantidade de roteiros existentes na área de operação.

Com base nessas tabelas, foi possível perceber que, no programa “Gera_Distritos”, o valor de média das variáveis diminui à medida que o número de roteiros aumenta. A bicicleta possui uma média maior de tempo total de roteiro do que a motocicleta, sendo que esse aumento do valor de tempo médio é inversamente proporcional à medida que a velocidade do veículo aumenta.

Em relação à variável de somatória de pesos, percebe-se que a operação realizada com 4 roteiros possui menor valor de desvio padrão, coeficiente de variação e amplitude total do que as demais operações realizadas pelo programa “Gera_Distritos”.

Quanto à quantidade de pontos servidos, nota-se que a operação realizada com 4 roteiros apresenta valor de variância e de desvio padrão igual a 1; além disso, o coeficiente de variação comprova que os dados dessa medida são bastante homogêneos.

No que diz respeito à distância total de roteiro, a operação realizada com 6 roteiros, quando comparada à operação realizada com 4 roteiros, mostra que o valor da variância aumentou em dez vezes, o valor do desvio padrão aumentou em três vezes, e o valor de coeficiente de variação aumentou em cinco vezes.

A tabela 6.3 apresenta os dados de saída do programa “Clarke Wright” para bicicletas, enquanto a tabela 6.4 contém os dados de saída do programa “Clarke Wright” para motocicletas. A tabela 6.5 apresenta as medidas de dispersão das soluções obtidas pelo programa “Clarke

Wright” para o uso de bicicletas e, na tabela 6.6, constam as medidas de dispersão das soluções apresentadas pelo programa “Clarke Wright” para o uso de motocicletas. As soluções consideradas nesta análise foram aquelas que mais se assemelharam às soluções previamente obtidas pelo programa “Gera_Distritos”.

Tabela 6.3 – Dados de saída do programa “Clarke Wright” para bicicletas

Veículo	Rotas	Número da rota	Distância da rota (m)		Tempo efetivo da operação (min)		Número de pontos	
			Min	Max	Min	Max	Min	Max
Bike	3	1	7589,37	9352,21	40	52	17	24
		2	7876,67	4004	39	20	15	8
		3	6861,98	5190	39	34	18	18
		Total	22328	18546,2	118	106	50	50
	4	1	6468,64	7158,94	32	37	13	16
		2	6785,97	6785,32	32	35	12	15
		3	5912,89	7900,64	34	41	16	17
		4	3730,7	328,59	20	3	9	2
		Total	22898,2	22173,5	118	116	50	50
	5	1	4874,12	6445,33	23	31	8	12
		2	5565,45	6177,43	26	29	9	10
		3	5787,96	4004	26	20	9	8
		4	4787,15	4816,51	26	23	12	9
		5	4735,49	2500,7	26	19	12	11
		Total	25750,2	23944	127	122	50	50
	6	1	5415,34	5415,34	23	23	7	7
		2	4962,58	5085,77	23	25	8	10
		3	5378,92	5548,97	23	25	7	8
		4	4004	2873,61	20	11	8	2
		5	4816,51	4773,49	23	25	9	11
		6	2500,7	3702,04	19	23	11	12
Total		27078,1	27399,2	131	132	50	50	

Tabela 6.4 – Dados de saída do programa “Clarke Wright” para motocicletas

Veículo	Rotas	Número da rota	Distância da rota (m)		Tempo efetivo da operação (min)		Número de pontos	
			Min	Max	Min	Max	Min	Max
Moto	3	1	7158,94	9352,21	27	38	16	24
		2	7463,72	4004	27	14	16	8
		3	6890,58	5189,96	27	26	17	18
		Total	21513,2	18546,2	81	78	49 *	50
	4	1	6445,33	6609,52	22	26	12	16
		2	6520,47	4004	22	14	12	8
		3	5115,2	6879,84	22	26	14	16
		4	5133,58	1932,59	20	13	12	10
		Total	23214,6	19426	86	79	50	50
	5	1	6332,27	6445,3	19	21	10	11
		2	5902,84	6192,23	20	20	11	11
		3	4004	4004	14	14	8	8
		4	5711,85	4816,51	19	16	10	9
		5	2500,71	2500,71	15	15	11	11
		Total	24451,7	23958,8	87	86	50	50
	6	1	5415,34	4874,12	15	15	7	8
		2	4962,78	5565,45	15	17	8	9
		3	5378,92	5787,96	15	18	7	9
		4	4497,08	4723,93	16	18	9	11
		5	4566,5	4552,87	15	18	8	11
		6	2500,71	684,52	15	3	11	2
		Total	27321,3	26188,9	91	89	50	50

[(*) - este número deveria ser 50, o resultado desconsiderou um ponto]

A aplicação do modelo “Clarke Wright” para o caso da motocicleta constante na tabela 6.4 permitiu observar que, na operação realizada com 3 roteiros, quando se restringe a operação a um limite mínimo de tempo de roteiro, o programa exclui o ponto 7 do processo de formação de roteiros e passa a atender os outros 49 pontos do roteiro na operação. Adicionalmente, é possível observar, nesse caso, que a operação com 4 roteiros é realizada de maneira bastante equilibrada e que começa a apresentar uma tendência de desequilíbrio quando a operação passa a ser realizada com 5 e 6 roteiros.

A busca para determinar as soluções com menor variação para o programa “Clarke Wright” foi realizada com a comparação das dispersões obtidas a partir das fórmulas estatísticas. Estas determinações são apresentadas nas tabelas 6.5 e 6.6.

Tabela 6.5 – Medidas de dispersão das soluções apresentadas pelo programa “Clarke Wright” para o uso de bicicletas

Nº de roteiros	Medidas de dispersão	Distância da rota (m)		Tempo efetivo da operação (min)		Número de pontos	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max
3	Média	7442,67	6182,07	39,33	35,33	16,67	16,67
	Variância amostral	273538,88	7888989,71	0,33	257,33	2,33	65,33
	Desvio Padrão amostral	523,01	2808,73	0,58	16,04	1,53	8,08
	Coeficiente de variação	7,03	45,43	1,47	45,40	9,17	48,50
	Amplitude Total	1014,69	1186,00	1,00	32,00	32,00	32,00
4	Média	5724,55	5543,37	29,50	29,00	12,50	12,50
	Variância amostral	1897064,04	12301052,84	41,00	306,67	8,33	49,67
	Desvio Padrão amostral	1377,34	3507,29	6,40	17,51	2,89	7,05
	Coeficiente de variação	24,06	63,27	21,71	60,39	23,09	56,38
	Amplitude Total	3055,27	7572,05	14,00	38,00	38,00	38,00
5	Média	5150,03	4788,79	25,40	24,40	10,00	10,00
	Variância amostral	239795,02	2631116,35	1,80	28,80	3,50	2,50
	Desvio Padrão amostral	489,69	1622,07	1,34	5,37	1,87	1,58
	Coeficiente de variação	9,51	33,87	5,28	21,99	18,71	15,81
	Amplitude Total	1052,47	3944,63	3,00	10,00	10,00	10,00
6	Média	4513,01	4566,54	21,83	22,00	8,33	8,33
	Variância amostral	1233341,54	1122286,10	3,37	30,00	2,27	13,07
	Desvio Padrão amostral	1110,56	1059,38	1,83	5,48	1,51	3,61
	Coeficiente de variação	24,61	23,20	8,40	24,90	18,07	43,38
	Amplitude Total	2914,64	2675,36	4,00	14,00	14,00	14,00

Tabela 6.6 – Medidas de dispersão das soluções apresentadas pelo programa “Clarke Wright” para o uso de motocicletas

Nº de roteiros	Medidas de dispersão	Distância da rota (m)		Tempo efetivo da operação (min)		Número de pontos	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max
3	Média	7171,08	6182,06	27,00	26,00	16,33	16,67
	Variância amostral	82232,90	7889029,40	0,00	144,00	0,33	65,33
	Desvio Padrão amostral	286,76	2808,74	0,00	12,00	0,58	8,08
	Coefficiente de variação	4,00	45,43	0,00	46,15	3,53	48,50
	Amplitude Total	573,14	5348,21	0,00	24,00	24,00	24,00
4	Média	5803,65	4856,49	21,50	19,75	12,50	12,50
	Variância amostral	616180,45	5480996,60	1,00	52,25	1,00	17,00
	Desvio Padrão amostral	784,97	2341,15	1,00	7,23	1,00	4,12
	Coefficiente de variação	13,53	48,21	4,65	36,60	8,00	32,98
	Amplitude Total	1405,27	4947,25	2,00	13,00	13,00	13,00
5	Média	4890,33	4791,75	17,40	17,20	10,00	10,00
	Variância amostral	2568781,80	2641399,81	7,30	9,70	1,50	2,00
	Desvio Padrão amostral	1602,74	1625,24	2,70	3,11	1,22	1,41
	Coefficiente de variação	32,77	33,92	15,53	18,11	12,25	14,14
	Amplitude Total	3831,56	3944,59	5,00	7,00	7,00	7,00
6	Média	4553,56	4364,81	15,17	14,83	8,33	8,33
	Variância amostral	1161779,09	3487031,45	0,17	34,97	2,27	11,07
	Desvio Padrão amostral	1077,86	1867,36	0,41	5,91	1,51	3,33
	Coefficiente de variação	23,67	42,78	2,69	39,86	18,07	39,92
	Amplitude Total	2914,63	5103,44	1,00	15,00	15,00	15,00

No programa “Clarke Wright”, o número de roteiros a serem servidos na área de operação foi definido com base nas limitações de tempo máximo e mínimo de roteiro. Ou seja, cada roteiro estabelecido foi determinado em função da limitação dos tempos mínimo e máximo para efetuar a operação pretendida.

Desse modo, de forma geral, é possível perceber inicialmente que uma limitação maior de tempo de roteiro resulta na maior diferença entre as rotas servidas em cada operação. Isso ocorre porque um maior intervalo de tempo faz com que o veículo tenha mais tempo para atender a um maior número de pontos possível.

Nesse caso, quanto mais limitado for o tempo de roteiro para uma mesma quantidade de roteiros a serem servidos, mais equilibrados serão os intervalos das medidas dos diferentes roteiros.

No modelo “Clarke Wright”, para o caso da bicicleta, foi possível observar, a partir do conteúdo da tabela 6.5, que a operação realizada com 3 roteiros apresenta maior equilíbrio de distância e de tempo total de roteiro quando sua restrição de limitação de tempo é mínima. O mesmo ocorre em relação à operação realizada com 4 roteiros. Na operação com 4 roteiros, há um aumento na variação de distância e tempo totais (tanto para as limitações mínimas e máximas) em comparação com a operação realizada com 3 roteiros. No entanto, nota-se que essa variação diminui e se estabiliza quando se compara a operação realizada com 4 roteiros às operações realizadas com 5 e 6 roteiros.

No caso do programa “Clarke Wright”, de maneira geral, foi possível perceber que, para todos os casos de operações, tanto com o uso de bicicleta quanto com o uso de motocicletas, um aumento no valor de limitação do tempo de roteiro gera um aumento no valor de todas as medidas de dispersão (média, variância, desvio padrão, coeficiente de variação e amplitude total), como é observado nas tabelas 6.5 e 6.6.

O aumento na limitação de tempo gera um aumento proporcional de desigualdade das rotas servidas nos diferentes casos de operação. O aumento na limitação de tempo faz com que algumas rotas tenham mais facilidade para atender um maior número de pontos do que as demais rotas da operação considerada. Porém, essa desigualdade vai diminuindo à medida que a restrição de tempo é aumentada e o número de roteiros também. Isso significa que, quanto mais restrito for o limite de tempo imposto para realizar a operação pretendida, mais homogêneos serão os diferentes roteiros de uma mesma operação.

Para o caso da bicicleta, foi possível observar que a operação de 3 roteiros com tempo mínimo limitado em 39 minutos apresentou melhores medidas de dispersão em termos de distância de roteiros, de tempo de operação e de número de roteiros, o que indica maior homogeneidade entre os diferentes roteiros de operação. Em segundo lugar, na operação de 5 roteiros com 28 minutos como limite mínimo, observa-se que a segunda maior homogeneidade entre os diferentes roteiros em termos de distância e de tempo de operação.

Para o caso da motocicleta, foi possível observar que, com exceção da operação de 3 roteiros com limite de tempo mínimo de 28 minutos, que não atende a todos os pontos do roteiro, a operação com 4 roteiros e limite de tempo mínimo com 23 minutos pode ser considerada como a operação com roteiros mais homogêneos entre si, já que eles possuem menor valor de coeficiente de variação em termos de distância e número de pontos em roteiro. Em segundo lugar, a operação com 6 roteiros e limite de tempo mínimo de 16 minutos possui menor valor de coeficiente de variação e amplitude total de tempo efetivo de operação, e possui segundo menor valor de coeficiente de variação e amplitude total para a distância.

Em relação às operações de distribuição, percebeu-se que a operação realizada pelo programa “Clark Wright” com 4 roteiros, com limitação de tempo de roteiro mínima (23 minutos) e com o uso de motocicleta (40 km/h) apresenta um cenário semelhante ao da operação realizada com 4 roteiros pelo programa “Gera_Distritos”. Nesse aspecto, a variável do número de pontos apresentou valores de distribuição semelhantes, embora não idênticos, nos dois programas.

Assim sendo, essa operação é escolhida como o cenário mais adequado à comparação pretendida entre as soluções apresentadas pelos programas considerados.

Para complementar a comparação, são apresentados os cálculos da taxa de crescimento do valor das variáveis de saída obtidos quando se acrescenta um roteiro a mais em relação à solução anterior. Esses cálculos são apresentados pelas tabelas 6.7 para o programa “Gera_Distritos” e tabela 6.8 para o programa “Clarke Wright”.

Tabela 6.7 – Variação nos valores nas variáveis de saída em função das soluções encontradas pelo programa “Gera_Distritos”

Crescimento percentual				
Roteiros	Distância	Pesos	Tempo (B)	Tempo (M)
4 → 5	11,16%	0,17%	3,46%	2,39%
5 → 6	4,53%	0,26%	-2,77%	-1,90%
4 → 6	16,20%	0,44%	0,60%	0,45%

Na tabela 6.7, é possível perceber que, no programa “Gera_Distritos”:

- A distância total de viagem tem um aumento de mais de 16% quando a operação muda de 4 para 6 roteiros, enquanto a variável peso do malote apresenta mudanças relacionadas com a distribuição de peso entre os diferentes roteiros, mas, no valor de peso total da operação, não apresenta mudanças significativas (o aumento de roteiros gera um aumento menor do que 1% no peso total a ser distribuído entre os diferentes roteiros).
- Na variável tempo, o tempo de operação total apresenta um crescimento inicial quando o número de roteiros muda de 4 para 5, no entanto o tempo total é reduzido quando a operação muda de 5 para 6 roteiros.

Tabela 6.8 – Variação nos valores nas variáveis de saída em função das soluções encontradas pelo programa “Clarke Wright”

Nº de roteiros	Taxa de Crescimento (Bicicleta)				Taxa de Crescimento (Motocicleta)			
	Distância da rota (m)		Tempo efetivo da operação (min)		Distância da rota (m)		Tempo efetivo da operação (min)	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
3 → 4	2,55%	19,56%	0,00	9,43%	7,91%	4,74%	6,17%	1,28%
4 → 5	12,45%	7,98%	7,63%	5,17%	5,33%	23,33%	1,16%	8,86%
5 → 6	5,16%	14,43%	3,15%	8,20%	11,74%	9,31%	4,60%	3,49%
3 → 5	15,33%	29,10%	7,63%	15,10%	13,66%	29,20%	7,41%	10,25%
3 → 6	21,27%	47,73%	11,02%	24,53%	27,00%	41,21%	12,35%	14,10%
4 → 6	18,25%	23,56%	11,02%	13,80%	17,70%	34,81%	5,81%	12,66%

Na tabela 6.8 referente ao programa “Clarke Wright”, percebe-se que:

- A variável tempo apresenta um comportamento mais confiável do que no programa “Gera_Distritos” porque tende a um crescimento constante à medida que a quantidade de roteiros aumenta. Isso não acontece com o programa “Gera_Distritos”, no qual o tempo total diminui ou mantém um valor semelhante à medida que a quantidade de roteiros aumenta.
- A variável distância possui um comportamento de crescimento similar àquela observada no método “Gera_Distritos”. Algumas mudanças apresentam maior taxa de crescimento

que outras, mas, de modo geral, a variação da distância total se mantém oscilante para todos os casos (alguns aumentam mais e outros aumentam menos).

