



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE MESTRADO EM LOGÍSTICA E PESQUISA OPERACIONAL**

**JOSÉ UIRTON CAMPELO JÚNIOR**

**PROPOSTA DE OTIMIZAÇÃO DA ROTEIRIZAÇÃO DOS DISTRITOS DOS  
CARTEIROS: UM ESTUDO DE CASO NO CENTRO DE ENTREGA DE  
ENCOMENDAS DE FORTALEZA.**

**Fortaleza – CE  
2010**

**JOSÉ UIRTON CAMPELO JÚNIOR**

**PROPOSTA DE OTIMIZAÇÃO DA ROTEIRIZAÇÃO DOS DISTRITOS DOS  
CARTEIROS: UM ESTUDO DE CASO NO CENTRO DE ENTREGA DE  
ENCOMENDAS DE FORTALEZA.**

Dissertação submetida à Coordenação do  
Curso de Mestrado em Logística e  
Pesquisa Operacional, da Universidade  
Federal do Ceará, área de concentração  
em Gestão Logística, como requisito  
parcial para aquisição do título de Mestre  
em Logística e Pesquisa Operacional

Orientador: Prof. Dr. José Lassance de  
Castro Silva

Fortaleza – CE  
2010

C196p Campelo Júnior, José Uirton  
Proposta de otimização da roteirização dos distritos dos carteiros: um estudo de caso no centro de entrega de encomendas de Fortaleza / José Uirton Campelo Júnior, 2010.  
97 f. ; il.; enc.

Orientador: Prof. Dr. José Lassance de Castro Silva  
Concentração: Pesquisa Operacional  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Pró – Reitoria de Pesquisa e Pós - Graduação, Fortaleza, 2010

1. Pesquisa Operacional. 2. Algoritmos genéticos. I. Silva, José Lassance de Castro. (orient.) 2. Universidade Federal do Ceará – Programa de Mestrado em Logística e Pesquisa Operacional. III. Título.

CDD 003

**PROPOSTA DE OTIMIZAÇÃO DA ROTEIRIZAÇÃO DOS DISTRITOS DOS  
CARTEIROS: UM ESTUDO DE CASO NO CENTRO DE ENTREGA DE  
ENCOMENDAS DE FORTALEZA.**

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Mestrado em Logística e Pesquisa Operacional, da Universidade Federal do Ceará, área de concentração em Gestão Logística, como requisito parcial para aquisição do título de Mestre em Logística e Pesquisa Operacional.

Aprovada em 16/09/2010.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. José Lassance de Castro Silva - Orientador  
Universidade Federal do Ceará – UFC

---

Prof. Dr. Gerardo Valdísio Rodrigues Viana – Membro Externo  
Universidade Estadual do Ceará - UECE

---

Prof. Dr. André Luís Shiguemoto – Membro Interno  
Universidade Federal do Ceará - UFC

À Deus

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, a Deus, pois é o meu Pastor e Nele me fortaleço, e sei que, por isso, nada me faltará.

À Universidade Federal do Ceará, pela oportunidade de realizar o curso de mestrado em Logística e Pesquisa Operacional.

Ao Professor Lassance Castro, pela amizade e compreensão, e que, como meu orientador, não se absteve de dividir seu conhecimento de modo a me clarear os caminhos da Pesquisa Operacional.

Ao meu pai, José Uirton Campelo (in memorian), que dentro do seu pouco estudo certamente não entendia a importância dos livros na minha vida, mas sempre apoiou minhas opções.

À minha mãe, Maria Adamir Freire Campelo, cujo amor e dedicação se refletiram ao longo da minha vida.

Aos meus irmãos, Adailton, Adailma, Aglailma e Adairly, que sempre estiveram ao meu lado, mesmo quando não pude retribuir.

Aos meus amigos, cunhados, sogros e familiares que compreenderam minha ausência.

Ao meu cunhado Auricélio Prata, cuja influência foi decisiva para a escolha do mestrado, e que, ao longo de todo o curso, foi esteio para minhas dúvidas.

À minha esposa, Muse Santiago, que suportou os períodos de ausência e o peso do meu estresse, não sem arranhões, porém com muito amor, dedicação e confiança na minha capacidade.

Por fim, porém de igual importância, aos Correios, que me permitiram conciliar o mestrado e as minhas obrigações de funcionário; e aos meus colegas de trabalho que de alguma forma me ajudaram nessa conquista.

De tanto ver triunfar as nulidades, de tanto ver prosperar a desonra, de tanto ver crescer a injustiça, de tanto ver agigantarem-se os poderes nas mãos dos maus, o homem chega a desanimar da virtude, a rir-se da honra, a ter vergonha de ser honesto.

Ruy Barbosa.

O que me preocupa não é o grito dos maus. É o silêncio dos bons.

Martin Luther King.

## RESUMO

O Problema de Roteamento de Veículos (PRV) implica em determinar um conjunto de rotas que deverão ser percorridas, observando o menor custo de transporte por um número determinado de veículos. Cada rota deve iniciar e terminar no depósito, como também cada ponto tem que ser visitado por um único veículo e uma única vez. Muitas versões do problema são encontradas na literatura, em função das várias restrições possíveis como capacidade do veículo e janela de tempo. A Empresa de Correios e Telégrafos, embora seja uma das maiores empresas do mundo no ramo de entrega de encomendas, cartas, etc., ainda não possui um sistema computacional eficiente que realize esta funcionalidade, isto é, um sistema capaz de propor rotas diárias para a distribuição. Em seu domínio, ela possui um sistema capaz de dimensionar o efetivo e a quantidade e tipo de veículos a serem utilizados na distribuição de suas encomendas. Esta dissertação propõe algoritmos de roteamento a serem aplicados na distribuição de encomendas dos Correios. Os algoritmos fazem a divisão das encomendas em grupos para depois rotear. Elaborou-se 2 heurísticas para a divisão dos grupos e 3 heurísticas para a fase de roteamento. As heurísticas de divisão de grupos foram aplicadas a um problema real, a partir dos distritos do Centro de Entrega de Encomendas (CEE), na cidade de Fortaleza-CE, realizado em 2009. As heurísticas de roteamento foram aplicadas em duas rotas realizadas por carteiros do mesmo CEE, com os resultados obtidos comparados entre si e com o percurso realizado pelos carteiros. Os resultados mostraram que os algoritmos propostos suprem a deficiência de roteamento dos Correios, pois a divisão de grupos foi satisfatória e as heurísticas de roteamento apresentaram percursos menores do que os propostos pelos carteiros em 7 das 8 avaliações realizadas.

**Palavras-chaves:** Otimização Combinatória, Problema de Roteamento de Veículos, Heurísticas.

## ABSTRACT

The Vehicle Routing Problem (VRP) involves determining a set of routes to be traveled, noting the lower cost of transport for a specified number of vehicles. Each route must start and finish in the warehouse, so as each point has to be visited by one vehicle and only once. Many versions of the problem are found in the literature, depending on the various possible restrictions such as vehicle capacity and time window. The ECT (Mail and Telegraph Company) although it is one of the world's largest companies in the business of delivering parcels and letters. Does not have an efficient computer system that performs this function, i.e. a system able to offer daily routes to distribution. In her field, she has a system capable of showing the actual and the amount and type of vehicles to be used in the distribution of their orders. This work proposes routing algorithms to be applied in order distribution of the Post. The algorithms make the division of orders into groups and then route. Was drawn up two heuristics for the group division and three heuristics for the routing phase. The heuristics are split groups were applied to a real problem, from the districts of the Center for Delivery Orders (EEC), in Fortaleza-CE, conducted in 2009. The routing heuristics were applied to two routes taken by postmen in the same EEC, with the results obtained and compared with the route taken by postmen. The results showed that the proposed algorithms supply the deficiency of routing mail, because the division of groups was satisfactory and heuristics routing paths were smaller than those proposed by postmen in 7 of 8 assessments.

**Keywords:** Combinatorial Optimization, Vehicle Routing Problem, Heuristics.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados do grupo 1 .....	75
Tabela 2 – Dados do grupo 2 .....	75
Tabela 3 – Ordem e distância dos percursos no grupo 1 .....	76
Tabela 4 – Ordem e distância dos percursos no grupo 2 .....	78

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ilustração da Heurística de Inserção do Vizinho mais Próximo .....	38
Figura 2: Ilustração do Algoritmo Rotear e Dividir.....	39
Figura 3: Ilustração do Algoritmo Dividir e Rotear.....	40
Figura 4: Ilustração da Heurística de Clarke e Wright.....	41
Figura 5: Ciclo de vida básico de cartas e encomendas.....	49
Figura 6: Ilustração da aplicação da HD1. ....	58
Figura 7: Ilustração da HD2. ....	61
Figura 8: Ilustração da HR1. ....	64
Figura 9: Ilustração da HR2. ....	65
Figura 10:Paralelo entre a Heurística Vizinho mais Próximo e HR3. ....	67
Figura 11:Ilustração da HR3. ....	69
Figura 12:Ilustração da aplicação de HD1 .....	72
Figura 13:Ilustração da aplicação de HD2 .....	73
Figura 14:Ilustração do percurso do carteiro no grupo 1.....	80
Figura 15:Ilustração do percurso do carteiro no grupo 2.....	81
Figura 16:Ilustração da aplicação de HR1 ao grupo 1 .....	82
Figura 17:Ilustração da aplicação de HR1 no grupo 2.....	83
Figura 18:Ilustração da aplicação de HR2 ao grupo 1 .....	84
Figura 19:Ilustração da aplicação de HR2 no grupo 2.....	85
Figura 20:Ilustração da aplicação de HR3 ao grupo 1 .....	86
Figura 21:Ilustração da aplicação de HR3 ao grupo 2.....	87

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Requisitos e características de sistemas para roteirização de veículos ...	34
Quadro 2: Taxonomia proposta por Bodin e Golden.....	35
Quadro 3: Paralelo entre AG e a Teoria Evolutiva.....	46
Quadro 4: Linhas de transporte utilizadas pelos Correios. ....	50
Quadro 5: Quadro de pessoal dos Correios por cargo. ....	51
Quadro 6: Ilustração da tabela da HR1.....	63

## LISTA DE ABREVIATURAS

ACO – Ant Colony Optimization

AG – Algoritmos Genéticos

AS – Ant System

CDD – Centro de Distribuição Domiciliária

CEE – Centro de Entrega de Encomendas

CEP – Código de Endereçamento Postal

CT – Centro de Tratamento

CTC – Centro de Tratamento de Cartas

CTCE – Centro de Tratamento de Cartas e Encomendas

CTE – Centro de Tratamento de Encomendas

ECT – Empresa Brasileira de Correios e Telégrafos

GAP – Generalized Assignment Problem

GRASP – Greedy Randomized Adaptive Search Procedures

HD1 – Heurística Dividir 1

HD2 – Heurística Dividir 2

HR1 – Heurística Rotear 1

HR2 – Heurística Rotear 2

HR3 – Heurística Rotear 3

HR3AH – Heurística Rotear 3 Anti-Horário

HR3H – Heurística Rotear 3 Horário

LA – Linha Auxiliar

LCE – Linhas de Coleta e Entrega

LRC - Lista restrita de candidatos

LTN – Linha Tronco Nacional

LTR – Linha Tronco Regional

LTU – Linha Tronco Urbana

PCV – Problema do Caixeiro Viajante

PRV – Problema de Roteamento de Veículos

PRVJT - Problema de Roteamento de Veículo com Janela de Tempo

RPN – Rede Postal Noturna

SDE – Sistema de Distritamento de Encomendas

SIOF - Sistema Integrado de Operações

TSP – Traveling Salesman Problem

UD – Unidade de Distribuição

## SUMÁRIO

1	Introdução.....	17
1.1	Os Correios.....	17
1.2	Logística e Roteirização.....	19
1.3	Justificativa .....	22
1.4	Problema Específico .....	23
1.5	Objetivo Geral.....	23
1.6	Objetivos Específicos.....	24
1.7	Metodologia .....	24
1.8	Organização.....	26
2	Referencial Teórico.....	27
2.1	Problema de Roteirização de Veículos – PRV.....	27
2.1.1	Conceito Geral do PRV.....	29
2.1.2	Modelo Matemático do PRV .....	29
2.1.3	Modelo Matemático do PRVJT .....	31
2.1.4	Softwares Existentes .....	34
2.1.5	Taxonomia.....	35
2.2	Heurísticas .....	36
2.2.1	A Heurística e o Problema do Caixeiro Viajante .....	37
2.2.1.1	Heurística de Inserção do Vizinho mais Próximo .....	37
2.2.2	Métodos Clássicos de Resolução do PRV.....	38
2.2.2.1	Rotear e Dividir .....	38
2.2.2.2	Rotear e Dividir Máximo .....	39
2.2.2.3	Dividir e Rotear.....	40
2.2.2.4	Método de Economia de Clarke-Wright.....	40
2.2.2.5	Algoritmo de Fisher e Jakumar.....	42
2.2.3	Metaheurísticas de Resolução do PRV .....	43

2.2.3.1 Algoritmo de Têmpera Simulada (Simulated Anneling) .....	43
2.2.3.2 Busca Tabu .....	44
2.2.3.3 GRASP – Greedy Randomized Adaptive Search Procedures.....	45
2.2.3.4 Algoritmos Genéticos – AG .....	46
2.2.3.5 Algoritmos de Colônia de Formigas.....	47
3 Estudo de caso e proposições.....	49
3.1 Heurísticas Para PRV .....	54
3.1.1 Dividir e Rotear .....	55
3.1.2 Heurística Dividir.....	55
3.1.2.1 Heurística Dividir 1 (HD1) .....	56
3.1.2.2 Heurística Dividir 2 (HD2) .....	59
3.1.3 Roteamento .....	62
3.1.3.1 Heurística Rotear 1 (HR1) .....	62
3.1.3.2 Heurística Rotear 2 (HR2) .....	64
3.1.3.3 Heurística Rotear 3 (HR3) .....	65
4 Experimentos computacionais .....	70
4.1 Heurísticas de Dividir .....	70
4.1.1 Resultados de HD1 .....	71
4.1.2 Resultados de HD2.....	72
4.2 Resultados das Heurísticas Rotear.....	74
4.2.1 Percurso do carteiro.....	79
4.2.2 Resultados de HR1 .....	81
4.2.3 Resultados de HR2.....	83
4.2.4 Resultados de HR3.....	85
4.2.5 Resultados comparativos entre o percurso do carteiro, HR1, HR2 e HR3 .....	88
5 Conclusões .....	89
Referências .....	91

APÊNDICE A – Resultados da heurística HD1 .....	94
APÊNDICE B – Resultados da heurística HD2 .....	96

## **1 Introdução**

Este capítulo está dividido em sete seções. A primeira seção, Os Correios, apresenta um breve histórico da Empresa de Correios e Telégrafos; a segunda seção, Logística e Roteirização, busca relacionar a logística e o estudo da roteirização; as demais seções tratam da Justificativa, do Problema Específico, do Objetivo Geral, dos Objetivos Específicos, de uma breve abordagem na Metodologia de resolução do Problema e da organização do restante do Trabalho.

### **1.1 Os Correios**

A Empresa Brasileira de Correios e Telégrafos (ECT) tem um histórico de serviços prestados ao Brasil de longa data. Levando-se em consideração que a primeira carta escrita no Brasil data do seu descobrimento, quando Pero Vaz de Caminha anunciou ao Rei de Portugal as belas terras encontradas no novo mundo, pode-se associar a existência do serviço de correios com a chegada dos portugueses ao país, em 1500.

Desde então, a história do Brasil vem sendo escrita com a participação silenciosa dos serviços de correios. Em 1822, no dia sete de setembro, Paulo Bregaro, o primeiro carteiro da história do Brasil, entrega a D. Pedro I, às margens do Riacho Ipiranga, em São Paulo, a carta da Princesa Leopoldina, informando sobre as novas exigências feitas por Portugal com relação ao Brasil, o que culminou com a decisão de D. Pedro I de declarar a independência do país.

Entretanto, a Empresa de Correios e Telégrafos somente foi criada em 20 de março de 1969, pela Lei nº 509, como empresa pública vinculada ao Ministério das Comunicações, em resposta à necessidade de reorganização do serviço postal, em torno de um modelo mais moderno que o do Departamento de Correios e Telégrafos (DCT), criado no governo de Getúlio Vargas, vigente à época, que não apresentava

infra-estrutura compatível com as novas necessidades dos usuários, fruto do desenvolvimento dos setores produtivos do Brasil.

O surgimento da ECT corresponde a uma nova postura por parte dos poderes públicos com relação à importância das comunicações e, particularmente, dos serviços postais e telegráficos, para o desenvolvimento do País.

O ciclo de desenvolvimento ocorrido na década de 70 correspondeu a novas necessidades de uma clientela que, pouco a pouco, viu as distâncias serem encurtadas e percorridas graças ao serviço postal, que se estruturou e passou a desenvolver e oferecer produtos e serviços de acordo com a atual realidade do mercado.

Ao mesmo tempo, nesse período, a ECT consolida seu papel como importante agente da ação social do Governo, atuando no pagamento de pensões e aposentadorias, na distribuição de livros escolares, no transporte de doações em casos de calamidade, em campanhas de aleitamento materno, no treinamento de jovens carentes e em inúmeras outras situações em que se demonstra sua preocupação com o bem-estar da sociedade.