6.2. Análise Comparativa entre as Soluções Selecionadas

Nesta etapa, apresenta-se uma comparação entre as soluções mais compatíveis oferecidas pelos programas considerados na situação de estudo, analisando-se as diferenças existentes entre essas soluções.

Na seleção das ferramentas de avaliação utilizadas neste estudo comparativo, consideraram-se apenas os resultados finais de mensuração do cenário de estudo. Esses resultados são agrupados e apresentados pelas tabelas 6.9 e 6.10, onde se estabeleceu que a abreviatura “G_D” corresponde ao nome do programa “Gera_Distritos”, e a abreviatura “C W” corresponde ao programa “Clarke Wright”.

Tabela 6.9 – Variáveis consideradas na análise comparativa entre as heurísticas

Nº de roteiros	Rota	Número de Pontos		Distância (m)		Somatória dos maiores pesos transportados (kg)		Tempo efetivo da operação (min)		
		"G_D"	"C W"	"G_D"	"C W"	"G_D"	"C W"	"G_D"		"C W"
								Bike	Moto	
4	1	12	12	6674	6445,33	101,8	71,3	20	16	22
	2	12	12	7071	6520,47	62,6	87,8	22,5	17,2	22
	3	12	14	7180	5115,2	91,2	56,5	21,6	16,8	22
	4	14	12	6416	5133,58	88,3	142,5	19,7	16,9	20
	∑	50	50	27341	23214,6	343,9	358,1	83,8	66,9	86
6	1	8	7	3617	5415,34	86,6	38,9	13,3	10,6	15
	2	11	8	6204	4962,78	46,3	50,5	16,9	14	15
	3	3	7	4722	5378,92	25,3	65,3	6,9	5	15
	4	9	9	5305	4497,08	65,2	52,6	17	13	16
	5	10	8	6291	4566,5	64,4	38,7	16,4	13,2	15
	6	9	11	5630	2500,71	57,6	112,1	13,8	11,4	15
	∑	50	50	31769	27321,3	345,4	358,1	84,3	67,2	91

A tabela 6.9 mostra que:

- a análise comparativa foi realizada para avaliar os resultados obtidos pela aplicação dos diferentes métodos para idêntico tipo de veículo na operação;
- os cenários foram selecionados entre os que apresentaram valores mais adequados à comparação;
- a variável peso foi calculada no modelo “Clarke Wright”, utilizando-se o mesmo procedimento de cálculo incluído no modelo “Gera_Distritos”.

A primeira constatação é que a ausência da consideração da variável peso na formação de roteiro pelo programa “Clarke Wright” gera cenários com pior distribuição de peso entre os pontos do que o programa “Gera_Distritos”. Devido a essa peculiaridade do programa, um dos roteiros propostos integra os pontos 1 e 25, que possuem distância mínima entre eles; porém, cada um desses pontos tem cargas com peso maior do que os outros pontos. Portanto, esse roteiro resulta numa viagem com carga acumulada muito superior à dos outros roteiros, o que obriga a várias viagens para o transporte das pequenas cargas.

Na tabela 6.9, é possível perceber que, nas soluções apresentadas por ambos os programas para a operação com 4 roteiros, os valores referentes ao número de pontos atendidos revelaram-se semelhantes. No entanto, todas as rotas elaboradas pelo programa “Clarke Wright” apresentam menor distância do que as rotas elaboradas pelo programa “Gera_Distritos”.

Segundo a tabela 6.9, o tempo é melhor aproveitado no programa “Clarke Wright” quanto maior é o limite de tempo de percurso. Desse modo, os roteiros são elaborados para percorrer o maior número de pontos possível a partir do limite de tempo permitido para o roteiro. Comparativamente, por não haver restrição de limite de tempo no programa “Gera_Distritos”, ocorre uma variação maior do tempo em que o veículo percorre cada roteiro.

A comparação dos custos operacionais e sociais das soluções dos dois programas é apresentada na tabela 6.10.

Tabela 6.10 – Ganhos obtidos pelas soluções oferecidas pelos diferentes programas

Nº de roteiros	Custo variável da operação (R\$/km)			
	Programa	Ganho (Bike)	Programa	Ganho (Moto)
4	“C W”	0,50	“C W”	1,61
6	“C W”	0,53	“C W”	1,73
Nº de roteiros	Custo por quilograma (R\$/kg)			
	Programa	Ganho (Bike)	Programa	Ganho (Moto)
4	“C W”	0,03	“C W”	0,08
6	“C W”	0,02	“C W”	0,09
Nº de roteiros	Custo por emissão (g/km)			
	Programa	Ganho (Bike)	Programa	Ganho (Moto)
4	“C W”	86,65	“C W”	544,69
6	“C W”	93,4	“C W”	587,09

Na tabela 6.10, é possível perceber que, em termos de custos incorridos de operação (considerando-se uma mesma quantidade de idas e voltas ao depósito para atender a toda a operação), os roteiros formados pelo programa “Clarke Wright” apresentam uma economia em função da menor distância de percurso.

Os roteiros formados pelo programa “Clarke Wright” apresentaram, na média, reduções em termos de custo, tanto para o uso da bicicleta quanto para o uso da motocicleta.

O uso da bicicleta a partir do programa “Clarke Wright” apresentou reduções de R\$0,50 por quilômetro, R\$ 0,03 por quilo transportado e 91 gramas de CO₂ emitidos por quilômetro durante a operação.

No caso do uso da motocicleta, o programa “Clarke Wright” apresentou reduções de R\$1,70 por quilômetro, R\$ 0,09 por quilo transportado e 570 gramas de CO₂ emitidos por quilômetro durante a operação.

Com base nessas análises, percebeu-se que o programa que obteve melhores indicações no levantamento final de dados foi o programa “Clarke Wright”, de acordo com as soluções apresentadas em termos de custos (custo por quilômetro, custo por quilograma, custo por

emissão) para as operações com 6 roteiros, que apresentam valores bastante próximos/similares aos da operação de 4 roteiros elaborada pelo programa “Gera_Distritos”.

Logo, em termos de custos, uma operação realizada com um maior número de roteiros (que, aparentemente, teria propensão a ser mais cara) apresenta, pelo programa “Clarke Wright”, um valor bastante parecido com o de uma operação realizada com um menor número de roteiros pelo programa “Gera_Distritos”.

6.3. Análise Comparativa das Soluções Seleccionadas com a Situação Existente

Esta etapa apresenta uma comparação entre as soluções finais de cada programa e a situação de referência (o uso da Kombi na operação de distribuição de malotes na UNICAMP).

Essa comparação é realizada para analisar os possíveis ganhos e vantagens obtidos a partir do uso da bicicleta e da motocicleta em relação ao uso da Kombi na operação de estudo.

As principais características relacionadas com a operação realizada pela Kombi são apresentadas pela tabela 6.11. Os valores apresentados na tabela 6.12 foram determinados conforme as seguintes equações:

- Coluna 4 – custo por km $\rightarrow R\$/ km = \frac{(1,422 \cdot 23265)}{1000} = 33,10$ (6.1)

- Coluna 5 – custo por quilograma $\rightarrow R\$/ kg = \frac{33,10}{1000} = 0,033$ (6.2)

- Coluna 6 – custo da carga transportada $\rightarrow R\$ = 0,033 \cdot 358,1 = 11,82$ (6.3)

- Coluna 7 – nível de emissão $\rightarrow g/ km = \frac{(222 \cdot 23265)}{1000} = 5165,0$ (6.4)

O custo variável por quilômetro e o nível de emissão da Kombi estão apresentados na tabela 3.3.

Tabela 6.11 – Dados da operação da Kombi

	1	2	3	4	5	6	7
	Distância percorrida diária/roteiro (m)	Tempo Máximo acumulado (min)	Peso acumulado (kg)	Custo por km (R\$/km)	Custo por quilograma (R\$/kg)	Custo da carga transportada (R\$/kg)	Nível de emissão (g/km)
Total	23265	80	358,1	33,10	0,033	11,82	5165,0

Antes de realizar a comparação pretendida entre as soluções selecionadas e a situação existente, é necessário compatibilizar os roteiros-soluções indicados pelos programas aqui considerados com a limitação de carga apresentada pelos modais alternativos. Em função dessas restrições e considerando-se o peso das encomendas nos pontos visitados, a realização de cada roteiro pela bicicleta e pela motocicleta necessitava de várias viagens entre os pontos de coleta/entrega e o depósito central. Cada um dos roteiros indicados pelos programas foi então fragmentado em ciclos entre os pontos de coleta/entrega e o depósito central, considerando-se a limitação admitida para bicicleta e motocicleta neste estudo (20kg). A sequência dos pontos atendidos em cada um destes ciclos está apresentada nas tabelas 6.12 a 6.15.

No planejamento dessas viagens fragmentadas do roteiro pleno, a fim de não comprometer a integridade da solução apresentada pelos programas, o atendimento foi priorizado de acordo com o sequenciamento de pontos indicados pelo programa, que é o sequenciamento definido pelo critério de distância mínima de percurso, e não houve busca de solução que otimizasse o pleno aproveitamento da carga transportada.

Tabela 6.12 - Ciclo entre o depósito e os pontos atendidos em cada roteiro do programa “Gera_Distritos” com 4 roteiros

Rota	Percurso	Ciclo	Peso	Distância
1	1	0 – 1 – 0	20 + 20 + 11,2	1306,5
	2	0 – 7 – 4 – 3 – 5 – 6 – 0	20,3	2456,5
	3	0 – 2 – 8 – 11 – 0	19,4	3628,0
	4	0 – 10 – 9 – 22 – 0	13,9	3503,0
2	1	0 – 24 – 12 – 0	16,4	1938,0
	2	0 – 15 – 14 – 13 – 17 – 16 – 0	16,8	3419,2
	3	0 – 18 – 19 – 0	16,9	3158,2
	4	0 – 20 – 21 – 27 – 0	16,6	4626,4
3	1	0 – 23 – 28 – 26 – 30 – 31 – 0	13,3	4206,5
	2	0 – 34 – 35 – 39 – 0	18,2	4757,0
	3	0 – 33 – 0	13,3	2857,8
	4	0 – 32 – 29 – 0	14,3	2088,2
	5	0 – 25 – 0	20 + 15,4	1705,8
4	1	0 – 36 – 37 – 38 – 0	19,2	4472,6
	2	0 – 50 – 40 – 0	19,5	4850,0
	3	0 – 41 – 44 – 45 – 46 – 42 – 0	15,6	5553,0
	4	0 – 43 – 47 – 0	19,6	3891,3
	5	0 – 48 – 49 – 0	18,0	3383,8

Tabela 6.13 - Ciclo entre o depósito e os pontos atendidos em cada roteiro do programa “Gera_Distritos” com 6 roteiros

Rota	Percurso	Ciclo	Peso	Distância
1	1	0 – 1 – 0	20 + 20 + 11,2	1306,5
	2	0 – 7 – 4 – 3 – 8 – 0	17,5	2469,5
	3	0 – 2 – 5 – 6 – 0	20,7	3053,5
2	1	0 – 9 – 10 – 11 – 12 – 14 – 17 – 16 – 0	18,7	3720,1
	2	0 – 18 – 19 – 0	16,9	3158,2
	3	0 – 20 – 21 – 0	13,9	4538,2
3	1	0 – 22 – 27 – 0	9,9	3458,0
	2	0 – 24 – 0	15,6	1406,7
4	1	0 – 28 – 23 – 13 – 15 – 26 – 0	15,3	3051,7
	2	0 – 30 – 31 – 32 – 0	17,5	2542,0
	3	0 – 25 – 0	20 + 15,4	1705,8
5	1	0 – 29 – 33 – 44 – 0	18,2	3757,5
	2	0 – 42 – 41 – 35 – 0	11,9	5507,4
	3	0 – 40 – 38 – 0	18,0	4859,3
	4	0 – 37 – 36 – 0	17,3	3604,3
6	1	0 – 34 – 50 – 39 – 0	17,9	4800,2
	2	0 – 45 – 46 – 43 – 0	10,5	4533,8
	3	0 – 47 – 0	13,7	3577,2
	4	0 – 48 – 49 – 0	18,0	3383,8

Tabela 6.14 - Ciclo entre o depósito e os pontos atendidos em cada roteiro do programa “Clarke Wright” com 4 roteiros

Rota	Percurso	Ciclo	Peso	Distância
1	1	0 – 47 – 43 – 0	19,6	3891,3
	2	0 – 42 – 46 – 45 – 38 – 41 – 39 – 0	18,3	5945,4
	3	0 – 40 – 50 – 0	19,5	4850,0
	4	0 – 21 – 20 – 0	13,9	4538,2
2	1	0 – 33 – 0	13,3	2858,0
	2	0 – 34 – 19 – 0	20,1	3503,6
	3	0 – 22 – 35 – 36 – 0	18,8	4251,7
	4	0 – 37 – 44 – 30 – 0	14,5	4028,6
	5	0 – 48 – 49 – 29 – 0	20,1	3487,7
3	1	0 – 15 – 14 – 13 – 16 – 17 – 27 – 0	19,5	3495,2
	2	0 – 18 – 31 – 9 – 10 – 11 – 0	18,1	3335,8
	3	0 – 32 – 12 – 8 – 0	18,9	2633,8
4	1	0 – 24 – 4 – 0	19,8	1962,7
	2	0 – 2 – 3 – 6 – 0	19,5	3170,7
	3	0 – 5 – 23 – 7 – 26 – 28 – 0	16,6	3247,5
	4	0 – 1 – 0	20 + 20 + 11,2	1306,5
	5	0 – 25 – 0	20 + 15,4	1705,8

Tabela 6.15 - Ciclo entre o depósito e os pontos atendidos em cada roteiro do programa “Clarke Wright” com 6 roteiros

Rota	Percurso	Ciclo	Peso	Distância
1	1	0 – 38 – 41 – 39 – 21 – 35 – 0	19,4	5338,0
	2	0 – 40 – 50 – 0	19,5	4850,0
2	1	0 – 36 – 37 – 44 – 0	20,1	3957,6
	2	0 – 45 – 46 – 42 – 43 – 0	16,7	4647,7
	3	0 – 47 – 0	13,7	3577,2
3	1	0 – 19 – 22 – 0	17,4	3454,1
	2	0 – 20 – 34 – 0	16,6	4039,1
	3	0 – 33 – 0	13,3	2857,8
	4	0 – 48 – 49 – 0	18,0	3383,8
4	1	0 – 26 – 24 – 0	17,2	1899,7
	2	0 – 4 – 2 – 3 – 0	20,0	2940,7
	3	0 – 5 – 23 – 6 – 7 – 0	15,4	2660,5
5	1	0 – 32 – 31 – 15 – 0	19,7	3431,8
	2	0 – 18 – 17 – 16 – 13 – 14 – 0	19,0	3951,5
6	1	0 – 1 – 0	20 + 20 + 11,2	1306,5
	2	0 – 25 – 0	20 + 15,4	1705,8
	3	0 – 29 – 30 – 9 – 10 – 11 – 12 – 8 – 0	19,5	2184,3
	4	0 – 27 – 28 – 0	6,0	328,6

A tabela 6.16 apresenta o número de ciclos fragmentados de cada roteiro que foram determinados, assim como as distâncias totais percorridas e os tempos despendidos por cada modal alternativo no cumprimento de cada roteiro.