Paralelamente, a partir de 1980 se intensifica a preocupação com a ação cultural e o desenvolvimento de ações voltadas à preservação do patrimônio cultural do Brasil, sobretudo no que se refere à memória postal.

Atualmente, os Correios são a maior empresa pública empregadora do Brasil, com aproximadamente 109 mil funcionários, sendo 56.000 carteiros. Por vários anos foi escolhida a instituição de maior confiabilidade da sociedade brasileira, ficando inclusive a frente de instituições que historicamente têm grande reconhecimento e respeito por parte da sociedade, como a Igreja Católica.

No Ceará, os Correios estão presentes em todos os municípios do Estado, através de Agências de Correios próprias e terceirizadas, de Centros de Distribuição Domiciliar e de um Centro de Entrega de Encomendas, este localizado em Fortaleza.

A ECT é, portanto, uma instituição comprometida com o desenvolvimento do Brasil e com a melhoria social, e sua força de trabalho está centrada nas mãos dos carteiros, que constituem a maior parte do seu quadro de empregados.

Dessa forma, otimizar o trabalho do carteiro é promover o desenvolvimento do Brasil, através da maior empresa pública do país, cujo compromisso com a sociedade brasileira está arraigado em suas origens e evidenciado nos projetos sociais nos quais os Correios estão envolvidos.

## **1.2 Logística e Roteirização**

Segundo Christopher (2007), o gerenciamento logístico tem a missão de alcançar, com o menor custo, os níveis de qualidade desejados para os serviços prestados, através do planejamento e da coordenação. Assim, a logística precisa fazer o serviço funcionar com o menor custo possível, mas sem perda de qualidade e com a satisfação do cliente, utilizando-se, para isso, da boa aplicação da arte de planejar e coordenar.

Para o sucesso de uma cadeia de suprimentos, Chopra e Meindl (2003) definem quatro principais fatores-chaves que estabelecem seu desempenho: estoque, transporte, instalações e informação.

O conceito de estoque abrange a matéria-prima, os produtos em processamento e os produtos acabados dentro de uma cadeia de suprimentos. É um fator muito importante, pois mudanças em suas políticas podem modificar a eficiência e a responsividade da cadeia. A escolha errada no processo de armazenagem pode resultar em aumento significativo dos custos e ineficiência dos processos produtivos e de distribuição, o que, evidentemente, pode comprometer o resultado final da cadeia de suprimentos.

As instalações são os locais na rede da cadeia de suprimentos onde o estoque é armazenado, montado ou fabricado. Os principais tipos de instalações são os locais de produção e os locais de armazenamento. Entretanto, qualquer que seja a função da instalação, o desempenho da cadeia de suprimentos é influenciado pelas decisões a respeito da localização, capacidade e flexibilidade das instalações.

A tecnologia da informação está relacionada com as ferramentas usadas na obtenção, no acesso e na análise das informações, de modo a auxiliar a tomada de

decisão. Portanto, ela pode ser compreendida como o conjunto de ferramentas necessárias para tornar as informações um instrumento útil à tomada de decisão.

Chopra e Meindl (2003) definem transporte como o movimento do produto de um local a outro, chegando até o cliente a partir do início da cadeia de suprimento. Eles ressaltam, também, a importância do transporte que exerce um papel crucial em toda a cadeia de suprimentos porque os produtos raramente são fabricados e consumidos no mesmo local.

Segundo Ballou (2006), normalmente o transporte representa entre um e dois terços dos custos logísticos totais. Por isso, resalta o mesmo autor, uma das maiores preocupações do setor é aumentar a eficiência através da máxima utilização dos equipamentos e pessoal de transporte.

Zanquetto Filho et. al. (2003), fazendo referência aos dados da ABML (Associação Brasileira de Movimentação e Logística), afirmam que os custos logísticos representam 19% do faturamento de uma empresa de manufatura. Acrescenta, ainda, que há uma estimativa consensual de que o custo do transporte no Brasil represente 60% dos custos logísticos.

Em concordância, Bowersox et. al. (2006) afirmam que o transporte é primordial para o desempenho logístico e que, nos transportes, o diferencial está no significativo impacto que suas operações têm sobre o desempenho logístico. À medida que a precisão das expectativas operacionais aumenta, que os ciclos de desempenho se tornam mais consistentes e que as margens de erro são reduzidas a zero, as empresas de sucesso reconhecem que transporte barato não faz parte do cotidiano do mundo real. Por isso, o transporte precisa ser administrado de forma eficiente e eficaz, caso contrário, o desempenho dos setores de compras, produção e distribuição fracassarão no atendimento às expectativas.

No transporte, a decisão operacional mais significativa, dentro da cadeia de suprimento, está relacionada a rotas e cronogramas de entrega. Os gerentes devem definir quais clientes serão visitados por qual tipo de veículo e com que frequência receberão essas visitas.

Se analisada sob uma perspectiva administrativa, o transporte é responsável por garantir que a definição de rotas seja executada de forma eficiente para atender às necessidades básicas do cliente. É preciso, portanto, fazer rotas com custos

mínimos, mas sem perda na qualidade do serviço e com a máxima satisfação do cliente.

Os objetivos mais comuns durante o desenvolvimento de rotas e cronogramas para os veículos estão relacionados a uma combinação, entre minimizar custos por meio da redução do número de veículos utilizados, da distância total percorrida por cada veículo e do tempo total de viagem. Além disso, ainda precisa identificar e eliminar possíveis falhas nos serviços que podem resultar em atrasos no processo.

A roteirização e programação de veículos, no nosso caso, são variações do Problema básico do Caixeiro Viajante (PCV), onde são acrescentadas as restrições: 1) cada parada pode ter tanto entrega quanto coleta de objetos; 2) múltiplos veículos com capacidade limitada de peso e de volume podem ser utilizados; 3) tempo máximo de tráfego em cada rota antes de um período de repouso obrigatório; 4) janelas de tempo; 5) as coletas podem ser permitidas, em um dado roteiro, somente depois da efetivação das entregas; 6) os motoristas têm direito a breves intervalos de descanso ou parada para refeição em determinados períodos do dia.

Elaborar boas soluções para o problema da roteirização e programação de veículos é uma tarefa que pode tornar-se cada vez mais difícil de ser executada, à medida que novas restrições são impostas. Janelas de tempo, caminhões múltiplos com diferentes capacidades de peso e cubagem, o tempo máximo de permanência ao volante, velocidades máximas diferenciadas em diferentes zonas, barreiras a tráfego (lagos, desvios, montanhas) e os intervalos para o motorista são algumas das inúmeras situações práticas que acabam influenciando o projeto de roteiro.

Ballou (2006) considera que, apesar das muitas variações evidenciadas nos problemas de roteirização, é possível resumi-los a alguns modelos básicos: (1) Um ponto de origem a um ponto de destino, (2) pontos de origem e destinos múltiplos, (3) pontos de origem e destinos coincidentes, (4) pontos relacionados espacialmente e (5) pontos não-relacionados espacialmente.

### 1.3 Justificativa

A distribuição eficiente de mercadorias ou serviços é uma importante atividade logística, pois os custos de transporte, hoje em dia, representam uma parcela significativa do preço de muitos produtos. Corroborando com essa ideia, Lima (2006) afirma que os custos de transporte no Brasil representam 59,5% dos custos logísticos totais.

Os Correios, como prestadores de serviços com base no transporte de cargas, têm seu desempenho diretamente ligado aos custos de transportes, seja nos deslocamentos interestaduais, intermunicipais, ou até mesmo dentro da mesma cidade, no percurso diário de cada carteiro.

Basicamente, nos grandes centros, a distribuição domiciliar dos Correios está dividida entre Centro de Distribuição Domiciliar (CDD) e Centro de Entrega de Encomendas (CEE), que têm quantidade e localização determinadas de acordo com a demanda de cada cidade. Os CDDs, com 15 unidades em Fortaleza e um total de 432 distritos<sup>1</sup>, têm seu foco em cartas; enquanto que o CEE, com apenas um centro em Fortaleza, tem suas atividades voltadas para a distribuição de encomendas.

Considerando que o CEE Fortaleza possui aproximadamente 80 carteiros, alocados em 59 distritos, com 33 veículos e 26 motos<sup>2</sup>, acredita-se que o desenvolvimento de rotas mais eficazes resultará em significativa melhora do desempenho do trabalho de distribuição realizado pelos carteiros e, conseqüentemente, diminuição dos custos no CEE, resultando em ganho operacional e financeiro para a ECT.

Embora já exista um sistema específico para dimensionamento dos distritos (Sistema de Distritamento de Encomendas - SDE), o mesmo não apresenta a opção de roteamento dos distritos e, sua execução é realizada por equipe de funcionários qualificados e devidamente treinados, normalmente com a participação do gerente e supervisores da unidade.

---

<sup>1</sup> Fonte: SIOP dos Correios.

<sup>2</sup> Fonte: Correios.

Dessa forma, o roteamento dos distritos é feito de forma artesanal, onde a equipe do SDE, juntamente com o gerente e supervisores do CEE, usam da sua própria experiência e do conhecimento de área dos carteiros para designar as rotas.

Assim, o roteamento se dá por tentativa e erro, que se mostra impróprio e improdutivo, principalmente se for considerado que a globalização e a abertura do mercado trouxeram para o Brasil concorrentes de comprovada competência e força mundial, que se associaram a empresas locais e paulatinamente estão avançando sobre um mercado que até bem pouco tempo era restrito aos Correios.

Portanto, com o presente estudo, pretende-se promover a otimização do processo de roteamento para entrega de encomendas dos carteiros, por distrito, do Centro de Entrega de Encomendas de Fortaleza-CE, tornando a ECT mais competitiva.

#### **1.4 Problema Específico**

A técnica usada atualmente no roteamento das entregas de encomendas dos carteiros, por distrito, do Centro de Entrega de Encomendas de Fortaleza não usa técnicas acadêmicas e nem um modelo otimizado. Com base nisto, propomos desenvolver um trabalho que amenize esta tarefa usando técnicas acadêmicas e refinadas na solução do problema, independente da experiência do pessoal envolvido no CEE e dos carteiros.

#### **1.5 Objetivo Geral**

O objetivo geral deste trabalho é analisar o método de roteirização dos carteiros, por distrito, no Centro de Entrega de Encomendas de Fortaleza e propor

algumas técnicas, através da otimização combinatória, para a resolução deste problema.

## **1.6 Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Avaliar a técnica atual de roteirização aplicada no Centro de Entrega de Encomenda de Fortaleza;
- Identificar os pontos falhos desta técnica;
- Propor outras técnicas que determinem boas soluções para o problema em um tempo computacional aceitável;
- Aplicar as técnicas propostas nos problemas específicos do Centro de Entrega de Encomenda de Fortaleza e comparar com os resultados que foram praticados.

## **1.7 Metodologia**

De acordo com a tipologia de Vergara (2003), uma pesquisa pode ser classificada quanto aos fins e quanto aos meios.

Quanto aos fins, será realizada uma pesquisa descritiva que, conforme Martins (2002, p.36), “tem como objetivo descrever as características de determinada população ou fenômeno, bem como o estabelecimento de relações entre variáveis e fatos”.

Inicialmente será desenvolvida uma pesquisa bibliográfica que tem como objetivo proporcionar uma boa base teórica para alicerçar a investigação que será

desenvolvida. O assunto tem vasta literatura, pois vem sendo estudado há várias décadas e, ao longo de todo esse tempo, assumiu várias faces, que lhe conferiram um maior grau de sofisticação.

Quanto aos meios, será feito um estudo de caso. De acordo com Martins, (2002, p. 36), “o estudo de caso dedica-se a estudos intensivos do passado, presente e de interações ambientais de uma (ou algumas) unidade social: indivíduo, grupo, instituição, comunidade, etc.. São validados pelo rigor do protocolo estabelecido”.

O estudo de caso procura explicar as variáveis envolvidas em uma realidade, que possui certa complexidade, e que se tornam de difícil compreensão através de outros métodos.

O estudo da roteirização será iniciado com o estudo do problema do caixeiro viajante e aprofundado através de estudos de outros modelos desenvolvidos a partir dele, levando-se em consideração as restrições aplicáveis ao problema, como, por exemplo, restrições de tempo, de capacidade e de janela de tempo.

Porém, conforme explicam Matos e Vieira (2001, p.21 e 22), a pesquisa deve estar ligada a uma ação.

É a atividade principal da ciência que nos permite a aproximação e o entendimento da realidade, e, além disso nos fornece elementos para possibilitar nossa intervenção no real. Assim, pesquisar não representa apenas refletir e entender os fenômenos, liga-se diretamente a uma possível ação, que poderá ou não ser realizada.

Como ferramenta de ação, será proposto algoritmos para a solução do problema de roteamento de veículos, que subsidiarão o desenvolvimento de *software* para ser aplicado em uma base de dados georeferenciada.

Assim, pretende-se aplicar o resultado do estudo no Centro de Entrega de Encomenda de Fortaleza.

## 1.8 Organização

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. O Capítulo 1 – Introdução - está dividido em 8 seções, onde se abordou um breve histórico dos Correios, a relação entre a Logística e a roteirização, o problema específico, os objetivos geral e específicos, a metodologia utilizada e a organização do trabalho.

O Capítulo 2 – Referencial teórico - faz uma breve revisão bibliográfica sobre problema de roteamento de veículos (PRV), onde é mostrada sua relação com o problema do caixeiro viajante, o seu conceito geral e um modelo matemático, bem como a taxonomia e a importância do *software* para a solução do problema. Ainda no mesmo Capítulo, fez-se um rápido estudo sobre heurística - conceito e classificação - além da abordagem de algumas heurísticas utilizadas como solução para o problema de roteamento de veículos, como o método de Clarke-Wright; e de metaheurísticas de aplicação genérica na pesquisa operacional, mas também de uso na solução do PRV, como busca tabu e GRASP.

O Capítulo 3 – Estudo de caso e proposições - explora o estudo de caso propriamente dito, pois contextualiza o problema e propõe heurísticas inéditas como solução para o PRV.

O Capítulo 4 – Experimentos Computacionais – aborda a análise dos experimentos computacionais propostos no Capítulo anterior.

O Capítulo 5 – Considerações finais - expõe as conclusões sobre o trabalho, as dificuldades encontradas e as sugestões para futuros estudos relacionados com o assunto.

Por fim, encerrando o trabalho, as referências bibliográficas.

## 2 Referencial Teórico

Este Capítulo está dividido em 3 seções. A primeira seção faz um estudo sobre o PRV e está subdividida em conceito geral do PRV, modelo matemático do PRV, softwares existentes de resolução do problema e taxonomia. A segunda seção faz um estudo sobre heurística, onde é apresentado o conceito e a classificação. Além da apresentação da heurística do vizinho mais próximo como solução do PCV; da abordagem de heurísticas de grande aplicação na solução para do problema de roteamento de veículos, como o método de Clarke-Wright; e de metaheurísticas de aplicação genérica na pesquisa operacional, mas que também têm aplicação na solução do PRV, como busca tabu e GRASP.

### 2.1 Problema de Roteirização de Veículos – PRV

O primeiro problema de roteirização a ser estudado foi o do caixeiro viajante, denominado na literatura por *Traveling Salesman Problem* (TSP), que consiste em encontrar o roteiro ou seqüência de cidades a serem visitadas por um caixeiro viajante que minimize a distância total percorrida e assegure que cada cidade seja visitada exatamente uma vez.

Como ilustração, segue o modelo matemático proposto por Dantzig, Fulkerson e Johnson, conforme Goldberg e Luna (2005, p. 332), que formularam o PCV como um problema de programação 0-1 sobre um grafo  $G=(N, A)$ .

$$\text{Minimizar } z = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n c_{ij} X_{ij} \quad (2.1)$$

sujeito à :

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall j \in N \quad (2.2)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall i \in N \quad (2.3)$$

$$\sum_{i,j \in S} x_{ij} \leq |S| - 1 \quad \forall S \subset N \quad (2.4)$$

Onde a variável  $x_{ij}$  assume valor igual a 1, se o arco  $(i, j) \in A$  for escolhido para integrar a solução, e 0 em caso contrário, e  $S$  é um subgrafo de  $G$ , em que  $|S|$  representa o número de vértices desse subgrafo. Assume-se que  $x_{ii}$  não existe e que haverá  $n(n-1)$  variáveis inteiras.

Desde então, novas restrições vêm sendo incorporadas ao problema do caixeiro viajante, de modo a melhorar sua representação com os diferentes tipos de problemas que envolvem roteiros de pessoas e veículos, entre as quais: restrições de horário de atendimento (conhecidas na literatura como janelas de tempo ou janelas horárias); capacidades dos veículos; frota composta de veículos de diferentes tamanhos; duração máxima dos roteiros dos veículos (tempo ou distância); restrições de tipos de veículos que podem atender determinados clientes.

Problemas de roteirização de veículos são muitas vezes definidos como problemas de múltiplos caixeiros viajantes com restrições adicionais de capacidade, além de outras que dependem de cada aplicação. Problemas do tipo caixeiro viajante também são encontrados em outras áreas que não a logística ou operação de frotas, tais como em linhas de montagem de componentes eletrônicos, onde se busca encontrar, por exemplo, o roteiro de mínima distância para um equipamento cuja tarefa é soldar todos os componentes de uma placa eletrônica. O menor percurso total do equipamento para percorrer todos os pontos da placa está diretamente associado ao desempenho da linha (Souza, 1993).

Porém, o desenvolvimento da tecnologia da informação vem exigindo das empresas uma ampla revisão de seus modelos de distribuição, para que possam acompanhar as necessidades e as mudanças globais. Os avanços tecnológicos permitem explorar novas informações obtidas durante a operação dos veículos: um

veículo que quebrou ou está muito atrasado, uma nova requisição de um cliente chegou e deve ser atendida, entre outras.

Como ilustração, segue a definição geral do problema de roteamento de veículos e um dos modelos matemáticos propostos como solução do problema.

### 2.1.1 Conceito Geral do PRV

O Problema de Roteamento de Veículos é constituído por um conjunto de rotas que deverão ser feitas por veículos, de modo a obter o menor custo de transporte, dado pela distância e respeitando as seguintes condições:

- (a) Cada rota deve iniciar e terminar no depósito;
- (b) Todos os pontos devem ser visitados somente uma vez por um único veículo;
- (c) Em qualquer rota, a demanda total da rota tem que ser menor ou igual que a capacidade de carga do veículo.

### 2.1.2 Modelo Matemático do PRV

Conforme Goldberg e Luna (2005, p. 398), uma das formulações mais utilizadas é a de Fisher e Jakumar (1981):

$$(PRV) \text{ Minimizar } z = \sum_{i,j} \left( c_{ij} \sum_k x_{ijk} \right) \quad (2.5)$$

sujeito a :

$$\sum_k y_{ik} = 1 \quad i = 2, \dots, n \quad (2.6)$$

$$\sum_k y_{ik} = m \quad i = 1 \quad (2.7)$$

$$\sum_i q_i y_{ik} \leq Q_k \quad k = 1, \dots, m \quad (2.8)$$

$$\sum_j x_{ijk} - \sum_j x_{jik} = y_{ik} \quad i = 1, \dots, n \quad k = 1, \dots, m \quad (2.9)$$

$$\sum_{i,j \in S} x_{ijk} \leq |S| - 1 \quad \forall S \subseteq \{2, \dots, n\}, k = 1, \dots, m \quad (2.10)$$

$$y_{ik} \in \{0, 1\} \quad i = 1, \dots, n \quad k = 1, \dots, m \quad (2.11)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\} \quad i, j = 1, \dots, n \quad k = 1, \dots, m \quad (2.12)$$

Onde:

$x_{ijk} \equiv$  variável binária que assume valor 1 quando o veículo  $k$  visita o cliente  $j$  imediatamente após o cliente  $i$ , 0 em caso contrário.

$y_{ik} \equiv$  variável binária que assume valor 1 se o cliente  $i$  é visitado pelo veículo  $k$ , 0 caso contrário.

$q_i$  é a demanda do cliente  $i$ .

$Q_k$  é a capacidade do veículo  $k$

$c_{ij}$  é o custo de percorrer o trecho que vai do cliente  $i$  ao  $j$ .

As restrições (2.6) asseguram que um veículo não visite mais de uma vez um cliente. As restrições (2.7) garantem que o depósito recebe uma visita de todos os veículos. As restrições (2.8) obrigam que a capacidade dos veículos não seja ultrapassada. As restrições (2.9) garantem que os veículos não param suas rotas em um cliente. As restrições (2.10) são as tradicionais restrições de eliminação de *subtours*.

### 2.1.3 Modelo Matemático do PRVJT

Uma variação clássica do PRV é o Problema de Roteamento de Veículo com Janela de Tempo – PRVJT que, estabelecido apenas um depósito central de mercadorias, considera a capacidade do veículo e o tempo em que os consumidores podem ser atendidos (janela de tempo).

Conforme Alvarenga (2005), o PRVJT pode ser formulado da seguinte forma: Um conjunto  $V$  de veículos idênticos, representados pelo conjunto  $V = \{1, \dots, M\}$ , têm como ponto de partida um único depósito central e precisam realizar entregas em uma determinada região. Os  $N$  consumidores abrangidos nesta região, juntamente com o depósito, estão representados pelo conjunto  $C$ , que são vértices de um grafo  $G = (C, A)$ . As distâncias entre os consumidores estão representadas por  $A$ , conjunto de arestas do grafo. Para facilitar a modelagem, utiliza-se dois vértices para representar o depósito central, o vértice  $0$ , indicando o local de partida dos veículos, e o vértice  $N + 1$ , que indica o local de chegada dos veículos. As variáveis  $t_{ij}$  e  $c_{ij}$  representam o tempo e a distância necessários para ir do vértice  $i$  ao vértice  $j$ . Cada consumidor  $i$  tem uma demanda, representado por uma quantidade de encomenda  $q_i$ . Outro fator importante é que cada consumidor deverá ser atendido por um único veículo e as encomendas não poderão ser divididas por dois ou mais veículos. Definida como  $[a_i, b_i]$ , a janela de tempo indica que a partir do instante inicial  $a_i$  é permitido o início da entrega ou coleta no consumidor  $i$ . Ressalte-se que o veículo deverá esperar, caso chegue ao consumidor  $i$  antes do instante  $a_i$ , e nunca poderá chegar depois de  $b_i$ , porque viola a restrição de tempo do problema – esse tipo de

restrição é conhecida na literatura como janela de tempo rígida ou *hard time window*. Os veículos são idênticos e possuem uma capacidade máxima  $Q$  e para atender a cada consumidor  $i$  irão gastar um tempo de serviço igual a  $ts_i$ .

Alvarenga (2005, p.10 e 11) define o modelo matemático abaixo para o problema de otimização.

$$\text{Minimizar } Z = \sum_{v \in V} \sum_{i \in C} \sum_{j \in C} c_{ij} x_{ijv} \quad (2.13)$$

sujeito à :

$$\sum_{v \in V} \sum_{j \in C} x_{ijv} = 1 \quad \forall i \in C \quad (2.14)$$

$$\sum_{i=1}^n q_i \sum_{j=1}^n x_{ijv} \leq Q, \forall v \in V \quad (2.15)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{0jv} = 1 \quad \forall v \in V \quad (2.16)$$

$$\sum_{i \in C} x_{ihv} - \sum_{j \in C} x_{hjv} = 0 \quad \forall h \in C, \forall v \in V \quad (2.17)$$

$$\sum_{i \in C} x_{i(N+1)v} = 1 \quad \forall v \in V \quad (2.18)$$

$$s_{iv} + ts_i + t_{ij} - K(1 - x_{ijv}) \leq s_{jv} \quad \forall i, j \in C; \forall v \in V \quad (2.19)$$

$$a_i \leq s_{iv} \leq b_i \quad \forall i \in C; \forall v \in V \quad (2.20)$$

$$x_{ijv} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in C; \forall v \in V \quad (2.21)$$

A equação (2.13) minimiza a soma dos custos associados a cada arco  $(i, j)$  utilizado na solução, percorrido por um determinado veículo  $v$ .

A restrição da equação (2.14) garante que somente um veículo  $v$  chega a cada consumidor  $i$ .

A equação (2.15) garante que cada veículo  $v$  atenderá somente um conjunto de consumidores  $i$  de modo a não ultrapassar a sua capacidade  $Q$ .

As equações (2.16) e (2.18) garantem, respectivamente, que cada veículo  $v$  parte do depósito central e retorna ao mesmo.

A restrição da equação (2.17) garante a continuidade das rotas, ou seja, se o veículo  $v$  chega a um consumidor  $i$ , ele sairá do mesmo para o próximo consumidor.

A equação (2.19) garante a restrição de início da janela de tempo, onde o instante de chegada de um veículo  $v$  a um consumidor  $j$  ( $s_{jv}$ ) não poderá ocorrer antes do tempo de chegada no consumidor anterior  $i$  ( $s_{iv}$ ) mais o tempo de serviço no primeiro ( $ts_i$ ), mais o tempo de percurso no trecho  $(i, j)$  que é  $t_{ij}$ . É estabelecido uma velocidade constante de modo que o tempo de percurso  $t_{ij}$  é igual a distância entre  $i$  e  $j$ . A constante  $K$  sendo suficientemente grande garante que a equação seja somente uma restrição efetiva quando  $x_{ijv}$  seja igual a 1, ou seja, quando o veículo  $v$  percorre o trecho  $(i, j)$ .

A equação (2.20) garante que o instante de chegada de um veículo  $v$  em um consumidor  $i$  ocorra dentro da janela de tempo estabelecida para o consumidor em questão.

A restrição (2.21) garante a integralidade binária das variáveis do problema.

### 2.1.4 Softwares Existentes

Os principais problemas de roteamento estão voltados principalmente para o aspecto espacial do problema, deixando de lado o aspecto temporal, como é o caso do caixeiro viajante, o problema do carteiro chinês, o problema de roteirização em nós com demandas, o problema de roteirização em nós com múltiplas bases, etc.

Na prática, entretanto, a maioria dos problemas de roteamento possuem restrições de janela de tempo, como é o caso dos serviços de entrega domiciliária, distribuição de produtos nos pontos de vendas e coleta e entrega de malotes. Além disso, existem outros fatores a serem considerados, como velocidades variáveis, tempo de carga e descarga, etc. Assim, há a necessidade de se observar alguns requisitos desejáveis nos softwares genéricos de roteamento, que estão resumidos no Quadro 1, conforme Assad (1988), Ronen (1988) e Bodin (1990).

CARACTERÍSTICAS	ASSAD (1988)	RONEN (1988)	BODIN (1990)
Uma ou múltiplas bases	Sim	Sim	Sim
Diferentes tipos de veículos	Sim	-	-
Coletas e entregas – coletas de retorno (“backhauls”)	Sim	Sim	Sim
Janelas de tempo	Sim	Sim	Sim
Tempos de carga e descarga	Sim	-	-
Velocidades variáveis	Sim	-	-
Contratação de terceiros	Sim	Sim	-
Limite de peso e volume	Sim	Sim	-
Múltiplos compartimentos por veículo	-	Sim	-
Duração máxima do roteiro	Sim	Sim	Sim
Contabilização de horas extras	Sim	-	Sim
Horários de início e término de viagem	Sim	-	-
Roteiros com pernoite; troca de motoristas	Sim	Sim	-
Locais de parada fixos (e.g. almoço)	Sim	Sim	-
Restrições de tamanho de veículo e equipamentos para um cliente	Sim	-	Sim
Zonas de entregas e possibilidades de fracionamento de carga	Sim	-	-
Barreiras físicas e restrições de circulação de veículos	Sim	Sim	-
Mais de um roteiro por veículo (quando veículo retorna cedo à base)	Sim	-	-

**Quadro 1: Requisitos e características de sistemas para roteirização de veículos**

**Fonte:** Assad (1988), Ronen (1988) e Bodin (1990).

### 2.1.5 Taxonomia

Considerando a evidente complexidade do problema de roteamento de veículos, devido ao grande número de variáveis, restrições e objetivos possíveis, faz-se necessário uma taxonomia para melhor entendimento do problema. Segue, portanto, no Quadro 2, a classificação proposta por Bodin e Golden (1983) apud Goldbarg e Luna (2005, p. 375):

TAXONOMIA BODIN E GOLDEN	
1	Tempo para servir um determinado nó ou arco - Tempo especificado e prefixado - Janela de Tempo (Time Window)
2	Número de domicílios - Um domicílio - Mais de um domicílio
3	Tamanho da frota de veículos - Um veículo - Mais de um veículo
4	Tipo de frota disponível - Homogênea - Heterogênea
5	Natureza da demanda e parâmetros - Determinística - Estocástica
6	Localização da demanda - Nos vértices - Nos arcos
7	Grafo de substrato - Direcionado - Não direcionado
8	Restrições na capacidade de veículos - Todos sujeitos às mesmas restrições - Restrições diferentes
9	Tempo de roteamento - O mesmo para todos os veículos - Tempos diversos - Sem restrições de tempo
10	Custos - Variáveis (associados à rota escolhida) - Fixos
11	Operação - De entrega - De recolhimento - Ambas
12	Objetivo - Minimizar custos - Minimizar custos de operação na rota - Minimizar o número de veículos
13	Restrições na capacidade de arcos - Imposta a todos os arcos - Impostas a um subconjunto de arcos - Sem restrições
14	Outras

**Quadro 2: Taxonomia proposta por Bodin e Golden.**

Fonte: Bodin e Golden (1983) apud Goldbarg e Luna (2005, p. 375):

## 2.2 Heurísticas

Em termos etimológicos, a palavra heurística evoluiu do grego *Heuriskein* (também originou o termo eureka), que significa descobrir. Ferreira (2002), no Novo Dicionário Aurélio da Língua Portuguesa, define como sendo um conjunto de regras e métodos que conduzem à descoberta, à invenção e à resolução de problemas. Porém, para este trabalho, o conceito mais adequado, conforme Ribeiro (1998), é que a heurística pode ser definida como qualquer método aproximado que utiliza as propriedades estruturais ou as características das soluções do problema como base, e que, em geral, apresenta soluções viáveis de boa qualidade (sem garantia), apesar da complexidade reduzida em relação aos algoritmos exatos.

A partir do conceito apresentado, pode-se entender que o grande desafio das heurísticas é resolver problemas maiores, em tempo menores, com resultados melhores.

Quanto à classificação, as heurísticas podem ser divididas em métodos construtivos, heurísticas em busca de vizinhança, metaheurísticas, heurísticas sistemáticas e heurísticas híbridas.

As Heurísticas Construtivas consistem basicamente em estabelecer uma estratégia para a construção de soluções viáveis de forma gradativa. Ou seja, inicia em uma solução vazia que gradativamente deve ser incrementada, até que o critério de parada seja atingido, de modo a preservar a viabilidade. O método guloso representa bem o conceito de heurística construtiva.

As heurísticas de busca na vizinhança iniciam a partir de uma solução viável e, através de troca, remoção ou inserção, tentam melhorar a solução inicial. Esse processo persiste até que o critério de parada seja satisfeito ou não haja mais possibilidade de melhoria. O principal problema com essa estratégia é escapar dos mínimos locais. O algoritmo de busca local está dentro desse conceito.

As heurísticas sistemáticas são aquelas onde a árvore de espaço e soluções são percorridas utilizando critérios de ramificação e corte de árvore, tais como a busca com discrepância limitada ou *backtracking*.

As heurísticas híbridas são as que combinam duas ou mais heurísticas com estratégias diferentes.

O conceito de metaheurística de maior aceitação no meio acadêmico pode ser encontrado em Glover e Kochenberger (2002):

Uma metaheurística é um conjunto de conceitos que podem ser utilizados para definir métodos heurísticos aplicáveis a um extenso conjunto de diferentes problemas. Em outras palavras, uma metaheurística pode ser vista como uma estrutura algorítmica geral que pode ser aplicada a diferentes problemas de otimização com relativamente poucas modificações que possam adaptá-las a um problema específico.

Alguns exemplos de metaheurísticas são: algoritmo de têmpera simulada, busca tabu, algoritmos genéticos e algoritmo de colônia de formigas.

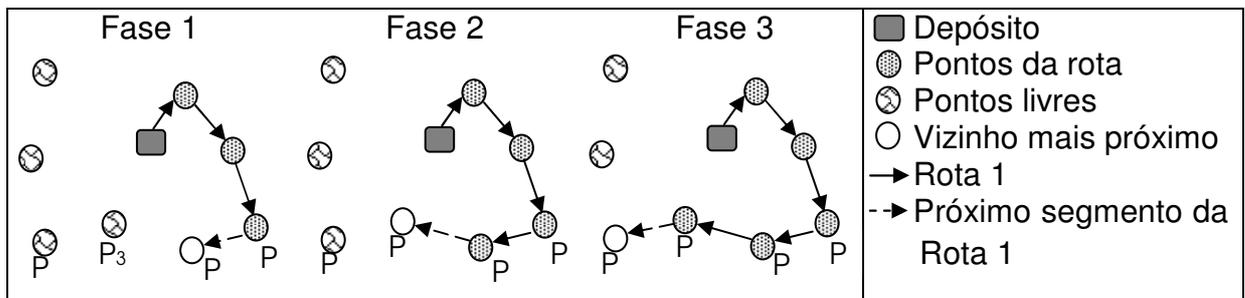
## **2.2.1 A Heurística e o Problema do Caixeiro Viajante**

A literatura sobre a solução do PCV e suas diversas abordagens é muito vasta. Entretanto, optou-se pela demonstração da heurística do vizinho mais próximo porque é uma solução clássica para o problema do caixeiro viajante.

### **2.2.1.1 Heurística de Inserção do Vizinho mais Próximo**

É utilizada como solução do PCV, sendo sua proposta bastante simples e rápida. Basicamente, consiste em inserir os consumidores na rota segundo o vizinho mais próximo do último consumidor inserido na mesma, ou seja, deve-se inserir, a cada passo, o vizinho mais próximo do último ponto de parada inserido na rota.

A Figura 1 ilustra claramente a heurística vizinho mais próximo: na Fase 1, os pontos  $P_4$  e  $P_3$  estão livres, e o ponto  $P_2$ , também livre, é o vizinho mais próximo de  $P_1$ , último ponto inserido na rota. Dessa forma, na Fase 2,  $P_2$  é inserido na rota, passando a ser o último ponto da mesma, e  $P_3$  será o próximo ponto a ser inserido, conforme se confirma a Fase 3.