Tabela 6.16 – Distância real, tempo real e tempo de ciclo das operações realizadas com bicicleta e motocicleta

Nº de roteiros	Rota	Quantidades de ciclos		Distância real percorrida (m)		Tempo de viagem real (min.)			
		“G_D”	“C W”	“G_D”	“C W”	“G_D”		“C W”	
						Bike	Moto	Bike	Moto
4	1	4	4	10894	19225	33	16	58	29
	2	4	5	13142	18130	39	20	54	27
	3	5	3	15615	9465	47	23	28	14
	4	5	5	22151	11393	66	33	34	17
	Σ	18	17	61802	58213	185	93	175	87
6	1	3	2	6830	10188	20	10	31	15
	2	3	3	11417	12182	34	17	37	18
	3	2	4	4865	13735	15	7	41	21
	4	3	3	7300	7501	22	11	23	11
	5	4	2	17728	7383	53	27	22	11
	6	4	4	16295	5525	49	24	17	8
	Σ	19	18	64435	56514	193	97	170	85
Tempo de espera por parada é de 1 minuto					20 min – Tempo de descanso por ciclo de bicicleta 10 min – tempo de descanso por ciclo de motocicleta				
Nº de roteiros	Quantidade de ciclos		Tempo total de descanso (min)		Tempo total de espera	Tempo de viagem real (min)		Tempo de ciclo (min)	
	“G_D”	“C W”	“G_D”	“C W”		“G_D”	“C W”	“G_D”	“C W”
4 (Bike)	18	17	360	340	50	185	175	595	565
4 (Moto)	18	17	180	170	50	93	87	323	307
6 (Bike)	19	18	380	360	50	193	170	623	580
6 (Moto)	19	18	190	180	50	97	85	337	315

A partir dos dados apresentados na tabela 6.16, foi determinado o tamanho da frota de bicicletas e motocicletas necessária para a realização das operações de coleta/entrega ao longo de cada roteiro, como apresentado na tabela 6.17.

Tabela 6.17 – Dimensionamento de frota

Nº de roteiros	Tempo de Ciclo (min)				Número de veículos necessários na operação			
	"G_D"		"C W"		"G_D"		"C W"	
	Bike	Moto	Bike	Moto	Bike	Moto	Bike	Moto
4	595	323	565	307	3	2	3	2
6	623	337	580	315	3	2	3	2

Na situação existente, a Kombi realiza 2 circuitos para a coleta/entrega em todos os pontos. Os modais alternativos necessitam de 3 bicicletas ou 2 motocicletas para cumprir o atendimento a todos os pontos.

Os roteiros estabelecidos pelos programas resultaram em igual número de veículos dos modais alternativos para ambos os programas analisados neste estudo.

Os custos operacionais de cada modal alternativo analisado foram determinados e estão apresentados na tabela 6.18. Os custos estão relacionados com a distância real calculada para cada tipo de veículo e apresentada na tabela 6.16.

Tabela 6.18 – Custos operacionais e sociais para a bicicleta e para a motocicleta

Rota	Custo variável da operação (R\$/km)			
	"G_D" (B)	"G_D" (M)	"C W" (B)	"C W" (M)
4	7,48	24,10	7,04	22,70
6	7,80	25,13	6,84	22,04
Rota	Custo por quilograma (R\$/kg)			
	"G_D" (B)	"G_D" (M)	"C W" (B)	"C W" (M)
4	0,37	1,21	0,35	1,14
6	0,39	1,26	0,34	1,10
Rota	Custo por emissão (g/km)			
	"G_D" (B)	"G_D" (M)	"C W" (B)	"C W" (M)
4	1297,84	8157,82	1222,47	7684,07
6	1353,11	8505,27	1186,81	7459,94

Na tabela 6.19, apresentam-se os ganhos absolutos nos custos calculados entre os tipos de veículos analisados. Os valores apresentados representam a subtração entre os custos apresentados nas tabelas 6.18 e 6.11. Os custos empregados nesta análise consideram apenas os veículos, combustível e despesas de manutenção. As equipes humanas envolvidas na operação não foram consideradas nos custos operacionais de nenhum modal avaliado.

Tabela 6.19 – Ganhos obtidos pela comparação entre os diferentes veículos na operação de estudo

Nº de roteiros	Variação absoluta nos custos da bicicleta em relação à motocicleta					
	Custo de operação (R\$/km)		Custo por quilograma (R\$/kg)		Custo por emissão (g/km)	
	“G_D”	“C W”	“G_D”	“C W”	“G_D”	“C W”
4	-16,62	-15,66	-0,83	-0,78	-6860,0	-6461,6
6	-17,33	-15,20	-0,87	-0,76	-7152,2	-6273,1
Nº de roteiros	Variação absoluta nos custos da bicicleta em relação à Kombi					
	Custo de operação (R\$/km)		Custo por quilograma (R\$/kg)		Custo por emissão (g/km)	
	“G_D”	“C W”	“G_D”	“C W”	“G_D”	“C W”
4	-25,62	-26,06	0,34	0,32	-3867,2	-3942,5
6	-25,30	-26,26	0,36	0,31	-3812,0	-3978,2
Nº de roteiros	Variação absoluta nos custos da motocicleta em relação à Kombi					
	Custo de operação (R\$/km)		Custo por quilograma (R\$/kg)		Custo por emissão (g/km)	
	“G_D”	“C W”	“G_D”	“C W”	“G_D”	“C W”
4	-9,00	-10,40	1,17	1,10	2993,0	2519,1
6	-7,97	-11,06	1,22	1,07	3340,2	2295,0

Como esperado, a eventual substituição da Kombi pela bicicleta apresenta grande ganho na contribuição para a redução de poluentes. Obviamente porque o veículo com tração apenas humana, comparado à motocicleta e a Kombi, produz parcela desprezível de emissão de CO₂.

A motocicleta, por sua vez, devido à capacidade limitada de carga considerada neste estudo, resulta em maior número de viagens no atendimento dos roteiros definidos e, portanto, gera significativa ação emissora de CO₂ e, em comparação com a Kombi, não apresenta vantagem; pelo contrário, incorre em maiores custos sociais.

Caso se considere a hipótese do uso de bagageiro na motocicleta com maior capacidade do que aquela considerada neste estudo, naturalmente haverá menor número de viagens e menor contribuição de emissões poluentes.

A comparação entre as soluções indicadas pelos dois programas considerados neste estudo foi realizada entre soluções com mesmo número de roteiros.

Nesta situação, foi possível observar inicialmente que há diferenças entre os resultados obtidos pelo programa “Clarke Wright” e aqueles obtidos pelo programa “Gera_Distritos”.

O programa “Clarke Wright” não considera a variável peso nos cálculos do problema; sua solução inicial busca definir roteiros apenas pela minimização de distância entre os pontos. Portanto, como ele agrupa pontos com cargas de maior peso e outros com cargas de menor peso em diferentes roteiros, isso faz com que os pesos transportados em cada viagem possam ser discrepantes.

Os roteiros do programa “Clarke Wright” apresentaram vantagens de custos decorrentes de menores distâncias em comparação com as soluções definidas pelo programa “Gera_Distritos”.

O programa “Gera_Distritos” apresentou soluções com um maior equilíbrio em termos de peso do que o programa “Clarke Wright”; pois o programa “Gera_Distritos” determina roteiros pela tentativa de igualar/equilibrar o peso de carga entre os diferentes distritos e, ao mesmo tempo, tenta encontrar a solução de mínima distância entre os pontos a serem visitados. Dessa maneira, o processo de otimização contido no programa “Gera_Distritos” busca determinar uma solução satisfatória que atenda, ao mesmo tempo, ao critério de equilíbrio de peso entre os diferentes roteiros e encontre os percursos de distância mínima ao longo do roteiro.

Por outro lado, caso a restrição de capacidade de transporte nas encomendas com maior peso consideradas nos veículos alternativos fosse imposta na formação de roteiros (condição não considerada por nenhum dos programas utilizados neste estudo), os resultados poderiam ter sido completamente diferentes: a quantidade de roteiros aumentaria e o número de pontos visitados em cada roteiro diminuiria.

Em resumo, os dados e resultados obtidos a partir da aplicação dos programas “Gera_Distritos” e “Clarke Wright” para o cenário de estudo, juntamente com as informações coletadas em pesquisas teóricas, permitiram realizar uma análise comparativa da maneira como cada um dos três tipos de veículos estudados realiza a operação de entrega e/ou coleta de pequenas encomendas.

A tabela 6.20 permite estabelecer a comparação pretendida. Na comparação realizada, utilizou-se o seguinte critério para definir a classificação de cada tipo de veículo analisado: valor 3 para a pior opção e valor 1 para a melhor opção de transporte de pequenas encomendas no cenário de estudo.

Tabela 6.20 – Critérios de comparação entre os três veículos considerados para a entrega e/ou coleta de pequenas encomendas

Característica	Tipo de Veículo		
	Kombi	Motocicleta	Bicicleta
Capacidade de carga do veículo	1	2	3
Custo variável por quilometragem (R\$/km)	3	2	1
Custo variável total na operação (R\$ total)	1	3	2
Custo por quilograma transportado (R\$/kg)	1	3	2
Nível de poluentes por quilômetro (g/km)	3	2	1
Custo total de emissão de poluentes na operação	2	3	1
Custo de aquisição do veículo zero	3	2	1
Número de veículos necessários na operação	1	2	3
Tempo de ciclo	1	2	3
Segurança da carga e do motorista	1	2	3
Eficiência do veículo carregado em aclives	1	2	3
Somatória	18	25	23

A comparação realizada na tabela 6.20 confirmou que a Kombi ora utilizada na coleta e distribuição de pequenas encomendas, pelos critérios utilizados neste estudo, mostrou ser o

veículo mais adequado. Em seguida, a bicicleta mostrou-se vantajosa em relação à motocicleta para a mesma operação de transporte.

Suplementarmente, desenvolveu-se a tabela 6.21 contendo as vantagens e desvantagens que cada tipo de veículo possui segundo os critérios utilizados neste estudo, evidenciando as conclusões obtidas.

Tabela 6.21 – Vantagens e desvantagens de cada tipo de veículo na operação estudada

Kombi	Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> • Possui maior capacidade de carga; • Ideal para a operação em estudo, pois atende maior número de clientes por roteiro; • Oferece maior segurança para carga e motorista.
	Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> • Maior valor de custo unitário por quilometragem; • Maior nível unitário de emissão poluente; • Apresenta maior valor de custo de aquisição.
Moto	Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidade média superior em condições de tráfego congestionado.
	Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> • Maior valor de custo total na operação estudada; • Maior volume de emissão poluente na operação estudada.
Bike	Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> • Baixo nível de emissão de poluentes; • Menor valor de custo unitário por quilometragem; • Menor valor de custo de aquisição; • Velocidade média intermediária no trânsito congestionado.
	Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> • Menor nível de segurança para a carga transportada; • Baixo rendimento na transposição de aclive com carga; • Velocidade média de transporte depende do condicionamento físico do ciclista. • Menor velocidade média em trânsito livre.

A partir das comparações realizadas, pode-se perceber que o uso da motocicleta em substituição à Kombi nos roteiros indicados não pode ser considerada vantajosa, já que a motocicleta tem capacidade mais limitada e precisa efetuar muitas viagens e, portanto, polui num nível muito superior à Kombi. Nas condições consideradas neste estudo, não ocorre economia de custos que justifique a substituição da Kombi pela motocicleta.

Por outro lado, a substituição da Kombi pela bicicleta possibilitaria uma redução nos custos sociais para efetuar a operação pretendida nas soluções apresentadas pelos dois programas. No futuro, poderia estabelecer-se um serviço complementar de entregas urgentes de encomendas muito pequenas por bicicleta.

7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

7.1. Considerações sobre o Desenvolvimento da Pesquisa

O primeiro capítulo consiste em uma apresentação que explica os objetivos e a problemática da pesquisa realizada. O segundo é uma revisão dos conceitos considerados importantes para a resolução da problemática em estudo. O terceiro capítulo apresenta uma discussão das metodologias aplicadas na pesquisa, juntamente com uma definição das principais variáveis de entrada e saída de cada método utilizado. O quarto consta de uma descrição do cenário específico de estudo e dos dados coletados na pesquisa de campo. O quinto capítulo descreve os procedimentos de aplicação dos modelos propostos neste estudo, apresentando as heurísticas mencionadas nos capítulos anteriores de maneira mais detalhada. O sexto realiza uma comparação dos resultados obtidos com as aplicações dos modelos computacionais utilizados neste estudo – em especial, a análise dos programas “Gera_Distritos” e “Clark Wright” aplicados ao estudo de viabilização da bicicleta e da motocicleta em operações de distribuição de pequenas encomendas, de modo a fornecer diferentes soluções com diferentes roteiros na região de análise.

Neste capítulo, são apresentadas as principais conclusões obtidas com a elaboração desta dissertação, assim como das pesquisas e estudos realizados durante o seu desenvolvimento. Além disso, são propostas algumas sugestões para estudos complementares pertinentes à temática desenvolvida neste trabalho.

Esta pesquisa partiu da constatação da necessidade de se encontrar medidas ou métodos que facilitem o uso de veículos não poluentes em operações logísticas de coleta e entrega de pequenas encomendas em áreas com até 9 km². Durante a elaboração deste estudo, acabou sendo incluída, em seu escopo, a análise da viabilidade da motocicleta com base nos mesmos conceitos de operação logística com baixa contribuição poluidora.

A questão da sustentabilidade está relacionada ao modo como o transporte realiza suas operações. Na atualidade, grande parte dos meios de transporte utiliza combustíveis não renováveis oriundos do petróleo, do carvão e do gás natural, cujas suas descargas poluem o ar, intensificam o aquecimento global e o aumento de doenças respiratórias. Por isso, o ideal é a

promoção de um transporte sustentável que reduza as agressões ao meio ambiente e simultaneamente possa transportar a máxima carga possível gastando o mínimo de combustível.

O presente estudo possibilitou o conhecimento da sistemática de coleta e distribuição de pequenas encomendas em geral e de distribuição de cargas e encomendas com bicicletas em especial. Na prática, ele apoiou-se em entrevistas com representantes de empresas que empregam essa sistemática. Na teoria, baseou-se em três heurísticas que visam à definição de roteiros e áreas para a realização de coleta e distribuição de cargas.

Durante a análise, foi possível filtrar e calibrar dados e variáveis relacionados à problemática de transportes e às particularidades que envolvem a distribuição/coleta de pequenas encomendas. O estudo detalhado permitiu a consideração de diferentes cenários considerando, como situação de referência, o sistema de coleta e entrega de malotes internos da UNICAMP no campus de Campinas, que ocorre em uma área de aproximadamente 5km², na busca de soluções adequadas para a análise considerada.

Para a formação desses cenários alternativos, foram realizadas pesquisas específicas sobre operações de entrega e coleta por bicicleta e motocicleta. Essas pesquisas indicaram uma capacidade máxima de carga distribuída igual a 20 kg por viagem para ambos esses modais ao longo dos pontos do roteiro, o que, por sua vez, demandou considerável número de viagens, embora a operação final tenha exigido o emprego de apenas 3 bicicletas ou 2 bicicletas.

Esses cenários alternativos foram inseridos como dados de entrada para as heurísticas consideradas neste estudo, de modo que foi feita uma comparação da maneira como essas heurísticas trataram o problema de definição de roteiros de distribuição com bicicletas e motocicletas. Tais heurísticas ofereceram a possibilidade de desenvolver hipóteses, testá-las, analisar os resultados apresentados, refinar os conceitos estudados e selecionar as soluções mais adequadas.

Foram desenvolvidos estudos de heurística através de três metodologias para proposição de roteiros ou zonas de atendimento: emprego do diagrama de Voronoi, método de Clarke & Wright e método de *districting*. As soluções encontradas foram comparadas e foi possível observar que cada uma dessas três heurísticas apresentaram diferentes resultados para área de estudo.

A utilização do diagrama de Voronoi não se mostrou adequada para o cenário considerado neste estudo, pois seu uso não definiu uma área de zoneamento que cobrisse múltiplos pontos de troca e fornecesse um roteiro dedicado.

Em outra tentativa complementar na aplicação do diagrama de Voronoi no cenário pretendido, realizou-se um estudo combinado com o algoritmo de *districting*, na expectativa de que as soluções resultantes pudessem estabelecer áreas de abrangência que cobrissem múltiplos pontos de atendimento a partir de um dado ponto central (centro de gravidade) e de que, a partir desse procedimento, pudessem ser definidos pequenos roteiros a serem percorridos dentro das áreas de abrangência estabelecidas por esses diagramas de Voronoi. No entanto, tal abordagem mostrou-se inicialmente inadequada para ser aplicada no estudo pretendido, dado que resultou em áreas de abrangência pouco definidas que não cobriram todos os pontos determinados na área de estudo. Assim sendo, a aplicação desse método requer que sejam realizadas novas pesquisas a fim de adequar a metodologia considerada com o tipo de cenário de estudo analisado.

A aplicação do programa “Clark Wright” forneceu roteiros baseado apenas na minimização da distância percorrida, não considerando os pesos das cargas originadas ou destinadas nos pontos atendidos. A versão empregada neste estudo não possui o método complementar *2-opt*, portanto as soluções indicadas não foram otimizadas e, em alguns casos, houve roteiros com trajetórias que se cruzaram. Entretanto, foi possível observar que as soluções apresentadas por esse programa mostraram-se bastante vantajosas em termos de custos variáveis relacionados com a distância de percurso. Devido ao fato de a heurística desse programa priorizar a condição de minimização de distância de percurso no processo de formação de roteiro, todos os custos relacionados com essa variável (custo de emissão de poluentes, custo variável incorrido na operação) são, por consequência, também minimizados, o que torna as soluções providas por esse programa as de menor custo incorrido.

O programa “Clark Wright” tem o tempo de percurso como uma de suas variáveis de entrada e, portanto, suas soluções não se mostraram adequadas, pois a questão de tempo é tratada mais como uma restrição para estabelecer o tamanho de percurso e a quantidade de pontos a serem atendidos na viagem, e não uma variável que se relacione com o rendimento da operação em si. Dessa maneira, a variável tempo pode ser percebida mais como uma restrição que precisa ser atendida (meta a ser cumprida) do que como uma variável que poderia ser otimizada (meta a

ser alcançada). Portanto, nesse caso, essa restrição compromete o adequado cumprimento da operação caso ocorram fatores restritivos externos (tráfego, clima, sinalização, obras, etc.) que possam atrasar a operação pretendida. A restrição para que a operação se realize pode afetar a qualidade do serviço e eventualmente acarretar uma diminuição da segurança operacional numa tentativa do condutor de compensar o tempo perdido em situação não prevista.

A aplicação do programa “Gera_Distritos” mostrou-se a mais adequada para o cenário em estudo, já que considera as cargas que devem ser transportadas e busca distâncias mínimas. Porém, observou-se que o programa não possui critério de priorização entre essas duas variáveis (peso de carga a ser transportado e distâncias mínimas), o que resultou em soluções que necessitam ser otimizadas. Dessa maneira, dado que a não priorização entre os critérios de distância e peso de carga promoveu soluções mais custosas do que aquelas que priorizaram apenas a questão de minimização de distância, as soluções apresentadas por esse programa mostraram-se pouco vantajosas em termos de custos variáveis relacionados com a distância de percurso.

Por outro lado, em termos de tempo de operação, as soluções apresentadas relacionaram o tempo com a distância percorrida e o tempo de espera nos pontos de atendimento. Nesse caso, a variável tempo não é estabelecida como uma restrição para o cumprimento da operação pretendida, mas como uma variável que, dependendo da maneira como é manipulada, pode ser considerada como uma meta de desempenho a ser atingida ou superada para servir como forma de melhorar a qualidade de entrega do serviço de entrega e/ou coleta.

Adicionalmente, foi possível perceber que os custos ambientais apurados mostraram que uma possível substituição da Kombi pela bicicleta na transferência de pequenas encomendas poderia ser viável se houvesse o emprego de embalagens que garantissem a integridade dos documentos trasladados. A eventual substituição da Kombi pela motocicleta com capacidade de transporte semelhante à da bicicleta como considerada neste estudo não se mostrou viável quanto aos custos sociais. Essa conclusão confirma os conceitos formulados por Vasconcelos (2008), e Alvares Junior (2010), que salientam que a motocicleta pode ser considerada como o tipo de veículo mais poluente nas vias urbanas.

Considerando-se que as distâncias entre o setor de expedição e os diversos pontos são inferiores a 2 km e que o terreno do campus não apresenta acidentalidade expressiva, o emprego da bicicleta é favorável comparado ao da motocicleta.

Evidentemente, a substituição real da Kombi pela bicicleta não seria possível se a embalagem do malote não fosse impermeável. Isso porque o conteúdo dos malotes se constitui em pastas com folhas de papel que configuram a burocracia oficial da universidade e seu transporte necessita da garantia de que os documentos não fiquem expostos às adversidades do clima.

Portanto, através da comparação dos resultados experimentais, foi possível confirmar que as metodologias consideradas no presente estudo e a aplicação dos métodos propostos conseguiram representar de maneiras distintas a operação a ser aplicada no cenário real.

7.2. Sugestões para Futuras Pesquisas

No desenvolvimento deste trabalho foi possível perceber que a temática tratada pode ser complementada ou aperfeiçoada em futuras pesquisas.

Com este objetivo são apresentadas as seguintes propostas:

- Estudos com motocicleta equipada com “*side-car*” ou bagageiros traseiros que permitisse maior capacidade de transporte;
- Estudos com veículos elétricos, de porte como bicicletas elétricas ou carros elétricos que realizassem a operação com muito baixo nível de emissão poluente;
- Estudo econômico que envolva empresas de transporte por bicicleta e que permita o acesso a informações ora inacessíveis e permita a discussão dos insumos que incidem na definição dos custos internos e de mão de obra envolvidos nesta operação;
- O aprimoramento do programa “Gera_Distritos” ampliando seus limites atuais e melhorando a formação de roteiros;

- O aprimoramento o programa “Clarke Wright” para tratar do problema de capacidade de transporte em peso e a introdução de sistemática que permita a otimização da distância percorrida;
- Desenvolvimento de programas ou abordagens que resultem no aprimoramento do diagrama de Voronoi e permita que a sua solução defina uma área de atendimento que represente vários pontos de coleta/entrega;
- Emprego de programa computacional para definição de roteiro que permita a consideração da variável capacidade de transporte do veículo na solução a ser definida;
- Desenvolvimento de proposições de roteiros que permitissem a consideração de retardo ou diferentes velocidades durante o deslocamento dos veículos (situações a serem tratadas: congestionamento da via, via em declive/active, clima e outros).

8. BIBLIOGRAFIA

8.1. Referências Bibliográficas

ALLEN, D. W. *GIS Tutorial II: Spatial Analysis Workbook*. ESRI Press, 2009.

ALVARES JUNIOR, O. M. *o Promot e as Emissões das Motocicletas*. Revista dos Transportes Públicos, ANTP, Ano 32, 2010.

ArcGIS. (2013). Disponível em: <<http://www.esri.com/software/arcgis>>. Acessado em: Mar. 2013.

ArcGIS Resources (2013). *ArcGIS Help 10.1*. Disponível em: <[http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#/>. Acessado em: Mar. 2013.](http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#/)

ArcGIS Resources (2013). *What is ArcGIS?* Disponível em: <<http://resources.arcgis.com/en/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>>. Acessado em: Mar. 2013.

BALLOU, R. H. *Gerenciamento da cadeia de suprimentos/logística empresarial*. Tradução: Raul Rubenich. – 5. Ed. – Porto Alegre: Bookman, 2006.

BEZ, E. T., ADRIANO, D. D. *Programa Clarke Wright (Software em Desenvolvimento)*. São José, Santa Catarina. UNIVALI, 2014.

BOYER, K.K., FROHLICH, M.T., HULT, G.T.M. *Extending the Supply Chain – How cutting-edge companies bridge the critical last mile into customers' homes*. Amacom, New York, USA, 2005.

BOSKAYA, B., ERKUT, E., LAPORTE, G. *A tabu search heuristic and adaptive memory procedure for political Districting*. European Journal of Operational Research. 144:12–26, 2003.

BRASIL. Conselho Nacional de Trânsito. *Resolução Nº 356, de 02 de agosto de 2010*. Estabelece requisitos mínimos de segurança para o transporte remunerado de passageiros (mototáxi) e de cargas (motofrete) em motocicleta e motoneta, e dá outras providências.

Disponível em:

<http://www.denatran.gov.br/download/Resolucoes/RESOLUCAO_CONTRAN_356_10.pdf>.

BRASIL. Lei Nº 3.503, de 23 de setembro de 1997. Código de Trânsito Brasileiro. *Institui o Código de Trânsito Brasileiro*. Publicado no DOU de 24.9.97 e Retificado em 25.9.97. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L9503Compilado.htm>.

CÂMARA, G., CASANOVA, M. A., HEMERLY, A. S., MAGALHÃES, G. C., MEDEIROS, C. M. B. *Anatomia de Sistemas de Informação Geográfica*. Campinas: Instituto de Computação, UNICAMP, 1996.

CET – Cia de Engenharia de Tráfego. *Acidentes de Trânsito no Município de São Paulo*. Relatório Anual, 2013.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. *Emissões Veiculares no Estado de São Paulo*. 2012 [recurso eletrônico] / CETESB; coordenação técnica Marcelo Pereira Bales; elaboração Antônio de Castro Bruni [et al.]. -- São Paulo: CETESB, 2013. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/ar/emissoes/relatorio-2012.pdf>>.

COELHO, M. D., PORTO JUNIOR, W., RIBEIRO, P. C. M. *Custo por Quilometro da Bicicleta Como Transporte Diário*. In: IX Congresso de Ensino e Pesquisa de Engenharia de Transportes do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. IX Rio de Transportes, 2011. p. 1-12.

CONTRI, R. F. F. *Otimização de Sistemas de Atendimento Emergenciais Utilizando a Teoria de Filas e o Diagrama de Voronoi Ponderado*. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção e Sistemas) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

COURRIEROS. *Entrevista concedida pela Equipe Operacional da Empresa Courrieros*. São Paulo, 2013.

CUNHA, C.B. *Aspectos práticos da aplicação de modelos de roteirização de veículos a problemas reais*. Revista Transportes da ANPET – Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, v.8, n.2, p.51-74, nov. 2000.

CUNHA, C. B. D., BONASSER, U. D. O., ABRAHÃO, F. T. M. *Experimentos Computacionais com Heurísticas de Melhorias para o Problema do Caixeiro Viajante*. XVI Congresso da ANPET - Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, Natal, 2002.

DAVIS Jr., C. A. *A triangulação de Delaunay e suas aplicações em GIS*. InfoGeo, Curitiba (PR), v. 2(7), p. 39 - 40, 01 maio 1999. In Portuguese.

DAVIS Jr., C. A. *Geoprocessamento na Prefeitura de Belo Horizonte*. Educação e Tecnologia, Belo Horizonte (MG), v. 4, p. 34 - 36, 01 dez. 1999. In Portuguese.

DAVIS Jr., C. A. *Modelagem de dados geográficos (parte II)*. InfoGeo, Curitiba (PR), v. 1(3), p. 44 - 46, 01 set. 1998. In Portuguese.

DAVIS Jr., C. A. *Modelagem de dados geográficos (parte I)*. InfoGeo, Curitiba (PR), v. 1(2), p. 38-40, 01 jul. 1998. In Portuguese.

- DAVIS Jr., C. A.** *O diagrama de Voronoi e suas aplicações em GIS*. InfoGeo, Curitiba (PR), v. 1(6), p. 45 - 46, 01 mar. 1999. In Portuguese.
- DUTRA, N. G. S; NOVAES, A. G. N.** *Levantamento de Tecnologias Adotadas nas Entregas Urbanas como Propostas ao Problema da Última Milha*. In: XIX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2005, Recife, PE. Anais do XIX ANPET, 2005. v. II. p. 1797-1808.
- ECF – European Cyclists’ Federation.** Cycle more often 2 Cool down the planet! Quantifying Co2 savings of cycling. p. 17. Brussels. Nov. 2011.
- EMPRESA SAIDBRASIL.** *Modelos de Sidecar*. Disponível em: < <http://www.saidbrasil.com.br/>>. Acesso em: out. 2013.
- ET SpatialTechniques.** *ET SURFACE 4.0 (Ferramenta de Software para Arcview/ArcGIS)*. ET SpatialTechniques. 266 Degas Street. Faerie Glen. Pretoria. South Africa. 2012.
- GALVÃO, L. C., NOVAES, A. G. N., CURSI, J. E. S. de., SOUZA, J. C.** *A Multiplicatively-Weighted Voronoi Diagram Approach to Logistics Districting*. Computers & Operations Research, Inglaterra, Holanda (Elsevier), v. 33, p. 93-114. 2006.
- GEVAERS, R., VAN DE VOORDE, E., VANELSLANDER, T.** *Characteristics and typology of last-mile logistics from an innovation perspective in an urban context*. In Proceedings of WCTR 2010, Lisbon, Portugal.
- HESS, S. W., WEAVER, J. B., SIEGFELDT, H. J., WHELAN, J. N., ZITLAU, P. A.** *Non-partisan Political Redistricting by Computer*. Ops Res., 13, 998-1006. 1965.
- HOJATI, M.** *Optimal Political Districting*. Computers & Operations Research, v. 23, n. 12, p.1147-1161. 1996.
- IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada.** Comunicados do IPEA N°113. *Poluição Veicular Atmosférica*. Edição de 22 de setembro de 2011. IPEA. 2011. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/comunicado/110922_comunicadoipea113.pdf>.
- IPEA/ANTP.** *Impactos Sociais e Econômicos dos Acidentes de Trânsito nas Aglomerações Urbanas Brasileiras*. Brasília, 2003
- KENNEDY, M.** *The Global Positioning System and ArcGIS*. 3rd Edition. Boca Raton, United States. 2010.
- KNAAK, N., KRUSE, S., PAGE, B.** *An Agent-based Simulation Tool for Modelling Sustainable Logistics Systems*. In: Voinov A, Jakeman A, Rizzoli A (Hrsg) Proceedings of the summit on

environmental modelling and software (iEMSs 2006). International Environmental Modelling and Software Society, Burlington. 2006.

KOIKE, B., MALTA, C. *Abril investe em pequenas encomendas*. Valor Econômico. Brasil, 21. Ago. 2012. Edição 708. Disponível em: <<http://www.valor.com.br/empresas/2787350/abril-investe-em-pequenas-encomendas>>. Acesso em: fev. 2014.

KOCH, T., DENIKE, K. *Medical mapping: the revolution in teaching -- and using -- maps for the analysis of medical issues*. Journal of Geography 103, 67-85. 2004.

LIN, S.; KERNIGHAN, B. W. *An Effective Heuristic Algorithm for the Travelling Salesman Problem*. Operations Research, vol. 21, p. 498-516. 1973.

MACHADO, P.S., MOURA, A.C.M. *Projeto Piloto de Sistema de Informações Geográficas da Vila São Francisco das Chagas*. Revista Informática Pública da Prodabel, Belo Horizonte. 2003.

MAES, J., VANESLANDER, T. *The Use of Bicycle Messengers in the Logistics Chain*. Concepts Further Revised Procedia - Social and Behavioral Sciences, Vol. 39, pp. 409-42. 2012.