**Figura 1: Ilustração da Heurística de Inserção do Vizinho mais Próximo**

## 2.2.2 Métodos Clássicos de Resolução do PRV

O Problema de Roteamento de Veículo apresenta uma grande complexidade computacional, classificado como NP-Difícil e, dependendo da quantidade de pontos, precisa de várias horas para a execução dos sistemas, o que torna sua aplicação prática inviável. Por isso a importância do desenvolvimento de heurísticas como forma de encontrar resultados que estejam dentro de padrões aceitáveis e de garantir que a execução do sistema ocorra em um intervalo de tempo razoável.

Será mostrado algumas heurísticas desenvolvidas especificamente para a resolução do PRV; e, em seguida, metaheurísticas de aplicação genérica em pesquisa operacional, inclusive no problema de roteamento de veículos.

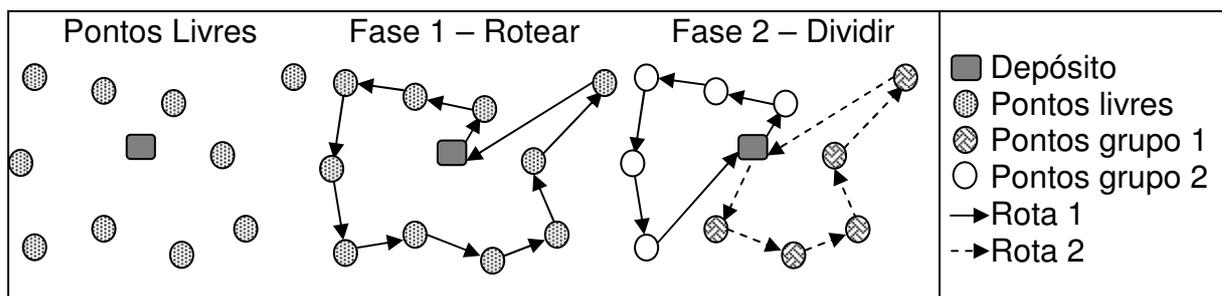
### 2.2.2.1 Rotear e Dividir

A heurística rotear e dividir está dividida em duas fases:

Fase 1: Define-se um trajeto para todos os nós (depósito e pontos de parada) através de uma solução aplicada ao problema do caixeiro viajante.

Fase 2: Conforme o caminho estabelecido na fase 1, os nós são inseridos na rota até que a capacidade desta seja extrapolada, para, então, ser criada nova rota. Esse processo prossegue até que o último nó do trajeto inicial seja incluído em uma rota.

A Figura X ilustra a heurística rotear e dividir.



**Figura 2: Ilustração do Algoritmo Rotear e Dividir.**

### 2.2.2.2 Rotear e Dividir Máximo

É uma versão da heurística rotear e dividir, diferindo desta na fase 2, pois quando a capacidade da rota é ultrapassada, o último nó inserido é descartado, mas os nós seguintes são testados na rota, na tentativa de inseri-los. As fases da heurística rotear e dividir máximo são:

Fase 1: Define-se um trajeto para todos os nós (depósito e pontos de parada) através de uma solução aplicada ao problema do caixeiro viajante.

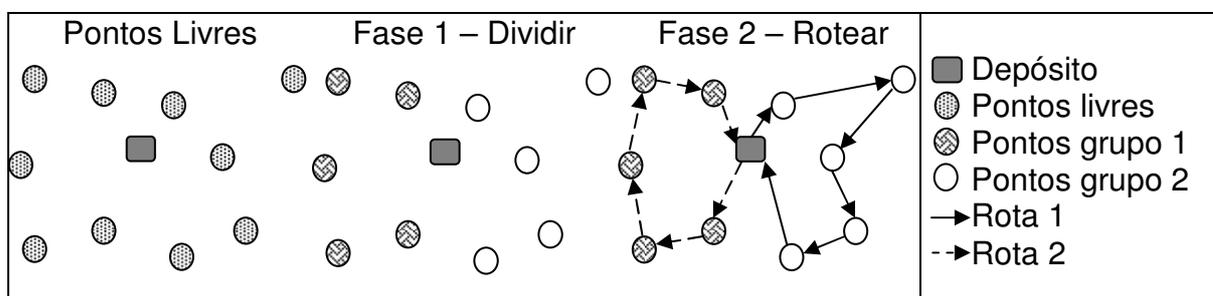
Fase 2: A partir do caminho estabelecido na fase 1, os nós são inseridos na rota até que a sua capacidade seja extrapolada. Quando isso ocorrer, o último nó inserido, responsável pela extrapolação da capacidade é descartado para aquela rota, e o processo continua com os nós seguintes até o último do trajeto definido na fase 1. Em seguida é iniciada uma nova rota e o processo é repetido para os nós não roteados. O algoritmo se encerra quando todos os nós pertencerem a alguma rota.

### 2.2.2.3 Dividir e Rotear

O modelo Dividir e Rotear, também conhecido como Particionamento de Rota, é composto de duas fases, conforme Figura 3:

Fase 1: Dividir os pontos de demanda em grupos, utilizando algum critério de proximidade;

Fase 2: Apresentar uma rota para cada um dos grupos.



**Figura 3: Ilustração do Algoritmo Dividir e Rotear.**

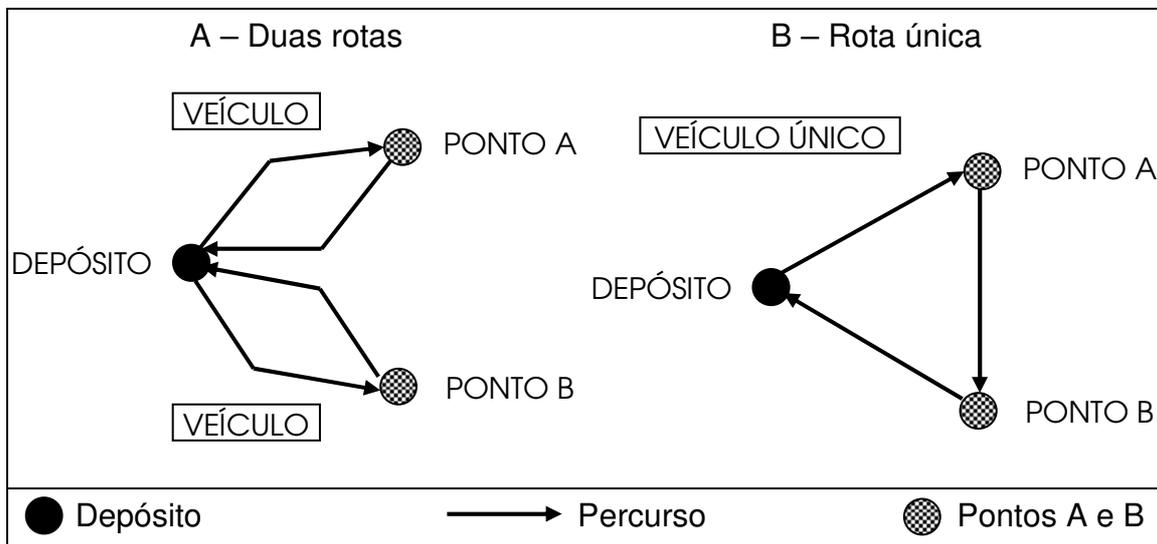
### 2.2.2.4 Método de Economia de Clarke-Wright

A heurística proposta por Clarke e Wright (1964) está baseada na noção de economia (ou ganho), que pode ser entendido como o custo de combinação de duas subrotas existentes, onde a rota resultante apresenta custo menor do que a soma dos custos das subrotas originais, e é obtido pela soma dos custos que deixaram de ocorrer menos o custo de junção das subrotas. Trata-se de uma heurística iterativa de construção baseada numa função gulosa de inserção.

A Figura X ilustra o conceito de ganho. Inicialmente, como mostra a Figura X-a, utiliza-se dois veículos: o veículo 1 faz a rota para atender o ponto A, e o veículo 2 atende o ponto B, ambos partindo do depósito D. No segundo momento, Figura X-b, ocorre a junção das duas rotas, a partir da união dos pontos A e B, passando-se a utilizar somente um único veículo, ou seja, as rotas D-A-D e D-B-D foram

substituídas pela rota D-A-B-D. O ganho obtido no exemplo da Figura X é dado pela soma das distâncias do depósito D aos pontos A e B, menos a distância entre os pontos A e B.

$$\text{GANHO} = [\text{distância (D - A)} + \text{distância (D - B)}] - \text{distância (A - B)}$$



**Figura 4: Ilustração da Heurística de Clarke e Wright**

O primeiro passo do algoritmo de Clarke e Wright é calcular as distâncias entre todos os nós. Em seguida, calcula-se os ganhos para todos os pares de nós, para, então, ordená-los em ordem decrescente de ganho. A partir do primeiro par da lista, vai-se agregando, conforme ordem da lista, outros pares que tenham um ponto igual ao extremo do roteiro, mas que não violem alguma restrição do problema, como capacidade do veículo ou tempo máximo da rota.

Quando um par não tem nenhum ponto no roteiro, um novo roteiro é iniciado. Porém, caso um par já tenha os dois pontos pertencentes a um mesmo roteiro, deve-se despezá-lo e passar ao próximo par.

Ressalte-se que se houver ponto que não tenha sido alocado em algum roteiro, deve-se criar um roteiro para este ponto.

O método pode ser descrito da seguinte forma, onde os ganhos são medidos através de  $e_{ij} = c_{di} + c_{dj} - c_{ij}$ :

1. Calcular os ganhos  $e_{ij}$  para todos os pares  $i, j$  ( $i \neq j$ ,  $i \neq d$  e  $j \neq d$ );
2. Ordenar os pares  $i, j$  na ordem decrescente dos valores  $T_{ij}$ ;

3. Começar com o par  $i, j$  com o maior ganho  $T_{ij}$  e proceder na sequência obtida em (2);
4. Para um par de nós  $i, j$ , correspondente ao  $K$ -ésimo elemento da sequência (2) verificar se  $i$  e  $j$  estão ou não incluídos em algum roteiro;
  - a) Se  $i$  e  $j$  não foram incluídos em nenhum dos roteiros já abertos, então criar um novo roteiros com os nós  $i$  e  $j$ ;
  - b) Se exatamente um dos pontos  $i$  ou  $j$  já pertence a um roteiro pré-estabelecido, verificar se esse ponto é o primeiro ou o último do roteiro (adjacente ao nó  $d$ , depósito). Se isso ocorrer, acrescentar o arco  $i, j$  a esse roteiro. Caso contrário, passar para a etapa seguinte, saltando o par  $i, j$ ;
  - c) Se ambos os nós  $i$  e  $j$  não pertencem a dois roteiros pré-estabelecidos (roteiros diferentes), verificar se ambos são extremos dos respectivos (adjacentes ao nó  $d$ ). Nesse caso fundir os dois roteiros em um só. Caso contrário, passar para etapa seguinte, pulando o par  $i, j$ .
  - d) Se ambos os nós  $i$  e  $j$  pertencem a um mesmo roteiro, ir para a etapa seguinte;
  - e) Continuar o processo até que a lista completa de “ganhos” seja exaurida. Se sobrar algum ponto não incluído, em nenhum roteiro, deverão ser formados roteiros individualizados, ligando o depósito a cada ponto e retornando à base.

#### 2.2.2.5 Algoritmo de Fisher e Jakumar

Esse método resolve o GAP – *generalized assignment problem* (problema de designação generalizado) para montar os grupos de clientes; Em seguida, a partir da resolução do problema do caixeiro viajante, é definido a rota de cada grupo. Pode ser dividido em quatro fases: 1) Definir os pontos sementes para iniciar cada grupo;

2) Calcular o custo  $d_{ik}$  de cada cliente  $i$  para o grupo  $k$ ; 3) Resolver o GAP para formar os grupos, considerando a capacidade do veículo  $Q$ , o custo  $d_{ij}$  e o peso de cliente  $q_i$ ; e, 4) Resolver o problema do caixeiro viajante para cada grupo.

### **2.2.3 Metaheurísticas de Resolução do PRV**

Conforme Tenkley (2008), as metaheurísticas também produzem soluções de boa qualidade, mas normalmente precisam de mais tempo de execução do que os métodos clássicos.

#### **2.2.3.1 Algoritmo de Têmpera Simulada (Simulated Annealing)**

A ideia do algoritmo de têmpera simulada surgiu a partir dos estudos de Kirkpatrick, Gelatt e Vecchi (1983), e está baseada em um processo térmico de resfriamento de metais. Inicia com a liquidação de um cristal a alta temperatura, momento em que as partículas podem se locomover livremente. Em seguida, ocorre o resfriamento gradativo do metal, até que o ponto de solidificação seja atingido, quando assume um estado mínimo de energia, pois, a partir do resfriamento, as moléculas tendem a se acomodar na estrutura cristalina natural do metal em processo.

Usando essa lógica, o algoritmo de têmpera simulada permite a movimentação dentro de um espaço de busca, de modo que possa, inicialmente, atingir um ponto de custo superior, com intuito de evitar mínimos locais, embora busque posteriormente o ótimo global. O algoritmo inicia com uma solução inicial viável para o problema. Em seguida, substitui a solução atual por outra solução próxima, determinada a partir da função objetivo e de uma variável de controle

(temperatura, por analogia) que, em princípio, deve ser elevada, permitindo alterações ruins, fugindo do ótimo local. Paulatinamente, à medida que o algoritmo progride, a variável de controle vai diminuindo, e junto com ela a possibilidade de aceitação de alterações ruins, de modo a se aproximar do ótimo global.

Segundo Aarts e Lenstra (1997), embora a probabilidade do algoritmo simulated annealing termine com uma solução de ótimo global, para problemas finitos, quando a duração máxima é prolongada, seja próxima de 100%, normalmente o algoritmo de têmpera simulada requer tempo exponencial, por isso a sua utilização como técnica de aproximação é muito comum.

### **2.2.3.2 Busca Tabu**

A palavra tabu tem sua origem ligada ao Tongan, idioma da Polinésia, onde os nativos da Ilha de Tonga a usavam para designar objetos sagrados que, por este motivo, não podiam ser tocados

A busca tabu tem suas raízes nos anos 60 e começo dos anos 70, mas a forma atual foi proposta por Glover (1986), tornando-se rapidamente em uma forma estabelecida de otimização, com utilização em várias áreas e campos.

O algoritmo de busca tabu é uma técnica de busca local que tem como base a lista tabu, onde os locais já visitados são armazenados, a fim de evitar que esses mesmos locais tornem a ser percorridos. Com isso, impede-se a ciclagem do algoritmo e a restrição ao ótimo local.

O algoritmo inicia com uma solução inicial  $s$ , podendo ser gerada de forma simples e aleatória. Em seguida, a cada iteração, a partir de uma busca na vizinhança de  $s$ , é formado um subconjunto de soluções  $Z$ . Uma função  $f(x)$  é definida pelo algoritmo a fim de avaliar as soluções propostas em  $Z$ . A solução de menor custo em  $Z$ , conforme  $f(x)$ , é então selecionada para ser a solução corrente. Ressalte-se que a melhor solução até então obtida permanece armazenada, pois

somente soluções menores poderão substituí-la, de modo que esta será a solução final do método.

Conforme Gonçalves *et al.* (2008), a condição de parada é normalmente estabelecida de duas formas: número máximo de iterações sem que haja melhora na solução, e quando o método atingir um valor melhor que o valor mínimo conhecido para a função de avaliação ou encontre uma solução considerada boa.

Apesar de significar maior esforço computacional, há ainda a possibilidade da utilização de algum critério de aspiração, que consiste em um critério adicional de aceitação que permite movimentos para pontos pertencentes à lista tabu.

A intensificação, que consiste em concentrar a busca em regiões mais promissoras, e a diversificação, que procura levar a busca para regiões inexploradas, têm sido muito usadas como mecanismo de melhora da busca tabu. Tal manobra pode ser feita através da adição de termos na função objetivo: enquanto a intensificação penaliza soluções longe da solução atual, a diversificação penaliza as soluções próximas da solução atual. Através da modificação dos pesos, durante a busca, que foi estabelecido para cada termo, o mecanismo faz com que o processo mude da intensificação para a diversificação e vice-versa.

### **2.2.3.3 GRASP – Greedy Randomized Adaptive Search Procedures**

O GRASP, cuja nomenclatura usada em português é Busca Adaptativa Gulosa e Randomizada, foi proposto por Feo e Resende (1995), e tem como princípio a combinação de dois métodos – um construtivo e outro de busca local – em um processo iterativo, onde cada iteração trabalha de forma independente e o resultado final é a melhor solução após a execução de todas as iterações.

Na fase de construção, uma solução viável é gerada de forma incremental, onde em cada iteração um novo elemento, escolhido aleatoriamente em uma lista restrita de candidatos (LRC), é inserido na solução parcial. A LRC é formada pelo subconjunto dos melhores elementos selecionados a partir da avaliação de uma

função gulosa, que irá medir o benefício da inserção de cada elemento. Após a inserção do novo elemento na solução parcial, a avaliação da função gulosa é refeita e a LRC é atualizada.

A fase de busca, com o objetivo de melhorar a solução encontrada na fase de construção, realiza uma busca na vizinhança da solução a fim de achar um ótimo local, pois este nem sempre é determinado na fase de construção.

#### 2.2.3.4 Algoritmos Genéticos – AG

Darwin, no século XIX, na sua Teoria da Evolução das Espécies, defendia basicamente que os indivíduos com maior capacidade de adaptação ao ambiente teriam maiores chances de sobrevivência e, conseqüentemente, de reprodução, de modo que esses mesmos indivíduos transmitiriam seus genes para novas gerações, obviamente mais adaptadas.