MATOS, J. *Fundamentos de Informação Geográfica*. 6. Ed. Edições LIDEL, ISBN. 2008.

MARTINS, H. H., BIAVATI, E. *Mortos e Feridos sobre Duas Rodas – Estudo sobre a Acidentalidade e o Motorista em São Paulo*. São Paulo: CET, 2009.

MELO, A. C. S. e FILHO, V. J. M. F. *Sistemas de roteirização e programação de veículos*. Seção de Software. 2001.

MENESES, H. B. *Roteirização de veículos*. CEFET/CE. 2006. Disponível em: <http://metro.det.ufc.br/~brito/Disicplina_Logistica_Trans_Carga/AULA%2010.pdf>. Acesso em: fev. 2014.

MONTEIRO, M. *O Futuro da Logística de Entregas no País*. Site GuiaLog. 2004. Disponível em: <<http://www.guiaelog.com.br/Y564.htm>>. Acesso em: fev. 2014.

MORAES, F. *Andar de bicicleta é 6 vezes mais barato do que de carro*. Site O Eco. 2011. Disponível em: <<http://www.oeco.org.br/reportagens/25390-andar-de-bicicleta-e-6-vezes-mais-barato-do-que-de-carro>>. Acesso em: out. 2013.

MOURA, A. C. M. *Discussões metodológicas para aplicação do modelo de Polígonos de Voronoi em estudos de áreas de influência fenômenos em ocupações urbanas – estudo de caso em Ouro Preto – MG*. Anais VII Encontro Nacional da Associação Brasileira de Estudos Regionais e Urbanos - ENABER, FEA/USP. São Paulo, Brasil, 9-11 set. 2009,

- NOVAES, A. G. N., LIMA JÚNIOR, O. F., PAIVA, E. P. L.** *Programa Gera_Distritos (Software em desenvolvimento desde abril de 2014)*. Florianópolis, SC. UFSC. 2014
- NOVAES, A. G. N.** *Logística e Gerenciamento da Cadeia de Distribuição*. 1. Ed. Rio de Janeiro: Editora Campus, v. 1. 432p. 2007.
- NOVAES, A. G. N.** *Resolução de Problemas de Transportes com Diagramas de Voronoi*. In: XXI ANPET, Rio de Janeiro, RJ. Panorama Nacional da Pesquisa em Transportes. 2007.
- NOVAES, A. G. N.; CURSI, J. E. S. de ; SILVA, A.L. de ; SOUZA, J. C.** *Solving Continuous Location-Districting Problems with Voronoi Diagrams*. Computers and Operations Research, v. 36, p. 40-59. 2009.
- NOVAES, A. G. N.** *Solving Continuous Urban Districting Problems with Voronoi Diagrams*. In: 10th International Conference in Urban Planning and Urban Management, 2007, Foz do Iguaçu, PR. Proceedings, 10th Conference in Urban Planning and Urban Management. São Carlos, SP : Escola de Engenharia de São Carlos - USP. 2007.
- NOVAES, A. G. N., VALENTE, A. M.; PASSAGLIA, E.; VIEIRA, H.** *Gerenciamento de transporte e Frotas*. Segunda Edição. 2008.
- OKABE A., BOOTS B. E K. SUGIHARA.** *Spatial Tessellations Concepts and Applications of Voronoi Diagrams*. (second edition). Wiley, Chichester. 2000
- ORMSBY, T., NAPOLEON, E., BURKE, R., GROESSL, C., FEASTER.** *Getting to Know ArcGIS Desktop*. 2nd Edition, ESRI Press. 2004.
- PAGE, B.** *Environmental Informatics for Sustainable Logistics*. Inv. Paper. In: P. Prastacos, et.al. (eds): e-Environment: Progress and Challenge. Proc. of the EU-LAT Workshop e-Environment, San Jose, Costa Rica, pp. 187-201. 2004.
- PARTYKA, J. G., HALL, R. W.** *On The Road to Service: Fueled by array of technological advances, vehicle routing software heads off in a new direction aimed at meeting growing customer demands*. 2000. Disponível em: <<http://www.orms-today.org/orms-8-00/vehiclerouting.html>>. Acesso em: fev. 2014.
- REVISTA BICICLETA.** *Especial Bicicleta Elétrica* Ed. 21. Out. 2012. Disponível em: <<http://www.revistabicicleta.com.br/bicicleta.php?&id=2351>>.
- ROCHA, C. H. B.** *Geoprocessamento: Tecnologia Transdisciplinar*. Juiz de Fora, MG: Ed. Do Autor, 2000.

SEBRAE. [2011 ou 2012]. *Ideias de Negócios – Frete e Transporte de Pequenas Cargas*. 2011/2012. Disponível em: <<http://www.sebrae.com.br/>>. Acesso em: fev. 2014.

SILVA, R. M. *Introdução ao Geoprocessamento: conceitos, técnicas e aplicações*. Novo Hamburgo: Feevale, 2007.

SYSLO, M. M., DEO, N., KOWALIK, J. S. *Discrete Optimization Algorithms – With Pascal Programs*. Dover Books on Mathematics: Mineola, NY. 2006.

TEIXEIRA, R. G., CUNHA, C. B. *Heurística para o problema de dimensionamento e roteirização de uma frota heterogênea utilizando o algoritmo out-of-killer*. Artigo, 2002. Disponível em: <<http://www.revistatransportes.org.br/index.php/anpet/article/view/152/134>>. Acesso em: dez. 2013.

UNICAMP - UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS. [2013]. Disponível em: <<http://www.unicamp.br/unicamp/>>. Acesso em: set. 2013.

UNICAMP - UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS. Portal DGA – Diretoria Geral da Administração. [2013]. Disponível em: <<http://www.dga.unicamp.br/>>. Acesso em: set. 2013.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA. Divisão de Transportes. *Planilha de Custo Operacional*. Minas Gerais, 2006. Disponível em: <<https://www.dti.ufv.br/dtr/>>.

VASCONCELOS, E. *O Custo Social da Motocicleta no Brasil*. Revista dos Transportes Públicos – Agência Nacional de Transportes Terrestres – ano 30 – 31, 2008.

VASCONCELOS, E. *Risco no Trânsito, Omissão e Calamidade: Impactos do Incentivo à Motocicleta no Brasil*. São Paulo: Es. Do Autor, 2013.

8.2. Bibliografia Complementar

AGUILERA, L. M., GIMENEZ, C., BACIC, M. J. *Sistemas de gerenciamento de transportes: Estudo de caso*. In: Simpósio de Engenharia de Produção (Simpep). 10., 2003, Bauru. Anais. Bauru: UNESP.

ALMEIDA, C. M. P. R., TOLEDO, G. L. *Modelos de estratégia logística: uma análise crítica da evolução de seus componentes*. Artigo – SEMEAD. 2003. Disponível em: <www.ead.fea.usp.br/.../011OP%20-%20Modelos%20de%20Estratégias%20Logística.doc>. Acesso em: fev. 2014.

ALMEIDA, C. N., OLIVEIRA, D. B. *Roteamento do veículo de coleta de leite da Laticínios UFC*. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal de Viçosa. 2006. Disponível em:

<<http://www.ufv.br/dep/engprod/TRABALHOS%20DE%20GRADUACAO/C%C3%ADnthia%20Nascimento%20Almeida%20-%20Diana%20Braga%20Oliveira/TG.pdf>>. Acesso em: fev. 2014.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE DE CARGAS. *Manual de Cálculo de Custos e Formação de Preços do Transporte Rodoviário de Cargas.* Associação Nacional do Transporte de Cargas. 2001. Disponível em: <www.ntc.org.br>. Acesso em: fev. 2014.

BALLOU, R. H. *Logística Empresarial: transportes, administração de materiais e distribuição física.* Tradução: Hugo T.Y. Yoshizaki. São Paulo: Atlas. 1993.

BIELENKI, C., RAIRA, A. A., SILVA, A. N. R. *O uso de geoprocessamento no planejamento de pesquisa origem – destino no município de São Carlos.* Artigo - Minerva, v. 5, n. 2, p. 159-167. 2008. Disponível em: <[http://www.fipai.org.br/Minerva%2005\(02\)%2006.pdf](http://www.fipai.org.br/Minerva%2005(02)%2006.pdf)>. Acesso em: nov. 2013.

BINSBERGEN, A. V.; VISSER, J. *New urban goods distribution systems.* 2012. Disponível em <http://www.lth.se/fileadmin/tft/dok/KFBkonf/3binsbergenvisser>. PDF. Acesso em: Dez. 2013.

BORSHCHEV, A. *Modeling and simulation modeling.* 2013. Disponível em: <http://www.AnyLogic.com/upload/Big%20Book%20of%20AnyLogic/Modeling_and_simulation_modeling.pdf>. Acessado em: Jan. 2013.

BORSHCHEV, A. *The three methods in simulation modeling.* 2013. Disponível em: <http://www.AnyLogic.com/files/book/The_three_methods_in_simulation_modeling.pdf>. Acessado em: Jan. 2013.

BRASILEIRO, L. A., LACERDA, M. G. *Análise do uso de SIG no roteamento dos veículos de coleta de resíduos sólidos domiciliares.* Engenharia Sanitária e Ambiental. 2008. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522008000400002>. Acesso em: nov. 2013.

CARNIELLE, L. G. *Proposta de um sistema de análise da logística urbana para cidades de pequeno e médio porte.* Dissertação (Mestrado em Planejamento e Operação de Sistemas de Transportes) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

CASTRO, L. B. *Avaliação do serviço de coleta de resíduos sólidos domiciliares em cidade de médio porte utilizando sistemas de informações geográficas e receptores do sistema de*

posicionamento por satélite. Universidade Federal de Uberlândia. 2006. Disponível em: <http://www.bddd.ufu.br/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=307>. Acesso em: dez. 2013.

CHWIF, L., MEDINA, A. *Modelagem e Simulação de Eventos Discretos – Teoria e Aplicações*. Editora: Bravarte. 2006.

CÔNSOLI, M. A., OLIVEIRA, D., LOPES, F. F., NEVES, M. F. *Structure of the door-to-door channel: The Danone case*. Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto/USP. 2003. Disponível em: <http://www.pensa.org.br/anexos/biblioteca/1332007151623_.pdf>. Acesso em: dez. 2013.

CRUZ, M. L., OLIVEIRA, R. A. *Planejamento e otimização do transporte aplicado à distribuição urbana*. 2004. Trabalho de formatura. Disponível em: <www.administradores.com.br/.../planejamento-e-otimizacao-do-transporte-aplicado...distribuicao-urbana/.../download/>. Acesso em: nov. 2013.

DU, T., WANG, F. K., LU, P-Y. *A real-time vehicle-dispatching system for consolidating milk runs*. Elsevier. 2006. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6VHF-4K42BVN-1&_user=10&_coverDate=09%2F30%2F2007&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_sort=d&_docanchor=&view=c&_searchStrId=1326923848&_rerunOrigin=scholar.google&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=696012ef4e274bd8b33d0e077e8a6620>. Acesso em: nov. 2013.

DUTRA, N. G. S. *O Enfoque de City Logistics na Distribuição Urbana de Encomendas*. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina. 2004.

DUTRA, N. G. S., NOVAES, A. G. N. (2006). *Distribuição de encomendas em centros urbanos baseada no enfoque de "City Logistics"*. In: Confederação Nacional do Transporte - CNT; ANPET - Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transporte. (Org.). Transporte em Transformação X. 1ed. Brasília, DF: , v. , p. 117-134. 2006.

FERLAND, J. A., GUÉNETTE, G. *Decision support system for a school Districting problem*. Operations Research. 38:15-21. 1990.

FERNANDES, B. C., GALAMBA, F. H., TOSTA, L. I., LIMA, R. S. *Análise de modelos de distribuição física de produtos acabados a partir do uso de centros de distribuição*. Estudo de caso. 2009. Disponível em: <http://www.rslima.unifei.edu.br/download1/Adm09/5_98_AC.pdf>. Acesso em: dez. 2013.

GIOVINE, H. *A reestruturação de processos na cadeia de abastecimento como ferramenta de melhoria no atendimento aos clientes: um estudo de caso sobre a indústria de alimentos Danone.* INGEPRO. 2009. Disponível em:

<<http://www.ingepro.com.br/index.php/ingepro/article/viewFile/23/12>>. Acesso em: nov. 2013.

HVENEGAARD, R. A. *Avaliação do uso de algoritmo genético para roteirização com apoio dos sistemas de informação geográfica.* Artigo – Universidade Federal de Itajubá. 2008. Disponível em: <<http://www.epr.unifei.edu.br/PFG/producao2008/trabalhos/trabalho11.pdf>>. Acesso em: nov. 2013.

JUNIOR, P. M. *Otimizando a distribuição: como integrar pessoas, processos e sistemas na roteirização de veículos.* Comitê de Logística – AmCham. 2007. Disponível em: <http://www.amcham.com.br/download/informativo2007-06-27g_arquivo>. Acesso em: nov. 2013.

LEITE, C. *São Paulo, megacidade e redesenvolvimento sustentável: uma estratégia propositiva.* Revista Brasileira de Gestão. v.2, n.1, p. 117-126. 2010.

LIMA JR., O. F. *A carga na cidade: hoje e amanhã.* Revista dos Transportes Públicos (ANTP), ano 25, p. 219-230. 2003. Acesso em: 7 out. 2009.

MAURI, G. R. *Uma nova abordagem para o problema de roteirização e programação de veículos.* Dissertação de Doutorado – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2006. Disponível em: <<http://www.lac.inpe.br/~lorena/mauri/qualificacao-mauri.pdf>>. Acesso em: nov. 2013.

NANCI, L. C. ; SENRA, L. F. A. C. ; SOARES DE MELLO, J. C. C. B. *Avaliação de operadores logísticos na distribuição de jornais com aplicação de um índice de desempenho híbrido (DEA - Multicritério).* Em: VIII Simpósio de Pesquisa Operacional e Logística da Marinha. Rio de Janeiro. Anais do SPOLM, 2005.

NETO, A. F., LIMA, R. S. *Roteirização de veículos de uma rede atacadista com auxílio de Sistemas de Informação Geográficas (SIG).* ENEGEP. 2005. Disponível em: <http://pessoal.facensa.com.br/girotto/files/Logistica_de_Distribuicao/artigo_roterizacao_rede_de_alimentos.pdf>. Acesso em: dez. 2013.

NEVES, T. A., SOUZA, M. J. F., MARTINS, A. X. *Construção de um protótipo de framework para otimização e seu uso na resolução do problema de roteamento de veículos com frota heterogênea e janelas de tempo.* Universidade Federal de Ouro Preto, jul. 2005. Disponível em:

<http://www.sbmac.org.br/eventos/cnmac/cd_xxviii_cnmac/resumos%20estendidos/marcone_souza_ST18.pdf>. Acesso em: nov. 2013.

NOBRE JÚNIOR, E. F., PRATA, B. A., SOUSA JÚNIOR, J. N. C. *O desafio da gestão de infraestruturas urbanas para o desenvolvimento sustentável das cidades*. Em: XI Encontro de Iniciação à Pesquisa da UNIFOR. Fortaleza. XI Encontro de Iniciação à Pesquisa da UNIFOR, 2005.

NOVAES, A. G. N., SCHOLZ-REITER, B., BEZ, E. T., BURIN, P. J. *An Agent-Based Approach to Improve Urban Vehicle Routing Operations*. In: XXV ANPET Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes. Belo Horizonte, MG. Anais do XXV ANPET. Belo Horizonte: Escola de Engenharia - UFMG. 2011.

NOVAES, A. G. N., FRAZZON, E. M. *Avaliação do Desempenho Logístico na Distribuição Urbana de Mercadorias - Proposta de Abordagem e Aplicação*. In: XIX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. Recife, PE. Anais do XIX ANPET, v. II. p. 1822-1830. 2005.