Os algoritmos genéticos foram introduzidos por Holland (1975), cuja idéia principal foi inspirada em uma analogia com a teoria proposta por Darwin, ou seja, busca a adaptação dos conceitos da evolução biológica como cromossomo, mutação, gene e seleção para problemas de otimização, através da construção de algoritmos baseados na evolução das populações de soluções.

Pacheco (1999, p. 2) faz um paralelo entre o algoritmo genético e a teoria de Darwin, conforme Quadro 3.

NATUREZA	ALGORITMOS GENÉTICOS
Cromossomo	Palavra binária, vetor, etc.
Gene	Característica do problema
Alelo	Valor da característica
Loco	Posição na palavra, vetor
Fenótipo	Estrutura
Genótipo	Estrutura submetida ao problema
Indivíduo	Solução
Geração	Ciclo

**Quadro 3: Paralelo entre AG e a Teoria Evolutiva.**

Fonte: Pacheco (1999, p. 2)

O algoritmo inicia com a formação de uma população de possíveis soluções (criada aleatoriamente). Ocorre, então, o processo de seleção, onde cada indivíduo é avaliado por uma função de avaliação e recebe uma nota, de modo a preservar apenas os mais adaptados, conforme a nota recebida. Em seguida, aplica-se aos indivíduos selecionados operadores do algoritmo, a fim de se obter nova geração de soluções. O processo se repete até que alcance algum critério de parada: número de iterações ou solução satisfatória.

Os cromossomos (seqüência de bits ou valores numéricos) representam as possíveis soluções do problema, e sua principal característica é a adaptabilidade (*fitness*). O *fitness* expressa a maior ou menor capacidade de adaptação do indivíduo e é determinada conforme o valor da função objetivo, de modo a identificar aqueles que serão preservados e submetidos aos operadores do algoritmo.

O cruzamento (*crossover*) e a mutação são os operadores básicos do AG. O cruzamento consiste na recombinação dos pais através da troca de bits entre os mesmos, podendo ser de um ponto ou multi-pontos. A mutação altera um ou mais bit arbitrariamente, o que ajuda o algoritmo a fugir do mínimo local.

### **2.2.3.5 Algoritmos de Colônia de Formigas**

Os algoritmos baseados em Colônia de Formigas (ou *Ant Colony Optimization* – ACO) surgiram em 1991, a partir do algoritmo *Ant System* (AS), proposto por Dorigo, Maniezzo e Colorni (1991), cuja ideia central é a analogia com o comportamento das formigas quando o formigueiro sai em busca de alimento.

As formigas, em geral, quase cegas, iniciam a busca aleatoriamente, até que uma delas encontre o alimento. Como liberam uma substância química chamada feromônio, como forma de facilitar o retorno para o formigueiro, a formiga que encontrou o alimento deixa o caminho até o alimento marcado pelo feromônio, de modo a servir de orientação para ela mesma e para as demais formigas encontrarem a fonte de alimento com maior facilidade.

As formigas tendem a escolher o caminho com maior quantidade de feromônio. Por isso, à medida que outras formigas encontram o alimento através do rastro inicial, e retornam para o formigueiro pelo mesmo caminho da primeira formiga, acabam deixando mais feromônio naquele caminho, fazendo com que mais e mais formigas tendam a optar por aquele trajeto. Dessa forma, a busca por alimentos deixa de ser aleatória e o formigueiro assume aquele caminho como solução ótima.

Outro ponto relevante do comportamento das formigas é que, conforme Wilson e Hölldoble (1990), mesmo praticamente cegas, são capazes de estabelecer o caminho mais curto entre o formigueiro e a fonte de alimento.

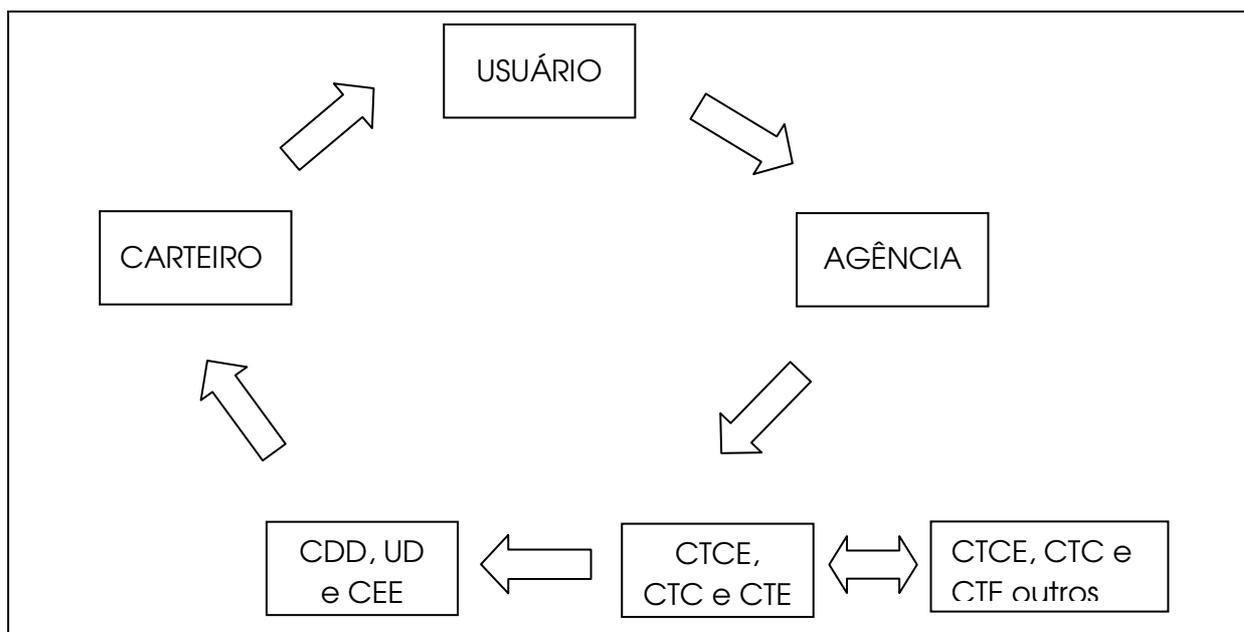
No algoritmo *Ant System*, proposto por Dorigo, Maniezzo e Coloni (1991), é colocada uma formiga em cada cidade (ou aleatoriamente), e cada formiga irá construir uma solução movendo-se de uma cidade para outra. A cada iteração, as formigas escolhem, dentre as não visitadas, a próxima cidade para onde irão mover-se, conforme uma função probabilística inversamente proporcional à distância do caminho e diretamente proporcional à quantidade de feromônio presente no mesmo.

Cada formiga possui uma memória com os pontos por onde já passaram, também chamada de lista tabu, que impede que retornem a esses mesmos pontos até que encontrem o alimento.

Ressalte-se, ainda, que a cada ciclo completado, a formiga deixa um rastro positivo  $\Delta t_{ij}$  de feromônio em cada aresta  $(i,j)$  do ciclo, como também é calculado a evaporação do feromônio em cada aresta  $(i,j)$ , em função de um fator de evaporação  $\beta \in [0, 1]$ . Assim, um bom conjunto de arestas é escolhido por mais formigas e, conseqüentemente, receber-se-ão maior quantidade de feromônio.

### 3 Estudo de caso e proposições

A ECT tem suas atividades focadas em dois segmentos principais: cartas e encomendas, cujo ciclo de vida básico está representado na Figura 2 abaixo:



**Figura 5: Ciclo de vida básico de cartas e encomendas.**

O usuário faz a postagem na agência; depois, os objetos recebidos são encaminhados para o Centro de Tratamento de Cartas e Encomendas (CTCE), Centro de Tratamento de Cartas (CTC) ou Centro de Tratamento de Encomendas (CTE) através de Linha Tronco Urbana (LTU), quando a agência está localizada na mesma cidade do Centro de Tratamento (CT). O CTCE recebe também objetos oriundos de unidades do interior, através de Linha Tronco Regional (LTR) ou Linha Auxiliar (LA), e de outros estados, que podem ser transportados por via terrestre através Linha Tronco Regional (LTN) ou via aérea, pela Rede Postal Noturna (RPN). Após a separação por destino, o Centro de Tratamento encaminha, utilizando as linhas de transporte já mencionadas, para a unidade de distribuição competente, que pode ser: Unidade de Distribuição (UD), localizada nas cidades onde não existe Centro de Distribuição Domiciliária, por isso a agência acumula a função de captação e distribuição dos objetos; CDD, localizado nos grandes centros urbanos, onde a distribuição e a captação dos objetos postais são realizadas por unidades

específicas; e Centro de Entrega de Encomendas, especializado na entrega de encomendas e malotes. Nas unidades de distribuição, os objetos são triados conforme a circunscrição da área do distrito de cada carteiro para, em seguida, os objetos postais chegarem ao seu destino final, através do carteiro - pedestre, motorizado veículo ou motorizado moto.

O Quadro 4 mostra as linhas de transportes utilizadas pelos Correios e o tipo de transporte que as mesmas executam.

LINHA	DEFINIÇÃO
RPN – Rede Postal Noturna	Linhas aéreas que transportam cargas urgentes e interligam as capitais do país
LTN – Linhas Tronco Nacional	Transportam, via superfície, cargas urgentes e não urgentes para as Regionais de outros Estados
LTR – Linhas Tronco Regional	Transportam cargas urgentes e não urgentes dentro do próprio Estado
LCE – Linhas de Coleta e Entrega	Linhas urbanas que interligam as unidades operacionais da mesma cidade e, em alguns casos, são responsáveis também, pela entrega de objetos a clientes;
LA – Linhas Auxiliares	Utilização de linhas de ônibus para transportar cargas em localidades em que não se justifica a implantação de uma linha especial.

**Quadro 4: Linhas de transporte utilizadas pelos Correios.**

Fonte: Adaptado de Ribeiro, Ruiz e Dexheimer (2001).

Os Correios, em números aproximados, possuem um quadro funcional de 109 mil funcionários. Destes, 93 mil atuam na área operacional, sendo que 56 mil são carteiros alocados na estrutura de distribuição, que está estabelecida em todo território nacional com 92 CEEs e 900 CDDs, além das UD's existentes em todos os 5.564 municípios do Brasil.

O Quadro 5 mostra a distribuição dos funcionários dos Correios por cargo, especificando a quantidade e o percentual, ressaltando a importância do carteiro dentro da instituição, onde o mesmo representa mais da metade dos empregados da empresa, com um percentual de 52% de todo o efetivo.

CARGO	QUANTIDADE	PERCENTUAL (%)
Atendente	22.656	21,0
Carteiro	56.038	52,0
Operador de Triagem e Transbordo	12.960	12,0
Outros	16.902	16,0
Total	108.516	100,0

**Quadro 5: Quadro de pessoal dos Correios por cargo.**

Fonte: [www.correios.com.br](http://www.correios.com.br).

A Diretoria Regional do Ceará é formada por 2508 funcionários, sendo que 1147 são carteiros, distribuídos em um CEE, 20 CDD's e 180 UDs com distribuição domiciliária.

Em Fortaleza, a ECT possui um CEE e 15 CDDs que juntos são responsáveis por toda a distribuição domiciliária da capital cearense. Os CDDs, que somados possuem 432 distritos e um quadro de 458 carteiros, têm o seu foco na distribuição de cartas e telegramas. O CEE é composto por 59 distritos, sendo 33 leves e 26 motos, e um efetivo de 80 carteiros e 13 colaboradores que atuam nas atividades internas, tem sua atividade centrada na distribuição de encomendas e na entrega e coleta de malotes.

A encomenda é um serviço que pode ser classificado como econômico ou expresso, cuja diferença principal é que este tem prioridade no fluxo produtivo e aquele não. A classe da encomenda econômica abrange os serviços de encomenda normal, reembolso postal e encomenda PAC. A classe da encomenda expressa está dividida nos produtos que compõem a "família" Sedex: Sedex, Sedex 10, Sedex Hoje, Sedex Três Direções, Sedex Vídeo, Sedex a Cobrar, Sedex Compact – CD, Sedex Compact – Livro, Sedex Destinatário Único, Sedex Brindes e Amostras, Sedex Cartão de Crédito e Cartão de Débito, Sedex Talão de Cheques, Sedex Comércio Eletrônico, e e-Sedex.

As encomendas para serem aceitas na postagem precisam atender a três critérios: proibições e restrições, limites e dimensões e acondicionamento.

As proibições e restrições se referem aos tipos de objetos que os Correios não poderão receber de forma alguma, como é o caso de animais mortos; ou situações em que poderão ser recebidos, porém com restrição, como é o caso de

entorpecentes que precisam de autorização legal ou tenham destinação médica ou científica.

Quanto ao critério dos limites e dimensões, as encomendas deverão respeitar limites de dimensionamento e peso, conforme sejam envelope, pacote ou rolo.

O acondicionamento se refere à situação em que toda encomenda deverá ser acondicionada pelo remetente em embalagem que resista ao peso, à forma e à natureza do conteúdo, bem como às condições de transporte, de modo que garantam integridade física dos funcionários, dos equipamentos, do produto e dos objetos postados – inclusive outros que possam ser prejudicados pela natureza do produto.

Já o Malote é um serviço de correspondência agrupada, que inclui a coleta, o transporte e a entrega de objetos reunidos em volume, mas que pelo menos um deles está sujeito ao monopólio postal. É um serviço exclusivo para pessoas jurídicas e que prevê a entrega no período de 08:00 às 12:00, e a coleta no período de 14:00 às 18:00 horas do dia de chegada à localidade de destino, salvo nos casos em que haja a necessidade de adequação do serviço em função de peculiaridades operacionais na localidade de prestação do serviço.

Tanto o CDD como o CEE possui um sistema específico para dimensionamento dos recursos para realização de suas atividades. No CDD é utilizado o Sistema Integrado de Operações (SIOP), cujo funcionamento tem por base o cadastro dos trechos, o minucioso levantamento de todas as atividades inerentes a operação da unidade e a contagem exaustiva do tráfego, no período de cinco dias úteis consecutivos, entre os dias 6 e 24 inclusive, nos meses de abril a novembro. Esse sistema basicamente dimensiona os recursos da unidade e auxilia na divisão do Centro de Distribuição em distritos, de modo a manter as atividades internas e externas de distribuição equilibradas entre os carteiros.

O dimensionamento dos recursos do CEE é feito através do Sistema de Distritamento de Encomendas (SDE) que, igualmente ao SIOP nos CDDs, também auxilia no processo de divisão dos distritos. Faz-se o cadastramento do efetivo interno e externo da unidade, dos veículos e de todos os trechos percorridos pelos distritos. Em seguida, faz-se o levantamento do tráfego postal naquela unidade através de contagem exaustiva da carga de objetos entregues pela unidade, durante

um período de 15 dias úteis, excetuando-se os sábados, domingos, segundas, feriados e o dia seguinte ao feriado.

Em ambos os casos, a montagem dos distritos se dá através de um processo quase artesanal, onde o distritamento, apesar de utilizar os dados resultantes dos cálculos dos sistemas, é feito com base no conhecimento de área dos carteiros e dos operadores do sistema. O processo de montagem dos distritos ocorre da seguinte forma: o SDE, após a conclusão do cadastro e o lançamento do tráfego, calcula os tempos para realização das atividades em cada trecho e a quantidade de veículos necessários à operação. Em seguida, os operadores, com o apoio dos carteiros, passam a montar os distritos em função do conhecimento de área de cada um. À medida que os trechos são deslocados de um distrito para outro, o sistema recalcula o tempo total de atividade de cada distrito, indicando a possibilidade de se retirar ou acrescentar algum trecho. Ou seja, a montagem dos distritos, embora haja o SDE que calcula os tempos de atividade, ocorre quase na metodologia da tentativa e erro.

Além disso, observa-se que o percurso diário dentro do distrito, após a montagem deste, é feito exclusivamente baseado na experiência e conhecimento do carteiro, conforme a quantidade de objetos e o endereço destes, no dia. O CTCE de Fortaleza recebe todos os objetos, inclusive oriundos do interior e de outros estados, e realiza a sua separação de acordo com a unidade que irá fazer a entrega. Após essa separação, os objetos inerentes ao CEE, que está localizado dentro do mesmo prédio do CTCE, são encaminhados para serem separados conforme o distrito. A separação por distrito também é realizada de forma manual, pois a ECT não possui máquina de separação de encomenda em Fortaleza. Em seguida, cada carteiro faz o ordenamento do seu distrito, conforme a seqüência de distribuição que considera melhor.

### 3.1 Heurísticas Para PRV

O modelo de dimensionamento de recursos utilizado pelos Correios para adequar o funcionamento dos Centros de Entrega de Encomendas (CEE) às constantes mudanças do cenário de atuação dos mesmos é feito com base em uma grande variedade de dados que influenciam na realização das atividades. Tamanho do trecho, quantidade de pontos de entrega, quantidade de pontos de coleta, o tipo de objeto e a quantidade de objetos são alguns itens considerados nos cálculos. Tais medições são elaboradas em função do Código de Endereçamento Postal (CEP), que conseqüentemente serve de base para a distribuição nos CEEs. Por isso, foram propostos modelos baseados no CEP.

Deve-se entender que um CEP pode se referir a um logradouro inteiro ou parte dele, mas nunca haverá dois códigos para o mesmo trecho de qualquer logradouro. Assim, pode-se ter um CEP identificando uma praça, uma rua ou uma avenida, por exemplo. Porém, pode-se ter também um CEP para o lado de numeração par, e outro para o de numeração ímpar; ou, ainda, um código para o trecho de 1 a 300 de determinada rua, por exemplo, e outro CEP para o trecho que inicia no número 301 e termina no fim da rua.

Para a exeqüibilidade dos modelos propostos, os segmentos de CEP único precisam representar a menor carga de trabalho possível, devendo chegar ao patamar máximo de 50 a 80 minutos. Essa necessidade decorre do fato de que segmentos vizinhos com valores altos podem comprometer a montagem de um roteamento otimizado, pois, isoladamente, não conseguem atingir o tempo mínimo, e quando acrescido de outros segmentos próximos ultrapassam o tempo máximo. Dessa forma, para se fechar uma rota, será preciso unir segmentos distantes um do outro, o que acaba comprometendo, em alguns casos, a otimização da rota, porque esta perde um pouco da sua produtividade.

O tempo total de um distrito é dado pela soma dos tempos gastos com as atividades internas, mais o tempo de deslocamento improdutivo e os tempos gastos com as atividades externas - distribuição propriamente dita.

Os tempos internos abrangem atividades realizadas, dentro do espaço físico da Unidade de Tratamento, antes da saída do carteiro para a rua, a fim de receber, conferir, organizar e acomodar dentro do veículo os objetos a serem entregues, além de outras atividades inerentes ao serviço de correios.

O tempo improdutivo expressa o tempo necessário para o carteiro ir da unidade dos Correios (depósito) até o primeiro ponto de entrega, mais o tempo para retornar do último ponto de entrega para a unidade dos Correios (depósito).

Utilizou-se na resolução do problema a abordagem dividir primeiro e rotear depois, onde se propõe 2 heurísticas para divisão e 3 heurísticas para o roteamento.

### **3.1.1 Dividir e Rotear**

A seguir as heurísticas do modelo dividir e rotear aplicadas na solução do problema de roteamento de veículos para distribuição no Centro de Entrega de Encomendas de Fortaleza.

### **3.1.2 Heurística Dividir**

Para a fase de divisão dos grupos, optou-se pelo desenvolvimento de duas heurísticas. Em ambos os casos, não se considerou a capacidade dos veículos, definidos como de um único modelo. Estabeleceu-se tempos internos lineares de 1h15min para todos os grupos, pois os tempos internos variam em função de parâmetros específicos dos Correios, cujos valores não puderam ser acessados.

### 3.1.2.1 Heurística Dividir 1 (HD1)

1. Considerar cada CEP um segmento;
2. Escolher o segmento mais próximo do depósito e que não pertença a grupo já formado, tornando-o o primeiro segmento do grupo;
  - 2.1. Havendo mais de um trecho que atenda igualmente a condição, será escolhido aleatoriamente entre os mesmos.
3. Calcular o tempo improdutivo: soma dos tempos de deslocamento entre o depósito e o primeiro segmento da rota e entre o depósito e o último segmento da rota, considerando o ponto extremo mais próximo do depósito de cada segmento.
4. Verificar se o segmento atende a restrição de tempo total (o tempo do segmento + tempo improdutivo + tempo de atividades internas deve ter 480 minutos, podendo variar 5% para mais ou para menos);
  - 4.1. Se segmento  $> 504$ ;
    - 4.1.1. Desfazer união;
    - 4.1.2. Descarta o último segmento inserido para a rota atual;
    - 4.1.3. Ir para o item 5;
  - 4.2. Se  $456 < \text{segmento} < 504$ , considerar o segmento atual uma rota.
    - 4.2.1. Testar a inserção dos 5 segmentos mais próximo do primeiro segmento do grupo, mas que não pertença a outro grupo, considerando as distâncias dos pontos extremos de cada segmento;

Cada vez que o segmento testado não fizer o tempo da rota ultrapassar os 504 minutos, deverá ser acrescentado à rota
    - 4.2.2. Ir para o item 2;
  - 4.3. Se segmento  $< 456$ , ir para o item 5;
5. Identificar o segmento mais próximo do primeiro segmento do grupo, mas que não pertença a outro grupo, considerando as distâncias dos pontos extremos de cada segmento;
  - 5.1. Unir os segmentos a partir dos pontos extremos mais próximos;
  - 5.2. Ir para o item 3.

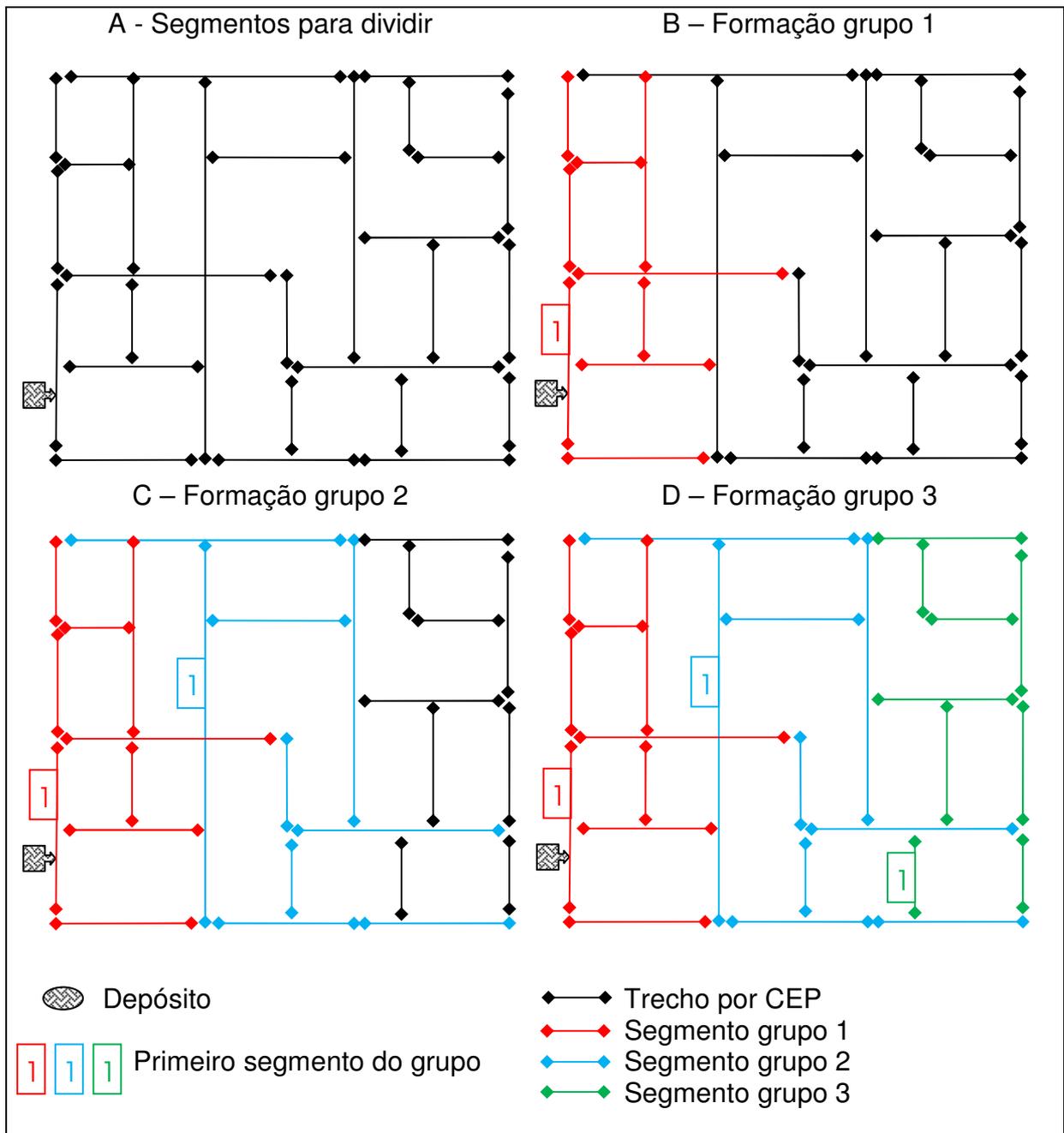
A HD1 consiste em unir os segmentos vizinhos a partir dos seus pontos extremos, em função da sua distância euclidiana, sempre considerando a restrição de que a rota deve ficar com 480 minutos, podendo variar 5% para cima ou para baixo, ou seja, poderá variar entre 456 e 504 minutos.

As rotas iniciam com o trecho mais próximo do depósito que não pertença a outra rota. A partir deste segmento, os seus vizinhos mais próximos serão acrescentados ao grupo, considerando os pontos extremos de cada segmento,.

Todas as vezes que o segmento acrescentado provocar o aumento do tempo total do grupo de modo a ultrapassar os 504 minutos, este segmento será descartado daquele grupo, e será acrescentado o segmento mais próximo seguinte, até que se deixe o tempo total do grupo dentro dos limites permitidos.

Quando o tempo do grupo ficar entre os limites estabelecidos aceitáveis, deve-se testar os próximos 5 segmentos nesse grupo, com o intuito de identificar a possibilidade de se acrescentar um ou mais segmentos, sem que se ultrapasse os limites permitidos. Cada segmento testado que não ultrapasse o limite máximo do grupo deverá ser inserido nele. Após as tentativas de melhoria, deve-se encerrar o grupo e iniciar um novo grupo até que todos os segmentos estejam alocados nos grupos formados.

A Figura 4 mostra claramente o funcionamento de HD1, onde a Figura 4-A mostra os trechos de CEP antes da aplicação da heurística dividir 1, e a Figura 4-B mostra os mesmos trechos após a alocação nos grupos. O grupo 1, caracterizado pela cor vermelha, é montado primeiro, a partir do trecho mais próximo do depósito, identificado pelo número 1 vermelho. Em seguida, montou-se o grupo 2, identificado pela cor azul, a partir do trecho inicial, onde está o número 1 da mesma cor dos seus segmentos. Por último, montou-se o grupo 3, de cor verde, também iniciado no segmento indicado pelo número 1, mas de cor verde. Os grupos foram montados a partir do segmento mais próximo do depósito que não pertencesse a nenhum grupo já formado, sendo adicionados ao grupo os segmentos mais próximos, conforme a distância dos pontos extremos, desde que não ultrapassem os limites da restrição.



**Figura 6: Ilustração da aplicação da HD1.**

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.1.2.2 Heurística Dividir 2 (HD2)

1. Considerar cada trecho de CEP um ponto, representado pelo ponto médio do trecho;
2. Escolher o ponto mais próximo do depósito e que não pertença a nenhuma rota, tornando-o o primeiro ponto da rota;
  - 1.1. Havendo mais de um trecho que atenda igualmente a condição, será escolhido um aleatoriamente entre os mesmos.
3. Formar um segmento entre o depósito e o ponto escolhido;
4. Calcular o tempo improdutivo: soma dos tempos de deslocamento entre o depósito e o ponto mais próximo do mesmo, e entre o depósito e o ponto mais distante deste, pertencente ao segmento;
5. Verificar se o segmento atende a restrição de tempo total (o tempo do segmento + tempo improdutivo + tempo de atividades internas deve ter 480 minutos, podendo variar 5% para mais ou para menos);
  - 5.1 Se  $\text{segmento} > 480 + 0,05(480)$ ;
    - 5.1.1 Desfazer união;
    - 5.1.2 Descarta o último ponto inserido para a rota atual;
    - 5.1.3 Ir para o item 6;
  - 5.2 Se  $480 - 0,05(480) < \text{segmento} < 480 + 0,05(480)$ , considerar o segmento atual uma rota.
    - 5.2.1 Ir para o item 2;
  - 5.3 Se  $\text{segmento} < 480 - 0,05(480)$ , ir para o item 6;
- 6 Identificar o ponto mais próximo do primeiro ponto do grupo, exceto aqueles descartados para a rota, e que não pertença a outro grupo;
  - 6.1 Inserir o ponto no segmento;
  - 6.2 Ir para o item 4;

A HD2 difere de HD1 devido ao fato que este considera cada CEP um segmento e constrói as rotas a partir dos pontos extremos desses segmentos; enquanto que HD2 considera cada segmento de CEP um ponto caracterizado pelo ponto médio do segmento.

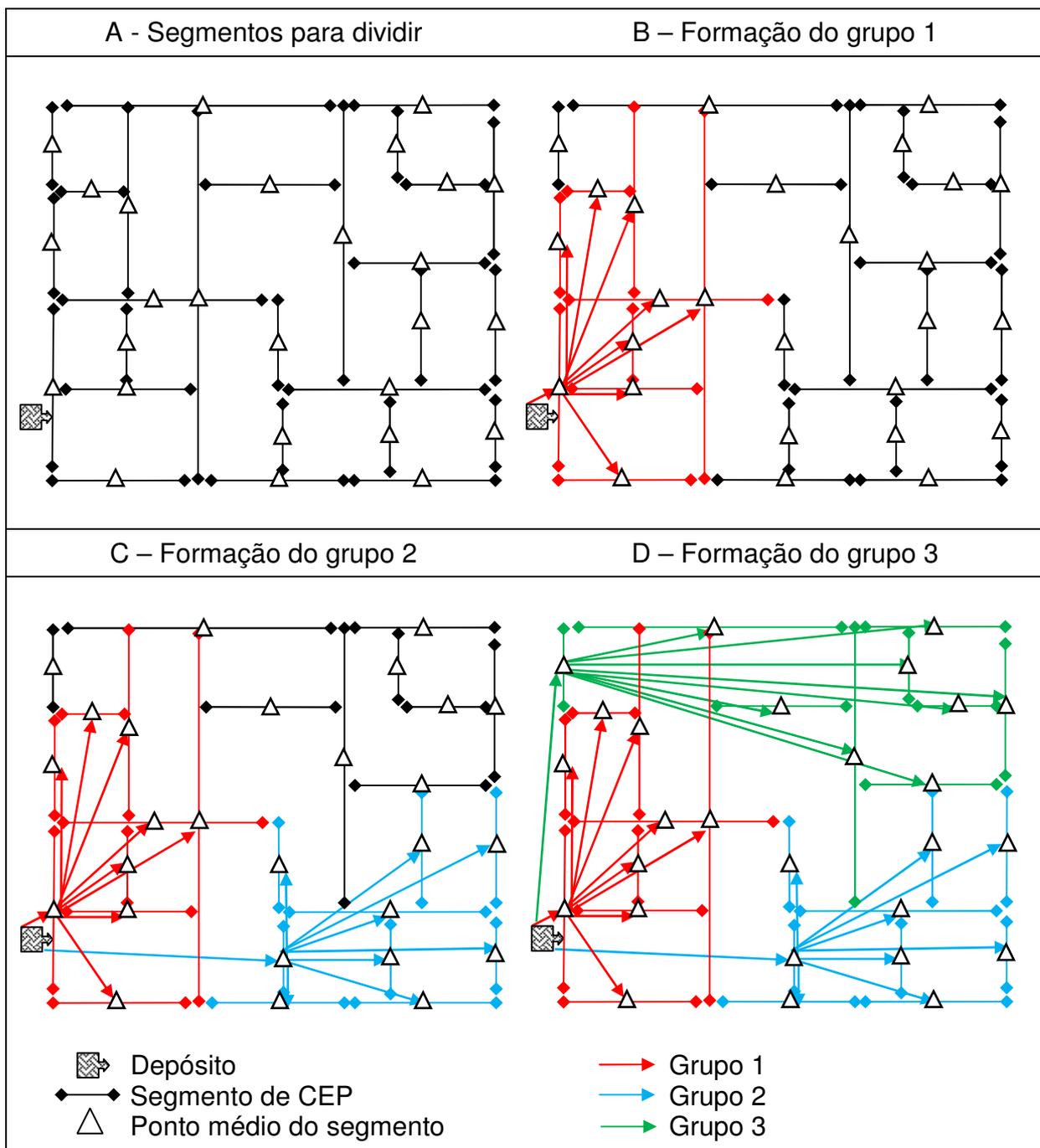
Assim, os segmentos são inseridos no grupo, conforme a distância euclidiana entre os pontos médios dos segmentos e o ponto médio do primeiro segmento. Além disso, cada vez que um segmento é inserido no grupo, o mesmo é testado de modo a determinar a sua aceitação quanto aos limites de tempo permitido, sempre considerando a restrição de que o tempo total do grupo deve ficar entre 456 e 504 minutos.

O primeiro grupo, como proposto em HD1, inicia com o segmento onde está o armazém, pois conseqüentemente é o segmento mais próximo deste.

Outro aspecto relevante entre os dois métodos é que cada vez que o segmento acrescentado provocar o aumento do tempo total do grupo, de modo a ultrapassar os 504 minutos, o mesmo será descartado para aquele grupo, e será acrescido o segmento mais próximo seguinte, até que se tenha um segmento que deixe o grupo dentro dos limites de tempo permitido.

Outro fato relevante é que, logo que o tempo total do grupo alcance os limites estabelecidos aceitáveis, o algoritmo continuará para os próximos 5 segmentos nesse grupo ou até atingir os 504 minutos, o que ocorrer primeiro. Em seguida, deve-se fechar o grupo e iniciar um novo grupo.