NOVAES, A. G. N., GRACIOLLI, O. D. *Dividing an urban region into quasi-homogeneous servicing districts in a GIS format*. 7th international special conference on information systems in logistics and transportation. 1997.

NOVAES, A. G. N., BURIN, P. J., BEZ, E. T., Scholz-Reiter, B. *Roteirização dinâmica de veículos usando simulação e algoritmo genético*. Transportes (Rio de Janeiro), v. 19, p. 85-92. 2011.

OLIVEIRA, L. K., NOVAES, A. G. N. *Modelagem para Avaliar a Viabilidade da Implantação de um Sistema de Distribuição de Pequenas Encomendas dentro do Conceito de City Logistics*. In: PLURIS - 3º Congresso Luso Brasileiro para o Planejamento Urbano, Regional, Integrado, Sustentável. Santos, SP. Anais Eletrônicos - PLURIS. 2008.

OLIVEIRA, L. K., NOVAES, A. G. N. *Metodologia para Avaliar a Viabilidade de um Novo Sistema de Distribuição de Pequenas Encomendas*. In: XXII ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. Fortaleza, CE. Anais do XXII Anpet. Rio de Janeiro, RJ: ANPET - Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes. p. 918-929. 2008.

ORGANIZATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. *Delivering the Goods 21st Century Challenges to Urban Goods Transport*. 2003. Disponível em: <http://www.internationaltransportforum.org/pub/pdf/03DeliveringGoods.pdf>. Acesso em: Dez. 2012.

- PEIXOTO, M. Q. B., SENNE, E. L. F.** *Solução de problemas de localização e roteamento em redes com sistema de informações geográficas*. Projeto – UNESP – Faculdade de Engenharia. 2002. Disponível em: <<http://www.feg.unesp.br/~elfsenne/alunos/2002-peixoto.pdf>>. Acesso em: nov. 2013.
- REIS, N. G.** *Custos Operacionais, Fretes e Renovação de Frotas*. NTC - Associação Nacional do Transporte de Cargas. 2003. Disponível em: <www.ntc.org.br>. Acesso em: dez. 2013.
- SANCHES JÚNIOR, P. F.** *Logística de Carga Urbana: uma análise da realidade brasileira*. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.
- SANTOS, L., FERREIRA, D. L.** *Sistema de Informação Geográfica aplicado ao Planejamento de Transito e Transportes*. 2004. Disponível em: <www.ig.ufu.br/caminhosdegeografia.html>. Acesso em: nov. 2013.
- SINAY, M. C. F., CAMPOS, V. B. G., DEXHEIMER, L., NOVAES, A. G.** *Distribuição de carga urbana: componentes, restrições e tendências*. In: Rio de Transportes, 2., 2004, Rio de Janeiro. Rio de Transportes II, v.1, 2004. Disponível em: <[http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/vania/pubs/\(16\)CargaUrban.pdf](http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/vania/pubs/(16)CargaUrban.pdf)>. Acesso em: ago. 2012.
- SOUZA, J. C.; MAYERLE, S. F.; FIGUEIREDO, J. N.; GONÇALVES, M. B.; NOVAES, A. G. N.** *Participação em banca de Homero Fernandes Oliveira. Utilização de diagramas de Voronoi para determinar o espaçamento ótimo entre pontos de parada de transporte coletivo*. Exame de qualificação (Doutorando em Programa de Pós Graduação Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina. 2006.
- TANIGUCHI, E., THOMPSON, R. G., YAMADA, T.** *Modelling City Logistics* In: E Taniguchi & R. G Thompson, 1999, City Logistics I, Kyoto (Institute for Systems Science Research).
- UMBELINO, G., MACEDO, D.** *Utilização de Sistemas de Informação Geográficos (SIGs) na validação de Informações Censitárias na escala intra-urbana*. XVI Encontro Nacional de Estudos Populacionais - ABEP. Caxambu (MG). 2008.

ANEXOS

ANEXO A – Entrevista com a Empresa *Courriers* de entrega de documentos e pequenos pacotes

1. Quais são os custos incorridos pela utilização da bicicleta na operação de entrega e coleta de mercadorias?

Os custos envolvidos na operação de entrega e coleta com bicicleta são:

- Custo de alimentação do ciclista (R\$30,00)
- Salário do ciclista (R\$1500,00)
- Compra da bicicleta (R\$3000,00)
- Manutenção da bicicleta (por mês), com valor estimado entre R\$100,00 e R\$150,00, sendo que o menor custo já incorrido foi de R\$75,00

2. Qual é o peso máximo de carga permitido na bicicleta

Alguns dos tipos de equipamentos mais utilizados para realizar o transporte de carga são:

- O bagageiro, que aguenta até no máximo 16 à 20 quilos (dependendo do modelo)
- O carrinho, que vai engatado na bicicleta e aguenta até no máximo 50 à 60 quilos (dependendo do carrinho)
- Mochila, que vai nas costas do ciclista, e não deve exceder 10 quilos

3. Quais são os tipos de bicicletas utilizadas na operação de entrega e coleta de mercadorias?

O tipo de bicicleta utilizada nas operações depende da preferência do ciclista, que irá utilizá-la. Geralmente cada ciclista solicita para a empresa um tipo de bicicleta para ser utilizada nas suas operações.

As bicicletas escolhidas com mais frequência são:

- *Mountain bike*, por causa das subidas e descidas em rampas, pois as diversas marchas facilitam a pedalada em terrenos inclinados;

- *Speed*, para pedalar com mais velocidade, sendo utilizada preferencialmente em dias secos

4. Qual é a distância máxima permitida em uma operação de entrega e/ou coleta?

Geralmente, a distância de roteiro boa para o ciclista é a distância de 10 quilômetros, a distância ruim é mais de 20 quilômetros, e a distância ótima é de 5 quilômetros, toas considerando a ida e a volta na operação.

5. Quais são os equipamentos necessários na bicicleta para efetuar a operação de entrega e/ou coleta?

Para esse tipo de operação é necessário ao ciclista:

- Capacete (o mais importante para a segurança do ciclista)
- Óculos (proteção contra o sol e a poluição)
- Camisa leve e short de ciclismo (para manter o corpo mais refrescado e deixar o ciclista mais confortável durante a corrida)
- Equipamento de manutenção rápida (caso haja algum acidente durante a viagem) como: câmara reserva (caso a roda da bicicleta fure durante a viagem) para bicicleta, bomba (para encher a roda da bicicleta), alavanca (para tirar o pneu da roda), canivete de ferramentas (para eventuais consertos inesperados)
- Garrafinha de água (para manter o ciclista hidratado durante a operação de transporte)
- Luvas (para proteção das mãos em caso de queda do ciclista na bicicleta)
- Luzes de segurança (para viagens noturnas e sinalização do ciclista durante o trajeto de viagens)
- Corrente e cadeado (para prender a bicicleta no momento da entrega no cliente e manter a mesma segura quando estiver estacionada)
- Mochila impermeável (para impedir que a chuva inviabilize a carga nos momentos de chuva), pois em caso de chuva o ciclista deve fazer o roteiro de viagens e cumprir a operação tal como estabelecido pelo acordo do cliente para com a empresa

6. É utilizado algum aparelho de comunicação entre o ciclista e a empresa durante a execução da operação?

Para a comunicação com os ciclistas, a empresa utiliza celular, para mandar instruções básicas. Para mandar instruções específicas durante o roteiro de viagens, a empresa desenvolveu um aplicativo próprio com a marca da empresa.

A empresa recomenda para distâncias pequenas uso de rádios (mas utiliza celular com mais frequência).

E para maiores distâncias, (até 20 quilômetros), a empresa recomenda o uso de *walkie talkie*, ou um celular mesmo.

ANEXO B – Entrevista com o Setor de Expedição da Universidade Estadual de Campinas

1. Como é realizada a operação de distribuição dos malotes na UNICAMP?

Nós lidamos com malotes de entrega e malotes de coleta. Recebemos e enviamos as correspondências que todos os setores da UNICAMP querem transferir para outros setores da UNICAMP.

Essas correspondências incluem documentos, processos, jornais, revistas e outros tipos de papéis.

Para realizar essa operação, o setor de expedição leva um patrulheiro no veículo que vai entregar os malotes para outros patrulheiros que se encontram na frente de algumas unidades da UNICAMP.

Esses outros patrulheiros, por sua vez, vão receber os malotes que contêm as correspondências enviadas de outras unidades para as unidades servidas por esses patrulheiros. E, depois disso, esses mesmos patrulheiros vão entregar outros malotes para o patrulheiro do veículo com a correspondência a ser enviada da unidade para as demais unidades.

Dessa forma, ocorre a troca entre os malotes que contêm correspondências a serem recebidas em alguma unidade da UNICAMP por correspondências a serem enviadas por essa mesma unidade.

2. Quem são esses patrulheiros?

São os adolescentes que atuam na Universidade através do Programa de Integração e Desenvolvimento do Adolescente Trabalhador da UNICAMP.

Nesse programa, a UNICAMP oferece oportunidades de inclusão social e educação profissional aos jovens aprendizes na universidade.

Esses jovens trabalhadores são chamados de patrulheiros.

3. Como os malotes são alocados no veículo?

Um patrulheiro fica dentro do veículo e coloca os malotes em lugares certinhos no chão do veículo para serem entregues nos pontos corretos.

Esses malotes são empilhados no veículo de forma que os que estiverem no topo da pilha saem primeiro e aqueles que estiverem embaixo saem por último.

4. Qual é o modelo do veículo que faz a distribuição dos malotes?

É uma Kombi, de 2012, modelo *flex*, movida na maioria das vezes a álcool, mas que algumas vezes também é movida a gasolina.

5. O trânsito atrapalha muito a operação de transporte dos malotes?

Na época de aula tem muito trânsito e tem pessoal que para em lugar indevido. Às vezes fica difícil passar no meio das ruas quando os carros estão estacionados nos dois lados da pista. Nessa época, chegam a acontecer muitos atrasos nos horários de coleta e de entrega. Geralmente, nós fazemos sempre o mesmo trajeto de percurso, mas, quando isso acontece, a gente tem que achar um caminho alternativo para fazer essas entregas. Aqui na UNICAMP, a gente tenta adequar o horário de saída da Kombi de acordo com o trânsito, pois temos poucos minutos para chegar em cada setor do roteiro. Em período de férias, o trânsito fica mais livre e, quando isso acontece, avisamos, ao patrulheiro ou quem fica no ponto com o malote esperando a gente, que é necessário estar no ponto com 15 minutos de antecedência porque o trânsito pode estar livre e por isso podemos chegar mais cedo do que o horário de costume no ponto. E, se o patrulheiro não estiver no ponto quando a Kombi chegar, ele vai ter que levar o(s) malote(s) direto no Setor de Expedição.

Por outro lado, no período de volta às aulas, o trânsito fica mais complicado, então a Kombi demora mais para chegar nos pontos.

6. Quantos roteiros são realizados para atender a toda a demanda de correspondência necessária?

Essa operação de troca dos malotes é realizada de segunda a sexta-feira em dois roteiros, duas vezes por dia cada um.

7. Existe alguma diferença na quantidade de documentos que são transportados dentro dos malotes de acordo com o período ou o roteiro em que estão sendo transportados?

Em período de férias é mais tranquilo (transporta malotes mais leves) e no período de aulas é mais complicado (transporta malotes mais pesados). No período de aulas, a quantidade de documentos transportados pode triplicar em relação ao período de férias. Além disso, no período da manhã, os malotes geralmente são mais leves (menos correspondência) do que no período da tarde (mais correspondência).

E também a operação do primeiro roteiro leva um maior número de malotes do que a operação do segundo roteiro, tanto no período de manhã quanto no período de tarde.

Geralmente, quando a demanda por pedidos é grande, os malotes carregam de 10 a 20 quilos. Em algumas unidades, são entregues até três malotes (BGRH, PRPG e a Reitoria, por exemplo), quando tem muita correspondência para entregar.

Pode acontecer também de os malotes estarem cheios e ter ainda muitos pacotes de processos amarrados (isso geralmente acontece no CIARQ).

Outras vezes, são entregues também caixas contendo vários livros ou coisas importantes que não podemos averiguar.

8. Existe algum meio de comunicação entre o Setor de Expedição e as Unidades atendidas? Se existe, o que é comunicado?

Algumas vezes, a seção de expedição comunica alguma unidade para informar se a carga é grande ou bastante volumosa. Quando isso acontece, a seção de expedição liga por telefone para o responsável do expediente dessa unidade e solicita patrulheiros auxiliares para ajudar no carregamento de malotes.

9. Vocês assinam algum tipo de confirmação de recebimento ou de entrega durante a operação?

Geralmente, quando a correspondência vem de São Paulo, por exemplo, o motorista da Kombi só assina o recebimento total e depois repassa toda a correspondência para que o setor de expedição assine cada documentação que foi recebida.

A mesma coisa ocorre quando alguma correspondência tem que ser coletada no SEDEX. Nesse caso, quando o veículo vai buscar essa correspondência, o motorista só assina o formulário do AR (Aviso de Recebimento) e, quando retorna para o Setor de Expedição, esse mesmo motorista faz uma relação e passa para o pessoal encarregado do setor assinar e guardar, para assegurar quem foi o motorista que assinou esse formulário.

10. Já houve algum caso de perda ou dano da correspondência durante o transporte?

Nunca houve problema de danificação de correspondência. Geralmente, o que vai dentro dos malotes são processos, documentos e jornais. E o que é transportado fora são correspondências que não sabemos o que vem dentro da embalagem [*sic*]. Para esse tipo de correspondência, o patrulheiro assina um documento de recebimento diferente daquele que informa o recebimento dos malotes.

Além disso, nunca houve nenhum acidente de perda.

O que às vezes acontece, e a gente tenta deixar margem zero de erro, é quando um documento é enviado para uma unidade diferente da unidade pretendida. Esse tipo de problema tem maior possibilidade de ocorrer no momento da distribuição, quando as correspondências vão para os escaninhos. E, para evitar esse tipo de erro, é realizada uma triagem dos documentos coletados nos pontos de troca.

11. O que é feito com os malotes coletados depois que todos os pontos de troca foram atendidos em um roteiro?

Todas as correspondências recebidas na parte da manhã vão ser preparadas para ser reenviadas para as respectivas unidades no período da tarde. E todas as correspondências recebidas na parte da tarde vão ser preparadas para ser reenviadas para as respectivas unidades na parte da manhã do dia seguinte.

Os malotes que são recolhidos durante uma operação são transferidos para um carrinho-plataforma que vai levar esses malotes até uma mesa em que será feita uma triagem e separação das correspondências recebidas. Depois disso, essas correspondências serão inseridas nos respectivos escaninhos contendo os nomes das unidades de destino.

Quando essa triagem acaba, as correspondências são transferidas dos escaninhos para os respectivos malotes de entrega. E esses malotes de entrega são novamente alocados na Kombi para ser enviados para as unidades de destino.

12. O processo de troca de malotes ocorre mesmo que o malote de algumas das partes (entrega ou coleta) esteja vazio?

É obrigatório, mesmo que não tenha nada para ser entregue e/ou para ser coletado, a troca deverá ser realizada.

Mesmo que alguma das partes tenha o malote vazio enquanto a outra parte estiver com um malote cheio, a troca de malotes deverá ocorrer, porque o malote vazio que foi transferido vai ser enchido na outra parte.

Mesmo que não haja nada para ser trocado e o patrulheiro do ponto não tiver nada para ser entregue, ele tem que esperar mesmo assim, porque pode ter alguma coisa importante para receber (até mesmo um aviso).