A Figura 5 ilustra os passos de HD2. O primeiro grupo montado foi o de cor vermelha, a partir do ponto médio do segmento mais próximo do depósito, identificado na figura como sendo um círculo. Em seguida, uniram-se os pontos médios mais próximos, finalizando o grupo de modo a atender a restrição do tempo. Depois, montou-se o grupo 2, de cor verde, partindo do ponto médio mais próximo do depósito, mas que não pertencesse a nenhum outro grupo já formado, e seguiu-se acrescentando os segmentos em que os pontos médios dos mesmos fossem os mais próximos do ponto médio do primeiro segmento. Por último, formou-se o grupo azul, utilizando os mesmos critérios dados anteriormente.



**Figura 7: Ilustração da HD2.**

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.1.3 Roteamento

O roteamento pôde ser feito de 4 formas distintas: HR1, HR2, HR3 e HR4. Para cada grupo é feito o roteamento.

#### 3.1.3.1 Heurística Rotear 1 (HR1)

Passo 1: A rota inicia e termina no depósito

Passo 2: Identificar o ponto mais próximo do depósito;

Passo 3: Tornar este ponto o primeiro segmento do grupo (imutável) a ser percorrido, após a saída do depósito;

Passo 4: Calcular a distância entre o primeiro segmento e todos os outros segmentos do grupo;

Passo 5: Elaborar uma tabela colocando os segmentos em ordem crescente da distância calculada;

Passo 6: Adicionar os segmentos na rota, do grupo em questão, obedecendo a ordem dada na tabela;

Passo 7: Inserir o segmento antes ou após o seu vizinho mais próximo já inserido na rota, ou do último segmento inserido na rota, conforme a rota seja menor;

Passo 8: Considerar a sequência da rota:  $C_1, C_2, C_3, \dots, C_{(n-1)}, C_n$ .

A HR1 define o depósito como ponto inicial e final da rota, pois todos os veículos terão que iniciar a rota no depósito e, ao final do percurso, retornar ao mesmo. Além disso, o ponto mais próximo do depósito, considerando deve ser o primeiro a ser percorrido, após a saída do veículo do depósito.

Considera-se o primeiro segmento imutável, apenas por uma consequência do mesmo ser o mais próximo do depósito, pois à medida que os demais segmentos

forem acrescentados na rota, não haverá como inseri-los entre o depósito e o primeiro segmento (imutável), pois este já é o mais próximo do depósito. Os demais segmentos serão inseridos na rota a partir de uma tabela formada com todos os segmentos do grupo postos em ordem crescente de suas distâncias euclidianas com relação ao primeiro segmento do grupo.

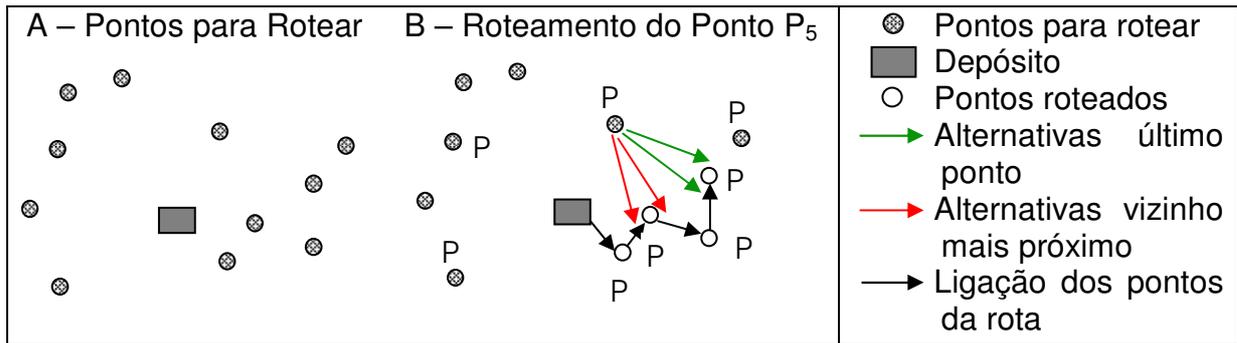
A tabela será usada considerando a distância de cada segmento ainda não inserido na rota para o primeiro segmento de entrega inserido na rota, de modo que os segmentos fiquem dispostos em ordem crescente dessa distância, conforme mostra o Quadro 6 abaixo, com  $X_1 \leq X_2 \leq X_3 \leq \dots \leq X_n$ .

ORDEM	PONTO	DISTÂNCIA (metros)
1	$K_1 C_1$	$X_1$
2	$K_2 C_2$	$X_2$
⋮	⋮	⋮
N	$K_n C_n$	$X_n$

**Quadro 6: Ilustração da tabela da HR1.**

A inserção de um dos segmentos na rota seguirá a ordem posta na tabela, e cada segmento será inserido antes ou após o seu vizinho mais próximo já inserido na rota, ou do último segmento inserido na rota, conforme a rota seja menor. Dessa forma, o primeiro segmento será o  $C_1$ ; o segundo, o  $C_2$ ; e assim por diante, até o  $C_n$ . Entretanto, a posição do segmento na tabela não implica em ter a mesma posição na rota, porque, se na tabela o segmento possui a posição vinte, poderá, dentro da rota, ocupar a 10ª posição, caso o segmento  $C_9$  seja o seu vizinho mais próximo.

A Figura 6 ilustra a HR1. Ela se divide em duas partes, a primeira, Figura 6-A, mostra os segmentos a serem roteados; a segunda, Figura 6-B, mostra como se dá o roteamento. Após a inserção dos segmentos  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  e  $P_4$ , o ponto  $P_5$ , conforme seqüência da tabela, será inserido na rota. O  $P_5$  poderá ser colocado antes ou após o ponto  $P_2$ , seu vizinho mais próximo já pertencente à rota, conforme mostram as setas vermelhas; ou antes ou depois do ponto  $P_4$  – o último ponto inserido na rota antes do ponto  $P_5$  – conforme indicam as setas verdes.



**Figura 8: Ilustração da HR1.**

### 3.1.3.2 Heurística Roteiar 2 (HR2)

Passo 1: Identificar o ponto mais próximo do depósito;

Passo 2: Tornar este ponto o primeiro ponto da rota (imutável);

Passo 3: Identificar o ponto mais distante da rota a partir do depósito;

Passo 4: Identificar o vizinho mais próximo do ponto mais distante;

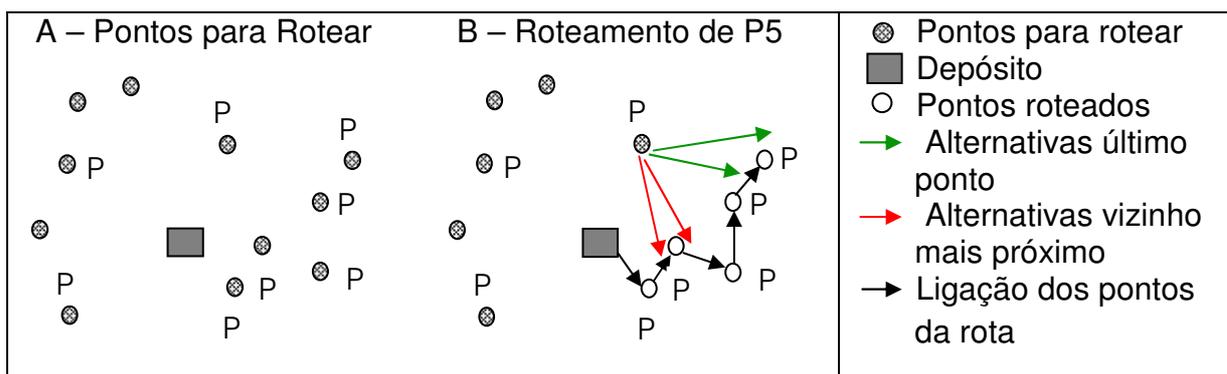
Passo 5: Inserir esse ponto antes ou após do ponto mais distante da rota ou do seu próprio vizinho mais próximo entre os pontos já inseridos na rota, conforme a rota fique com o menor tamanho;

Passo 6: Repetir os passos 3, 4 e 5 até que todos os pontos estejam na rota;

Esse modelo tem como proposta a inserção do vizinho mais próximo do ponto mais distante do depósito já inserido na rota, considerando a distância euclidiana. Entretanto, o ponto será inserido na rota antes ou após o seu próprio vizinho mais próximo entre os pontos já inseridos na rota, ou antes ou depois o último ponto da rota, conforme a rota seja menor. Esse processo continua até a inserção de todos os pontos na rota, onde o primeiro ponto da rota será  $C_1$ , o segundo  $C_2$ , e assim por diante, até o último ponto assumir a posição  $C_n$ . Enfim, deve-se localizar dentro da rota o ponto mais distante do depósito; depois, identificar entre os pontos ainda não inseridos na rota, o vizinho mais próximo do ponto mais distante do depósito, para, então, inseri-lo antes ou após o seu próprio vizinho mais próximo, ou antes ou após o ponto mais distante do depósito na rota.

A HR1 diverge da HR2 quanto a seqüência de inserção dos segmentos, pois enquanto a primeira insere os pontos considerando a ordem crescente da distância dos pontos para o depósito; a segunda insere os pontos na rota seguindo o vizinho mais próximo do ponto mais distante do grupo.

A Figura 7-A, a seguir, mostra o depósito e os segmentos a serem roteados. A Figura 7-B mostra as alternativas de inserção do ponto  $P_5$ : Antes ou depois do seu vizinho mais próximo já inserido na rota, o ponto  $P_2$ ; e antes ou depois do último ponto da rota, o ponto  $P_6$ . Observa-se que, diferente da HR1, no momento de inserir o ponto  $P_5$ , o ponto  $P_6$  já pertence à rota. Isso ocorre porque a HR2, insere os pontos considerando o vizinho mais próximo do último ponto da rota, enquanto que o outro modelo propõe inserções considerando a ordem crescente dos pontos com relação ao depósito.



**Figura 9: Ilustração da HR2.**

### 3.1.3.3 Heurística Rotear 3 (HR3)

Passo 1: Somar todos os trechos de cada rota;

Passo 2: Dividir, em cada rota, o total da soma dos trechos ( $S$ ) pelo total de pontos da rota ( $PR$ ) multiplicado por trinta, obtendo o resultado  $K_x = S/30PR$ , onde as rotas são dadas por  $X=1, 2, 3, \dots, x$ ;

Passo 3:  $Zx_i = K_x \cdot L_i$ , onde  $L_i = 1, 2, 3, \dots, n$ ;  $i = 1, 2, 3, \dots, n$

Passo 4: Calcular a distância entre o depósito e todos os outros pontos da rota;

Passo 5: Elaborar uma tabela colocando os pontos em ordem crescente da distância calculada, considerando o depósito o primeiro ponto da tabela ( $P_0$ )

Passo 6: Fazer cada ponto um segmento, inclusive o depósito;

Passo 7: Calcular  $Zx_i$

Passo 8: Escolher o primeiro ponto da tabela;

Passo 9: Identificar, entre os pontos da tabela, o vizinho mais próximo do segmento ao qual pertence o ponto escolhido, considerando apenas os pontos extremos do segmento;

Passo 10: Comparar a distância  $d$  entre os vizinhos mais próximos e  $Zx_i$

10.1. Se  $d \leq Zx_i$ , unir os segmentos a partir dos vizinhos mais próximos;

10.1.1. Excluir da tabela os pontos internos do novo segmento, preservando apenas os pontos extremos;

10.1.2. Repetir os itens 9 e 10 para o novo segmento formado

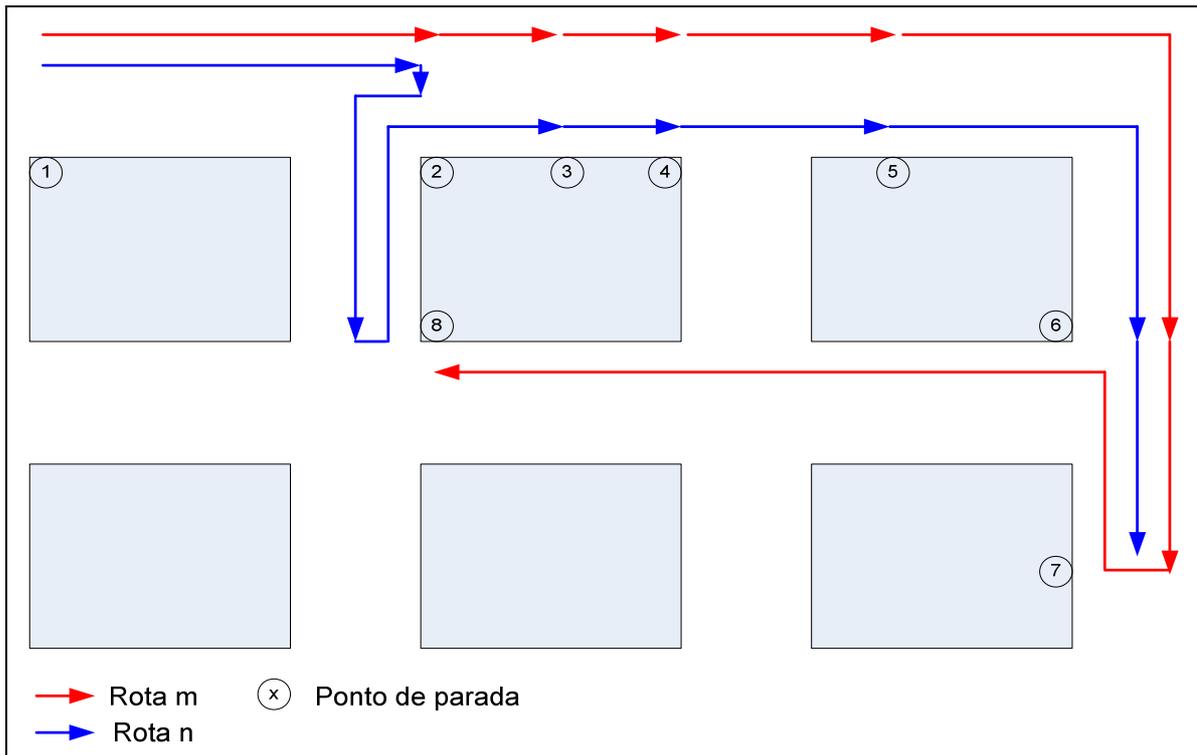
10.2. Caso contrário, seguir para o item 11

Passo 11: Repetir os procedimentos 8, 9, 10 e 11 para os demais pontos da tabela;

Passo 12: Repetir os procedimentos 6, 7, 8, 9 e 10 para todo  $Zx_i$  até que só haja um segmento.

Passo 13: Unir as duas extremidades do segmento

A HR3 propõe agrupar, a partir da distância euclidiana, os segmentos com base no vizinho mais próximo. Porém, sugere um agrupamento em função da distância crescente entre os segmentos, de modo que deverão ser agrupados primeiro os segmentos mais próximos; depois, os mais distantes. Pretende-se com isso evitar a situação demonstrada na Figura 8, onde a rota  $n$  se distancia do ponto 8, ao invés de seguir a lógica do vizinho mais próximo; e, por fim, faz o percurso de retorno até o ponto 8, inicialmente não colocado na rota por não ser o vizinho mais próximo do ponto 2. Enfim, o ponto 8 não é o vizinho mais próximo do ponto 2, mas a recíproca não é verdadeira, porque o ponto 2 é o vizinho mais próximo de 8. Por isso seria mais econômico se o ponto 8 fosse atendido após o ponto 2, como sugere a rota  $m$ , em azul.



**Figura 10: Paralelo entre a Heurística do Vizinho mais Próximo e HR3.**

Na HR3, Inicialmente, deve-se somar todos os segmentos de cada grupo. Em seguida, dividir o resultado da soma pelo total de pontos de parada do respectivo grupo multiplicado por 30. Assim, cria-se um fator  $Kx$  para cada grupo. Esse fator definirá o valor  $Kx_i$ , que expressa a distância máxima aceita entre o ponto de parada a ser inserido na rota e o seu vizinho mais próximo – já pertencente à rota – para que aquele possa ser acrescentado à rota. Pretende-se com isso garantir que ocorra primeiro o agrupamento dos pontos mais próximos entre si e, somente depois, é que haja o agrupamento dos pontos mais distantes.

Para que todos os pontos possam ser incluídos na rota, o fator  $Kx$  é multiplicado pelos números inteiros positivos em ordem crescente, representados por  $L_i$ , até que a rota esteja concluída, com todos os pontos roteirizados.

Do produto de  $L_i$  com  $Kx$ , tem-se  $Zx_i$ , cujo valor é o verdadeiro limitador para a inclusão ou não do ponto, pois, se a distância for maior do que  $Zx_i$ , o ponto não será incluído imediatamente, mas somente depois, quando o valor de  $Zx_i$  for menor ou igual à distância entre o ponto e o seu vizinho mais próximo.