ANEXO C – Horários da operação de entrega e coleta de malotes



Diretoria Geral da Administração
Pró Reitoria de Desenvolvimento Universitário

MALOTES - HORÁRIOS <u>Os responsáveis pelos malotes deverão estar nos locais de entrega pelo menos com 10 minutos de antecedência. ::</u> PRIMEIRO MALOTE SAÍDAS: 8h50min. E 13:00h.		
UNIDADES	HORÁRIO - MANHÃ	HORÁRIO - TARDE
PRP, CADI, PRDU, PG, CORI, CPDI, SG, EXTECAMP, PRE, CEES e INOVA	8h52min.	13h02min.
FCM	8h57min.	13h07min.
CECOM	8h59min.	13h09min.
HEMOCENTRO, GASTROCENTRO, PRODECAD, CRECHE e ÀREA DE SAÚDE	9 horas	13h10min.
CECI	9h01min.	13h11min.
CAISM e CEB	9h02min.	13h12min.
CT e CPO	9h04min.	13h14min.
Subáreas de Transporte e Gráfica	9h05min.	13h15min.
CEMEQ	9h06min.	13h16min.
CEMIB	9h07min.	13h17min.
LABEURB	9h08min.	13h18min.
EDITORA	9h09min.	13h19min.
FEAGRI	9h11min.	13h21min.
CEBMEG	9h13min.	13h23min.
EMBRAPA e CEPAGRI	9h14min.	13h24min.
CCUEC, CENAPAD, CGI e GGAD	9h15min.	13h25min.
NEPO, NEPP e MUSEU EXPLORATÓRIO	9h17min.	13h27min.
ADUNICAMP e IC	9h18min.	13h28min.
FEC e RTV	9h19min.	13h29min.
E.E. SÉRGIO PORTO	9h22min.	13h32min.
HC	9h25min.	13h35min.
DGRH, SST, DAB, LABJOR, NIED, CEPETRO e PRPG	9h28min.	13h38min.



MALOTES - HORÁRIOS Os responsáveis pelos malotes deverão estar nos locais de entrega pelo menos com 10 minutos de antecedência. :: SEGUNDO MALOTE - SAIDAS: 9h:40min. 13h50min.		
UNIDADES	HORÁRIO - MANHÃ	HORÁRIO - TARDE
NEPAM	9h41min.	13h51min.
CCS	9h42min.	13h52min.
IG	9h43min.	13h53min.
FEEC e FEQ	9h44min.	13h54min.
FEM	9h45min.	13h55min.
FEA, NEPA e IQ	9h46min.	13h56min.
CMU, SAE, DLEIE BASICO, STU e CIPA	9h47min.	13h57min.
IF e FE	9h48min.	13h58min.
IE	9h50min.	14h00min.
IMECC	9h51min.	14h01min.
IFCH	9h53min.	14h03min.
CEL	9h54min.	14h04min.
CONVEST, FUNCAMP e CASA DO LAGO	9h55min.	14h05min.
IA e IEL	9h57min.	14h07min.
CDC	9h58min.	14h08min.
FEF e CEI	9h59min.	14h09min.
BC, CDMC e POSTO CORI	10h00min.	14h10min.
SIARQ e DCE	10h02min.	14h12min.
DAC, SAPPE e CLE	10h05min.	14h15min.
IB	10h08min.	14h18min.
NIPE	10h15min.	14h25min.

ANEXO D –Planilhas de Custos Operacionais relacionados com os custos de quilometragem para os veículos Kombi e Motocicleta – Atualizada em Maio de 2014

PLANILHA DE CUSTO OPERACIONAL
Kombi 1.6 - Gasolina (que roda em média 1.000 Km/mês)

COMPONENTES	EM UNIDADES	VALORES	INDICAÇÃO DE CALCULOS	R\$/KM	%	
1	COMBUSTÍVEL	PREÇO R\$	2,79	PREÇO/CONSUMO	0,399	28,035
		CONSUMO KM/L	7			
2	LUBRIFICANTES	ÓLEO DO MOTOR LITROS	3,5	(LITROS X R\$/L) / Km	0,011	0,739
		PERIODICIDADE DA TROCA KM	5.000			
		PREÇO POR LITRO R\$/L	15,00			
3	LAVAGENS E GRAXAS	VALOR ESTIMADO MENSAL R\$	60	R\$ / Km	0,060	4,220
		QUILOMETRAGEM MENSAL KM	1.000			
4	PNEUS Dianteiro - 02 Traseiro - 02	TIPO 195/70/14 R\$	315,00	TOTAL R\$ / DURAÇÃO Km	0,105	7,386
		DURAÇÃO MÉDIA KM	12.000			
		VALOR TOTAL R\$	1.260,00			
5	DEPRECIACÃO (LINEAR)	II= VR VEICULO NOVO R\$	61.990,00	II - VL / n x km ANUAL	0,465	32,702
		VL=VR MÉDIO DO VEÍCULO PARA LEILÃO=10% R\$	6.199,00			
		II - VL = VALOR A DEPRECIAR R\$	55.791,00			
		N=PRAZOS ANOS	10			
6	MANUTENÇÃO E REPAROS	CUSTO MÉDIO ANUAL R\$	132,00	R\$/ Km ANUAL	0,011	0,774
		QUILOMETRAGEM ANUAL KM	12.000			
7	LICENCIAMEN-TO E SEGUROS	SEGURO OBRIGATÓRIO ANUAL R\$	105,65	TOTAL DE SEGUROS / Km ANUAL	0,146	10,251
		SEGURO TOTAL ANUAL R\$	1.643,27			
		QUILOMETRAGEM ANUAL KM	12.000			
SUBTOTAL					1,185	
8	DESP. INDIRETAS	20% SOBRE O SUBTOTAL		0,20 x SUBTOTALS	0,237	16,667
CUSTO POR Km		ATUALIZADO EM: MAIO/2014			1,422	100

Nota:

- 1 - Para o cálculo do combustível, foi feito a média do valor praticado nos postos região de Campinas.
- 2 - Para a estimativa do item 3, considerou-se uma ducha após as viagens e uma lavagem geral por semana.
- 3 - Não está incluído a diária do motorista, pelo fato existirem valores diferentes entre as cidades.
- 4 - Valor do transporte comercial (Táxi): Asfalto: 0,70; Estrada de terra: 0,88 (por km rodado).
- 5 - Valor de transporte comercial (Ônibus): Asfalto: 1,70; Estrada de terra: 2,50 (por km rodado).
- 6 - Valor dos combustíveis nos postos

PLANILHA DE CUSTO OPERACIONAL
Motocicleta - Gasolina (que roda em média 1250 km/mês)

COMPONENTES		EM UNIDADES		VALORES	INDICAÇÃO DE CALCULOS	R\$/KM	%
1	COMBUSTÍVEL	PREÇO	R\$	2,79	PREÇO/CONSUMO	0,093	23,872
		CONSUMO	KM/L	30			
2	LUBRIFICANTES	ÓLEO DO MOTOR	LITROS	1	(LITROS X R\$/L) / Km	0,010	2,567
		PERIODICIDADE DA TROCA	KM	1.500			
		PREÇO POR LITRO	R\$/L	15,00			
3	LAVAGENS E GRAXAS	VALOR ESTIMADO MENSAL	R\$	20,00	R\$ / Km	0,016	4,107
		QUILOMETRAGEM MENSAL	KM	1.250			
4	PNEUS Dianteiro - 01 Traseiro - 01	TIPO 90/90-18	R\$	269,00	TOTAL R\$ / DURAÇÃO Km	0,161	41,430
		DURAÇÃO MÉDIA	KM	10.000			
		VALOR TOTAL	R\$	1.614,00			
5	DEPRECIÇÃO (LINEAR)	II= VR VEICULO NOVO	R\$	6.200,00	II - VL / n x km ANUAL	0,037	9,549
		VL=VR MÉDIO DO VEÍCULO PARA LEILÃO=10%	R\$	620,00			
		II - VL = VALOR A DEPRECIAR	R\$	5.580,00			
		N=PRAZOS	ANOS	10			
6	MANUTENÇÃO E REPAROS	CUSTO MÉDIO ANUAL	R\$	105,00	R\$/ Km ANUAL	0,007	1,872
		QUILOMETRAGEM ANUAL	KM	14.400			
7	LICENCIAMENTO E SEGUROS	SEGURO OBRIGATÓRIO ANUAL	R\$	105,65	TOTAL DE SEGURO / Km ANUAL	0,007	1,808
		SEGURO TOTAL ANUAL	R\$	-			
		QUILOMETRAGEM ANUAL	KM	15.000			
SUBTOTAL						0,325	
8	DESP. INDIRETAS	20% SOBRE O SUBTOTAL			0,20 x SUBTOTAIS	0,065	16,667
CUSTO POR Km		ATUALIZADO EM: JUNHO/2003				0,390	100

Nota:

- 1 - Para o cálculo do combustível, foi feito a média entre o valor que chega na DTR e o valor praticado nos postos.
- 2 - Para a estimativa do item 3, considerou-se uma lavagem geral por semana.
- 6 - Valor dos combustíveis nos postos

ANEXO E – Estrutura do Programa “Gera_Distritos” em linguagem Pascal

(* Objetivo: gerar distritos buscando proximidade dos pontos e minimização das distâncias *)

(* Usa modelo heurístico de *Districting*, vide M. Hojati, *Optimal Political Districting*,
Computers & Operations Research, 1996 *)

(* Antonio Galvão Novaes, Orlando Fontes Lima Jr, Eduardo Paiva - Abril 2014 *)

Uses WinCrt;

Const M = 5; (* número de distritos *)

N = 50; (* número total de pontos atendidos *)

Type

Ponto = Record

NPont : Integer; (* número do ponto *)

x,y : Real; (* coordenadas do ponto *)

wc,we,wm : Real; (* wc = peso coletado; we = peso entregue no ponto;
wm = maior valor entre we e wc; (kg) *)

T : Real; (* ângulo do ponto *)

End;

ARRMN = Array[1..M,1..N] of LongInt;

ARRNN = Array[1..N,1..N] of LongInt;

ARRM = Array[1..M] of LongInt;

ARRN = Array[1..N] of LongInt;

ARRN1 = Array[1..N+1] of LongInt;

Var

ArqP : File of Ponto;

P,Q : Array[1..N] of Ponto;

I,J,NN,KK,NPT : Integer;

Kz,Kb,Ka : ARRNN; (* vetor indicando o distrito alocado a cada ponto *)

XC,YC : Array[1..M] of Real; (* coordenadas dos centróides de cada distrito *)

A : ARRM; (* matriz A, Problema do Transporte *)

B : ARRNN; (* matriz B, Problema do Transporte *)

C,X : ARRMN; (* matrizes C e X, Problema do Transporte *)

K0,Cb,Ca : LongInt;

INF,NVezes,SInf : LongInt;

```

S,SS : LongInt;
OK1,OK2 : Boolean;
Iter : Integer;
kD,KOR,V,TPar : Real;
Tweight: LongInt;
x0,y0 : LongInt; (* coordenadas do depósito *)
Route : ARRN; (* vetor representando uma sequência de pontos de entrega - 2 OPT *)
NOME : String[30]; (* Nome da corrida *)

```

```

Procedure Sort_Distritos;

```

```

Var I,J,Posicao : Integer;

```

```

Temporario : Ponto;

```

```

Ok : Boolean;

```

```

Begin

```

```

(* re-ordena os pontos segundo o ângulo (tangente) T formado pelas coordenada
referenciadas à origem (depósito) *)

```

```

Ok:=False;

```

```

While Not Ok do

```

```

Begin

```

```

For I:=1 to N-1 do

```

```

Begin

```

```

Ok:=True;

```

```

(* Determina a posição do I-ésimo componente em A *)

```

```

Posicao:=I;

```

```

For J:=I+1 to N do

```

```

Begin

```

```

If (P[J].T < P[Posicao].T) then

```

```

Posicao:=J;

```

```

If I <> Posicao then

```

```

Begin (* troca P[I] com P[Posicao] *)

```

```

Temporario:=P[I];

```

```

P[I]:=P[Posicao];

```

```

P[Posicao]:=Temporario;

```

```

Ok:=False;

```

```

    End;
  End;
End;
End;
End;
End;

```

```

Procedure Aloca_Pontos_Aos_Distritos(var Kb : ARRN);

```

```

(* Efetua alocação preliminar dos N pontos aos M distritos *)

```

```

Var

```

```

  I,L,D,J    : Integer;
  SS,SD,ACUM : LongInt;
  Ok        : Boolean;

```

```

Begin

```

```

  SS:=0;

```

```

  For I:=1 to N do

```

```

    Begin

```

```

      SS:=SS+Trunc(10*P[I].wm+0.5);

```

```

      If (P[I].x = x0) then P[I].T:=1000000 else

```

```

      P[I].T:=(P[I].y-y0)/(P[I].x-x0); (* tangente do ângulo formado pelo ponto e a origem *)

```

```

    End;

```

```

  SD:=Trunc(SS/M+0.5);

```

```

  SS:=0;ACUM:=SD;

```

```

  Sort_Distritos;

```

```

  J:=1;

```

```

  For I:=1 to N do    (* aloca os pontos aos distritos formados radialmente em torno do depósito *)

```

```

    Begin

```

```

      SS:=SS+Trunc(10*P[I].wm+0.5);  (* aloca pontos segundo maior valor entre we e wc *)

```

```

      If (SS <= ACUM) then Kb[I]:=J Else

```

```

    Begin

```

```

      ACUM:=ACUM+SD;

```

```

      J:=J+1;

```

```

      Kb[I]:=J;

```

```
End;  
End;  
End;
```

```
Procedure Ve_Pontos;
```

```
(* Mostra na tela as coordenadas e os pesos de cada ponto do roteiro *)
```

```
Var I,M : Integer;
```

```
Begin
```

```
  M:=0;
```

```
  For I:=1 to NN do
```

```
    Begin
```

```
      IF (M = 0) then
```

```
        Begin
```

```
          ClrScr;
```

```
          Write(' :15,'DADOS GERAIS DE ENTRADA');Writeln;
```

```
          Writeln;Writeln(' Ponto    x    y    peso coleta    peso entrega');Writeln;
```

```
        End;
```

```
        M:=M+1;
```

```
        With P[I] do
```

```
          Begin
```

```
            Writeln(' :1,NPont:3,x:10:0,y:10:0,wc:10:1,we:14:1);
```

```
          End;
```

```
        If (M = 15) then
```

```
          Begin
```

```
            M:=0;Readln;
```

```
          End;
```

```
        End;
```

```
End;
```

```
Procedure Le_Pontos;
```

```
Var
```

```

I,J   : Integer;
(* Lê os dados dos N pontos a partir do arquivo 'POINTS.DAT' *)
Begin
  Assign(ArqP,'POINTS.DAT');
  ReSet(ArqP);
  I:=0;
  While not eof(ArqP) do
    Begin
      I:=I+1;
      Read(ArqP,P[I]);
    End;
    NN:=I;

  Ve_Pontos; (* Mostra na tela as coordenadas e os pesos de cada ponto do roteiro *)

  For I:=1 to NN do
    Begin
      Q[I]:=P[I];
      With P[I] do
        (* Begin
          wc:=1;we:=1;wm:=1;
        End; *)
      End;

  Aloca_Pontos_aos_Distritos(kb); (* alocação preliminar
  dos pontos aos distritos *)

End;

Procedure TRANSPORT(
  M,N   : Integer;
  INF   : LongInt;
  Var A : ARRM;
  Var B : ARRN;

```

```

Var C,X : ARRNM;
Var K0 : Longint);
(* Programa em Pascal para o Transportation Problem, extraido de Syslo, Deo, Kowalik,
"Discrete Optimization Algorithms", Capítulo 1.3, com adaptações *)
Var I,J : Integer;
    SF,R,RA : LongInt;
    LAB,LAB1,LAB2 : Boolean;
    U,W,EPS : ARRNM;
    V,K,DEL : ARRNM;
Begin (* Initialization of Dual Variables U and V *)
For I:=1 to M do U[I]:=0;
For J:=1 to N do
Begin
R:=INF;
For I:=1 to M do
Begin
X[I,J]:=0;
SF:=C[I,J];
If SF < R then R:=SF;
End;
V[J]:=R;
End;
LAB1:=False;
Repeat (* Until LAB1 is true. LAB1 is true if the optimal solution *)
(* has been found, and false otherwise *)
(* Initialization of row and column labels *)
For I:=1 to M do
Begin
W[I]:=0;
EPS[I]:=A[I];
End;
For J:=1 to N do
Begin
K[J]:=0;

```

```

DEL[J]:=0;
End;
Repeat (* Until LAB *)
  (* Process of labeling rows and columns *)
  LAB:=True; (* LAB becomes false when a column is labeled *)
  LAB2:=True; (* LAB2 is false if breakthrough *)
  I:=0; (* appears, and True otherwise *)
  Repeat (* Until I = M or LAB2 = false *)
    I:=I+1;
    SF:=EPS[I];EPS[I]:=-SF;
    If SF > 0 then
      Begin (* Row I becomes labeled *)
        RA:=U[I];
        J:=0;
        Repeat (* Until J = N or LAB2 = False *)
          J:=J+1;
          If (DEL[J] = 0) and (V[J]-RA = C[I,J]) Then
            Begin (* Element I,J is admissible *)
              K[J]:=I; (* Column J can be labeled *)
              DEL[J]:=SF;
              LAB:=False;
              If B[J] > 0 then
                Begin (* Breakthrough *)
                  LAB:=True; LAB2:=False;
                  SF:=ABS(DEL[J]);
                  R:=B[J];
                  If R < SF then SF:=R;
                  B[J]:=R-SF;
                  Repeat
                    I:=K[J];
                    X[I,J]:=X[I,J]+SF;
                    J:=W[I];
                    If J <> 0 then
                      X[I,J]:=X[I,J]-SF;

```

```

Until J = 0;
A[I]:=A[I]-SF;
J:=0;
Repeat
  J:=J+1;
  LAB1:=B[J] <= 0;
Until (J = N) or not LAB1;
If LAB1 then
  Begin (* Optimal solution has been found *)
    SF:=0;
    For I:=1 to M do
      For J:=1 to N do
        Begin
          R:=X[I,J];
          If R > 0 then SF:=SF+R*C[I,J];
        End;
      K0:=SF;
    End; (* LAB1 *)
  End; (* Breakthrough *)
  End; (* Labeling column J *)
Until (J = N) or not LAB2
End; (* SF > 0 *)
Until (I = M) or Not LAB2;
If not LAB then
  Begin (* Labeling rows from columns *)
    LAB:=True;
    For J:=1 to N do
      Begin
        SF:=DEL[J];
        IF SF > 0 then
          Begin
            For I:=1 to M do
              If EPS[I] = 0 then
                Begin

```

```

R:=X[I,J];
If R > 0 then
  Begin
    W[I]:=J;
    If R <= SF then EPS[I]:=R
    Else EPS[I]:=SF;
    LAB:=False;
  End;
  End; (* I, EPS[I] = 0 *)
  DEL[J]:=-SF;
  End; (* SF > 0 *)
  End; (* J *)
  End; (* Not LAB *)
Until LAB; (* End of Labeling *)
If LAB2 then
  Begin (* Modifying dual variables *)
    R:=Inf;
    For I:=1 to M do
      If EPS[I] <> 0 then
        Begin
          RA:=U[I];
          For J:=1 to N do
            If DEL[J] = 0 then
              Begin
                SF:=C[I,J]+RA-V[J];
                If R > SF then R:=SF;
              END;
            End; (* I, EPS[I] <> 0 *)
          For I:=1 to M do
            If EPS[I] = 0 then U[I]:=U[I]+R;
          For J:=1 to N do
            If DEL[J] = 0 then V[J]:=V[J]+R;
          END; (* LAB2 *)
Until LAB1;

```

```

End; (* End TRANSPORT *)

Procedure District_Centre(J : Integer;
    Var XC,YC : Real);
    Var I,II : Integer;
    (* Determina as coordenadas do ponto central do distrito J *)
Begin
    XC:=0.0;YC:=0.0;II:=0;
    For I:=1 to N do
        Begin
            If (Kb[I] = J) then
                Begin
                    XC:=XC+P[I].x;
                    YC:=YC+P[I].y;
                    II:=II+1;
                End;
            End;
        XC:=XC/II;YC:=YC/II;
    End;

Procedure Matrix_B;
    Var I : Integer;
        F : Real;
        KK : LongInt;
    Begin
        S:=0;
        For I:=1 to N do
            Begin
                F:=10*P[I].wm;
                KK:=trunc(F+0.5);
                B[I]:=KK;
                S:=S+B[I];
            End;
        Cb:=S;

```

End;

Procedure Matrix_A;

Var J : Integer;

KK : LongInt;

Begin

For J:=1 to M do

Begin

KK:=Trunc(S/4+0.5);

A[J]:=KK;

End;

End;

Procedure Matrix_C;

Var I,J : Integer;

D : Real;

S : LongInt;

Begin

SS:=0;

For J:=1 to M do

Begin

For I:=1 to N do

Begin

D:=(Sqr((XC[J]-P[I].x))+Sqr((YC[J]-P[I].y)));

S:=Trunc(D+0.5);

C[J,I]:=S;

End;

End;

End;

Procedure Distancia(I,J : Integer;

XX,YY : ARRNI;

var D : LongInt);

Var DD : Real;

(* Determina a distância Euclidiana entre os pontos I e J, multiplicando-a pelo "route factor" kD *)

Begin

DD:=Sqr(XX[I]-XX[J])+Sqr(YY[I]-YY[J]);

DD:=kD*Sqr(DD);

D:=Trunc(DD+0.5);

End;

Procedure TWOOPT(NPT : Integer;

VAR XX,YY : ARR1;

VAR Route1 : ARR1;

VAR TWEIGHT : LongInt);

Var I,J,Ahead,I1,I2,Index,J1,J2,Last,Next,Limit,S1,S2,T1,T2 : Integer;

MAX,MAX1 : LongInt;

PTR : ARR1;

D1,D2,D3,D4 : LongInt;

(* Programa em Pascal para o Traveling Salesman Problem, extraído de Syslo, Deo, Kowalik, "Discrete Optimization Algorithms", Capítulo 3.8, algoritmo 2-opt, com adaptações *)

Begin

For I:=1 to NPT-1 do PTR[Route1[I]]:=Route1[I+1];

PTR[Route1[NPT]]:=Route1[1];

TWEIGHT:=0;

For I:=1 to NPT do

Begin

Distancia(Route1[I],PTR[Route1[I]],XX,YY,D1);

TWEIGHT:=TWEIGHT+D1;

End;

Repeat

MAX:=0;

I1:=1;

For I:=1 to NPT-2 do

Begin

If (I = 1) then Limit:= NPT-1

Else Limit:=NPT;

```

I2:=PTR[I1];
J1:=PTR[I2];
For J:=I+2 to LIMIT do
Begin
  J2:=PTR[J1];
  Distancia(I1,I2,XX,YY,D1);
  Distancia(J1,J2,XX,YY,D2);
  Distancia(I1,J1,XX,YY,D3);
  Distancia(I2,J2,XX,YY,D4);
  MAX1:=D1+D2-(D3+D4);
  If (MAX1 > MAX) then
  Begin (* Better pair of edges has been found *)
    S1:=I1;
    S2:=I2;
    T1:=J1;
    T2:=J2;
    MAX:=MAX1;
  End;
  J1:=J2;
End;
I1:=I2;
End;
If (MAX > 0) then (* Swap pair of edges *)
Begin
  PTR[S1]:=T1;
  NEXT:=S2;
  LAST:=T2;
  Repeat (* Reverse appropriate links *)
    Ahead:=PTR[Next];
    PTR[Next]:=Last;
    Last:=Next;
    Next:=Ahead;
  Until Next = T2;
  Tweight:=Tweight-MAX; (* Route is now shorter *)

```

```

    End;
Until MAX = 0;
Index:=1;
For I:=1 to NPT do
Begin
    Route1[I]:=Index;
    Index:=PTR[Index];
End; (* TWOOPT *)
End;

```

```

Procedure Estrutura_Otima_Distritos;

```

```

(* Determina a sequência ótima de entregas em cada roteiro e organiza a
apresentação dos resultados *)

```

```

Var I,J,JJ,K,LL,II : Integer;
    L : ARRM;
    A : Array[1..M] of Real;
    Ndist,Delta,JJJ : Integer;
    ax,ay : Real;
    Route1 : ARRN1;
    xx,yy : ARRN1;
    PT1 : ARRN1;
    Depot : String[5];
    DepotI,IStart : Integer;
    Ok : Boolean;
    RouteA,RouteB : ARRN;
    Trota,z : Real;
    I1,I2 : Integer;
    Seq : Array[1..N] of Integer;
    Peso : Array[0..N] of Real;
    PesoMax : Real;

```

```

Begin
    P:=Q;
    For J:=1 to M do
    Begin

```

```

ClrScr;
Writeln(' :12,NOME);Writeln;
Writeln('CARACTERÍSTICAS DOS DISTRITOS OTIMIZADOS');Writeln;
A[J]:=0;Delta:=10;
For I:=1 to N do Route[I]:=0;Ndist:=0;
For I:=1 to N do
Begin
  If (Kb[I] = J) then
  Begin
    A[J]:=A[J]+P[I].wm;
    Ndist:=Ndist+1;
    Route[Ndist]:=I;
    ax:=P[I].x;ay:=P[I].y;
    xx[I]:=Trunc(ax+0.5);yy[I]:=Trunc(ay+0.5);
  End;
End;
Writeln('DISTRITO',J:3);Writeln;
Writeln('Total de pontos atendidos no distrito:',Ndist:4);
Write('Pontos que compõem o distrito antes da otimização do roteiro: ');Writeln;
Writeln;Delta:=20;
For I:=1 to Ndist do
Begin
  II:=Route[I];II:=P[II].NPont;
  Write(II:3);
  (* Write(Route[I]:3); *)
  PT1[I]:=Route[I];
  xx[I]:=Trunc(P[Route[I]].x+0.5);yy[I]:=Trunc(P[Route[I]].y+0.5);
  If (I >= Delta) then
  Begin
    Writeln;
    Delta:=Delta+20;
  End;
End;
PT1[Ndist+1]:=Ndist+1;DepotI:=Ndist+1;

```

```

xx[Ndist+1]:=x0;yy[Ndist+1]:=y0;
For I:=1 to Ndist+1 do Route1[I]:=I;
Writeln;Writeln;Writeln('Sequência de pontos após otimização do roteiro (Algoritmo 2-
opt)');Writeln;

```

```

TWOOPT(Ndist+1,XX,YY,Route1,Tweight);

```

```

(* Re-ordena o roteiro começando com o depósito *)

```

```

OK:=False;

```

```

While not OK do

```

```

Begin

```

```

For I:=1 to Ndist+1 do

```

```

Begin

```

```

If (Route1[I] = DepotI) then

```

```

Begin

```

```

IStart:=I;

```

```

OK:=True;

```

```

End;

```

```

End;

```

```

End;

```

```

JJ:=0;

```

```

For I:=IStart+1 to Ndist+1 do

```

```

Begin

```

```

JJ:=JJ+1;

```

```

RouteA[JJ]:=Route1[I];

```

```

End;

```

```

For I:=1 to IStart-1 do

```

```

Begin

```

```

JJ:=JJ+1;

```

```

RouteA[JJ]:=Route1[I];

```

```

End;

```

```

Writeln;Delta:=20;

```

```

Delta:=20;Depot:='Depot';

```

```

Write(' ',Depot,' ');

```

```

For I:=1 to Ndist do
Begin
  RouteB[I]:=PT1[RouteA[I]];
  II:=RouteB[I];
  II:=P[II].NPont;
  Write(II:3);
  Seq[I]:=II;
  If (I > Delta) then
  Begin
    Writeln;
    Delta:=Delta+20;
  End;
End;
Write(' ',Depot);
Writeln;Writeln;Write(' Extensão otimizada do roteiro no distrito',J:3,' ':',Tweight:7,' metros');
(* Cálculo do tempo de percurso no roteiro *)
TRota:=Ndist*Tpar;
For I:=1 to Ndist-1 do
Begin
  I1:=RouteB[I];
  I2:=RouteB[I+1];
  z:=Sqrt(sqr(P[I1].x-P[I2].x)+sqr(P[I1].y-P[I2].y));
  z:=z/1000; (* passa de metros para km *)
  z:=z/V; (* passa de km para hora *)
  z:=60*z; (* passa de hora para minuto *)
  TRota:=TRota+z;
End;

(* Calcula o maior peso no veículo ao longo do roteiro *)
Peso[0]:=0.0;
For I:=1 to NDist do
Begin
  JJJ:=Seq[I];
  Peso[0]:=Peso[0]+P[JJJ].we;

```

```

End;
PesoMax:=Peso[0];
For I:=1 to NDist do
Begin
  JJJ:=Seq[I];
  Peso[I]:=Peso[I-1]-P[JJJ].we+P[JJJ].wc;
  If (PesoMax < Peso[I]) then PesoMax:=Peso[I];
End;

Writeln;Write(' Peso máximo ao longo do roteiro:', ' ':11,PesoMax:10:1,' kg');

Writeln;Write(' Tempo médio de percurso no roteiro',J:3,' :      ',TRota:7:1,' minutos');
Readln;
End;
End;

Procedure Dados_Especificos;
Begin
  ClrScr;
  Write(' :2,'TROCAR SE NECESSÁRIO ');
  Writeln('OS DADOS ESPECÍFICOS DESTA CORRIDA');Writeln;Writeln;
  Writeln('Nome da corrida (até 30 caracteres)');
  Write('DEFAULT: ');NOME:='KOMBI';Writeln(NOME);
  Writeln;
  Writeln('Velocidade média (km/hora ');
  Write('DEFAULT: ');V:=25.0;Writeln(v:6:1);
  Writeln;
  Writeln('Fator K ');
  Write('DEFAULT: ');kD:=1.78;Writeln(kD:6:2);
  Writeln;
  Writeln('Coordenadas x e y do depósito');
  Write('DEFAULT: ');x0:=938;y0:=1128;Writeln(x0:8,y0:8);
  Writeln;
  Writeln('Tempo médio de parada em cada ponto atendido (min)');

```

```

        Write('DEFAULT: ');TPar:=1.0;Writeln(TPar:6:1);
        Writeln;
        Readln;
End;

Begin
Randomize;
Le_Pontos;
Dados_Especificos;
ClrScr;
ITER:=0;
INF:=10000000;
Ok1:=False;
Writeln('OTIMIZAÇÃO DOS ROTEIROS');
Writeln('Número de distritos: ',M:3);Writeln;
Repeat
    ITER:=ITER+1;
    Writeln('Iteração: ',ITER:5);
    For J:=1 to M do
        Begin
            District_Centre(J,XC[J],YC[J]);
        End;
    Matrix_B;
    Matrix_A;
    Matrix_C;
    Transport(M,N,INF,A,B,C,X,k0);
    k0R:=k0/1000000;
    Write('Função objetivo ',k0R:10:1);
    For J:=1 to N do
        Begin
            SInf:=-INF;KK:=0;
            For I:=1 to M do
                Begin
                    If X[I,J] <> 0 then

```

```

Begin
  If X[I,J] > SInf then
    Begin
      SInf:=X[I,J];
      KK:=I;
    End;
  End;
End;
Ka[J]:=KK;
End;
Ok2:=True;
For J:=1 to N do
  Begin
    (* Write(J:5,kb[J]:10,ka[J]:10); *)
    If (Kb[J] <> ka[J]) then
      Begin
        Ok2:=False;
      End;
    End;
    Kb:=Ka;
    If Ok2 then Ok1:=True;
    Writeln;Write('Convergiu? ',Ok1);Writeln;Readln;
  Until Ok1;
  Estrutura_Otima_Distritos;
  Readln;
End.

```