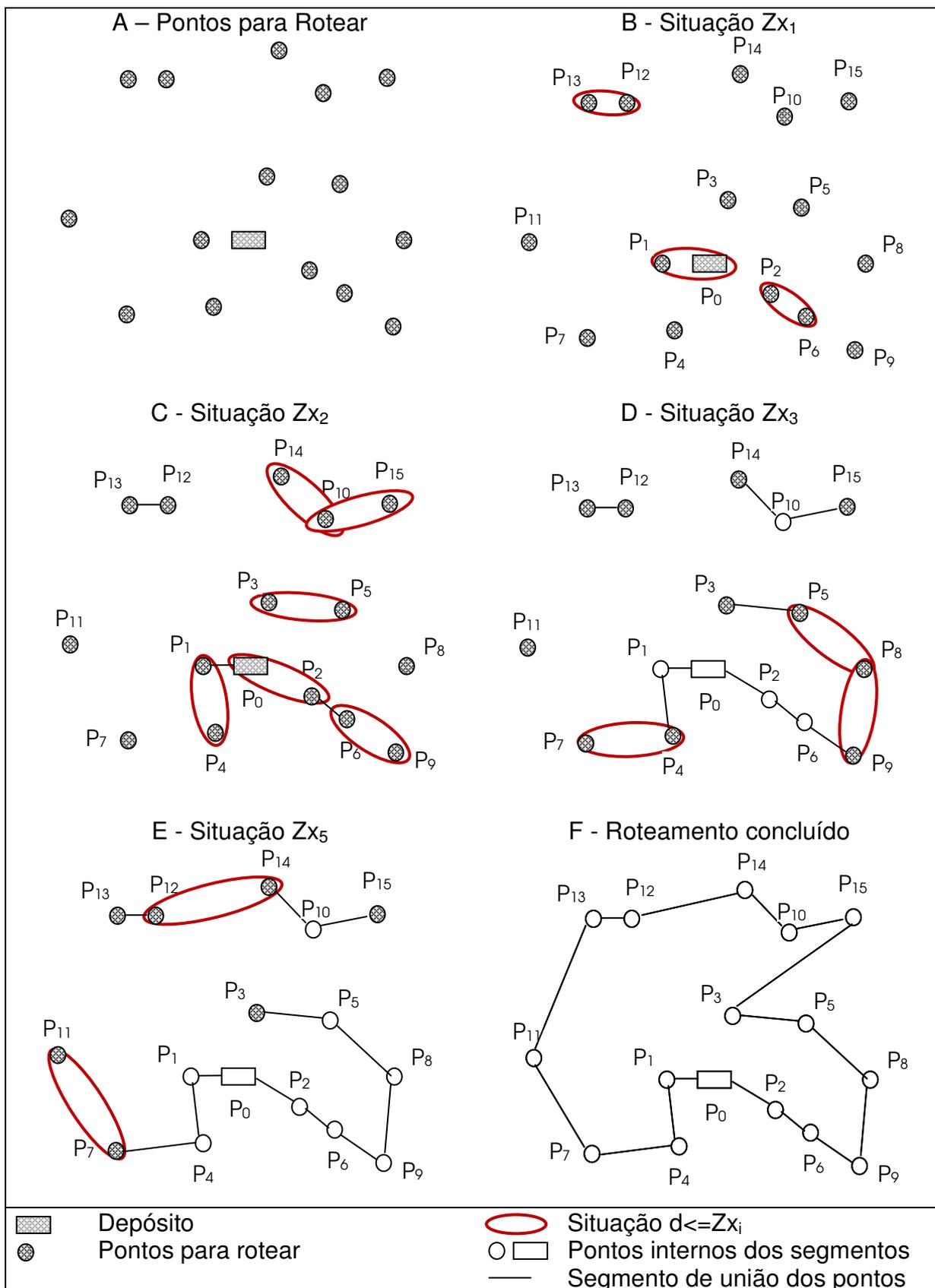
Antes de iniciar a roteirização propriamente dita, o modelo pede que seja elaborada a tabela com todos os pontos daquele grupo, dispondo os mesmos em ordem crescente da suas distâncias ao depósito.

O primeiro ponto a ser percorrido após a saída do depósito é o primeiro ponto da tabela, pois é o mais próximo do depósito.

A partir de então, deve-se fazer a união do segmento ao qual pertence o ponto escolhido – inicialmente o primeiro ponto da tabela – com o segmento ao qual pertença o vizinho mais próximo do ponto escolhido, desde que a distância entre os segmentos, considerando apenas os pontos extremos, seja menor do que o  $Zx_i$ . Caso a restrição seja satisfeita, os segmentos serão unidos a partir dos pontos extremos mais próximos. Os pontos internos do novo segmento serão excluídos da tabela, permanecendo na mesma apenas os pontos extremos do segmento. Em seguida, repete-se para o novo segmento os procedimentos de busca do vizinho mais próximo e análise da restrição da distância.

Entretanto, quando a condição não é satisfeita, deve-se passar para o próximo ponto da tabela, até que se percorra todos os pontos para o  $Zx_i$  em questão; ou seja, testa-se toda a tabela para  $Zx_1$ , depois para  $Zx_2$ , até que só haja um único segmento. A HR3 finaliza com a união dos pontos extremos do segmento final.

A Figura 9 exemplifica o HR3 em seis fases. A Figura 9-A mostra o depósito e os pontos a serem roteados. A Figura 9-B mostra as indicações de união dos pontos a partir de  $Kx_1$ . A Figura 9-C mostra as uniões decorrentes de  $Kx_1$  e as indicações de união decorrentes de  $Kx_2$ . A Figura 9-D mostra as uniões decorrentes de  $Kx_2$  e as indicações de união decorrentes de  $Kx_3$ . A Figura 9-F mostra o roteamento final. Observa-se na Figura 9 que a ordem da tabela não é a mesma na rota, pois o ponto  $P_3$ , por exemplo, ficou depois do ponto  $P_5$ .



**Figura 11: Ilustração da HR3.**

## 4 Experimentos computacionais

Neste capítulo serão mostrados os resultados obtidos com aplicação das heurísticas propostas: HD1, HD2, HR1, HR2 e HR3.

### 4.1 Heurísticas de Dividir

Os algoritmos para a formação de grupos – HD1 e HD2 – foram aplicados no cenário que abrangeu a faixa de CEP de 60115-000 à 60170-999 da cidade de Fortaleza, que equivale às áreas dos CDDs Aldeota e Praia Leste, conforme está especificado no Apêndice A.

Os dados referentes aos tempos aplicados na montagem dos grupos foram tirados dos arquivos do SDE, cujo levantamento ocorreu em 2008, embora sua implantação não tenha se realizado. Em 2008, foram propostos dois grupos de veículos: o primeiro iniciando suas atividades às 08:00, de modo a distribuir a carga local e os objetos PAC provenientes das LTNs; e o segundo grupo iniciando suas atividades somente às 10:00, afim de distribuir os objetos de origem nacional, recebidos através da RPN.

Optou-se por utilizar os tempos do primeiro grupo por representar uma carga de trabalho menor, o que implica em tempos de trecho menores, abaixo dos 80 minutos considerados ideais para o melhor desempenho dos algoritmos.

Com relação ao tempo improdutivo e o tempo de atividades internas, optou-se por estabelecer um valor aleatório fixo para ambos de 115 minutos, independente do grupo formado. Assim, o tempo total, que varia 5% para mais e para menos com relação aos 480 minutos, ou seja, pode ficar entre 456 e 504 minutos. Considerando apenas o tempo externo, efetivamente utilizado na distribuição domiciliar, deverá ficar entre 341 e 389 minutos.

O tempo total previsto é de 1459 minutos. Dividindo-se esse valor por 365 (=480-115), tem-se como resultado a quantidade a ser montada de grupos: 4 grupos com tempo de atividade externa média de 365 minutos

#### **4.1.1 Resultados de HD1**

Na heurística HD1, estabeleceu-se que fossem feitas 5 tentativas de inserção de novos segmentos no grupo, sempre que este atingisse o limite inferior de tempo, ou seja, a soma dos segmentos alcançasse o valor acumulado de 341 minutos, que representa o tempo total mínimo de 456 minutos, menos o tempo improdutivo e o tempo de atividades internas definidos pelo valor fixo de 115 minutos. Contudo, o limite de 5 segmentos é questionável, pois, se por um lado evita que seja acrescentado segmentos distantes dos já inseridos no grupo, por outro, impede que segmentos menores consecutivos possam ser inseridos no grupo. Isto foi evidenciado na formação dos grupos 1 e 2 de HD1, onde se poderia acrescentar trechos pequenos cuja localização era circunvizinha ao grupo, mas não realizou por atingir o limite das 5 inserções.

A distribuição dos CEPs por grupo pode ser observado no Apêndice B, onde se observa que o grupo 1 foi formado com 53 segmentos, totalizando um tempo de 469,03 minutos; o grupo dois, com 76 segmentos e tempo total de 468,51 minutos; o grupo 3 finalizou com 43 segmentos e 493,46 minutos de tempo total; e, por fim, o grupo 4, com 69 segmentos e tempo de 487,99 minutos.

Os resultados da aplicação de HD1 com base nos dados do Apêndice A pode ser visualizado na Figura 10, onde os grupo 1, 2, 3 e 4 estão representados pelas cores violeta, laranja, verde e azul, respectivamente.

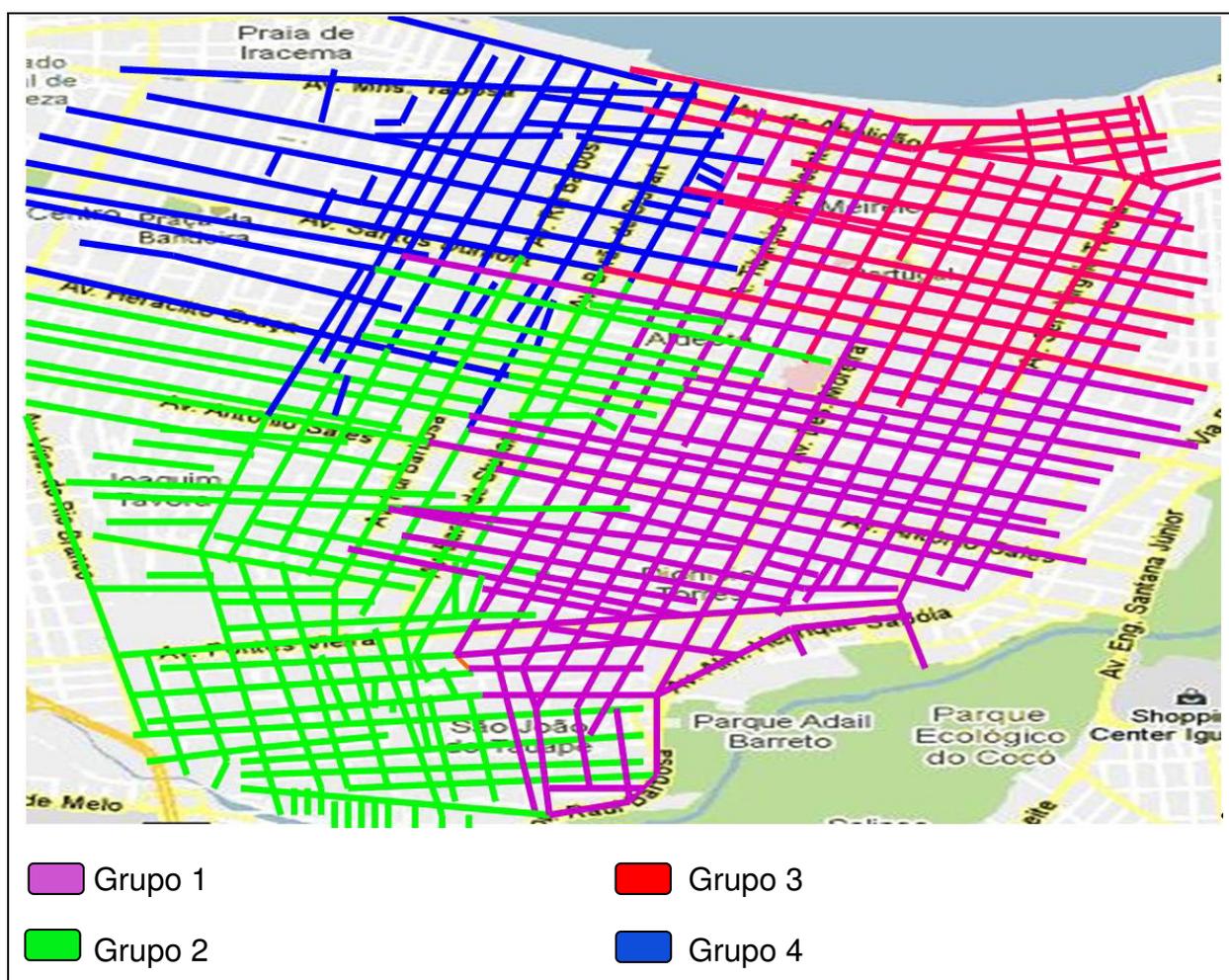
Os grupos iniciaram a partir de um segmento determinado pela heurística HD1. Dessa forma, o grupo 1 foi iniciado na Rua Professor Aderbal Nunes Freire, CEP 60135-590; o grupo 2, na Rua Escrivão Pinheiro, 60120-390; o grupo 3, Rua



Embora o grupo 4 não tenha atingido o tempo mínimo de 456 minutos, deve-se considerar como sucesso a elaboração dos grupos, pois o ajuste dos grupos poderiam acontecer posteriormente, sem maiores problemas.

A distribuição dos CEPs por grupo pode ser observada no Apêndice C. A Figura 11 faz a ilustração dos grupos no mapa da região, onde as cores violeta, verde, vermelha e azul representam os grupos 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

Cada grupo foi iniciado a partir de um segmento específico, determinado a partir do algoritmo. Assim, o grupo 1 foi iniciado na Rua Professor Aderbal Nunes Freire, CEP 60135-590; o grupo 2, na Rua Evaristo Reis, 60130-600; o grupo 3, na Rua Júlio Abreu, 60160-240; e, finalmente, o grupo 4 foi iniciado na Rua Joaquim Nabuco cujo CEP é 60125-120.



**Figura 13: Ilustração da aplicação de HD2**

## 4.2 Resultados das Heurísticas Rotear

Na aplicação das heurísticas HR1, HR2 e HR3 utilizou-se dois roteiros reais realizados por carteiros distintos, em dias diferentes. Ambos representam a distribuição do período da manhã, considerando que o CEE Fortaleza tem como método de distribuição duas saídas diárias partindo do depósito.

A rota 1 foi realizada pelo distrito 29, no dia 05/08/2010, e a rota 2 foi realizada pelo distrito 2, no dia 11/08/2010. Os dados referentes ao grupo 1 estão representados na Tabela 1, e os dados do grupo 2, na Tabela 2.

A primeira coluna, ordem do carteiro – OC, representa a ordem de percorrida realizada pelo carteiro. A segunda, a terceira e a quarta coluna representam o endereço dos pontos de entrega, indicando, respectivamente, o CEP, o logradouro e o número. A coluna 5 indica a extensão do trecho em metros, ou seja, a tamanho do logradouro que o CEP representa, conforme seja o logradouro todo ou parte deste. A coluna 6, distância 1, mostra a distância euclidiana, em metros, entre o depósito (CTCE) e cada ponto de entrega. Por último, a coluna 7, distância 2, indica a distância, em metros, entre o ponto de entrega mais próximo e os demais pontos de entrega, também considerando a distância euclidiana.

Note-se que a coluna 5 extensão será utilizada em HR3, pois esta exige o somatório dos trechos do grupo; a coluna 6 será aplicada em HR2, porque os pontos de entregas são inseridos na rota conforme a sua distância com o depósito; e a coluna 7 servirá de base para a heurística HR1, pois esta é regida pela distância entre o ponto de entrega mais próximo do depósito e os demais pontos de entrega

Ressalte-se que o x na coluna 5 indica que aquele logradouro já possui ponto de entrega. Dessa forma, evita-se a duplicidade de soma dos trechos que tenha mais de um ponto de entrega.

Acrescente-se que, na Tabela 1, a soma da extensão dos segmentos é de 18.916 metros, e de 17.014 metros, na Tabela 2. Valores que servirão de base para HR3.

**Tabela 1 – Dados do grupo 1**

OC	CEP	LOGRADOURO	Nº	EXTENSÃO	DISTÂNCIA 1	DISTÂNCIA 2
1	60110-371	Rua Antônio Augusto	2561	1322	7492	791
2	60115-001	Rua Ildefonso Albano	2395	783	7031	702
3	60135-100	Avenida Antônio Sales	256	1384	7357	1106
4	60135-000	Rua Rocha Lima	483	1608	7659	1379
5	60140-060	Avenida Heráclito Graça	406	1948	7964	1665
6	60135-080	Rua Joaquim Torres	74	1058	7484	1378
7	60135-040	Rua Padre Valdevino	667	1493	7372	1186
8	60115-000	Rua Ildefonso Albano	2001	2346	7301	1007
9	60135-000	Rua Rocha Lima	1140	x	7388	923
10	60135-100	Avenida Antônio Sales	956	x	6820	532
11	60115-200	Rua Benedito Prata	5	80	6830	605
12	60140-000	Rua Bárbara de Alencar	1805	1335	6810	806
13	60150-030	Avenida Rui Barbosa	2055	925	6881	623
14	60120-002	Avenida Barão de Studart	2360	1259	6434	290
15	60115-282	Rua José Lourenço	2650	741	6318	0
16	60115-191	Rua Monsenhor Bruno	2346	1353	6708	419
17	60115-171	Rua Carlos Vasconcelos	2520	1281	6636	401

**Tabela 2 – Dados do grupo 2**

OC	CEP	LOGRADOURO	Nº	EXTENSÃO	DISTÂNCIA 1	DISTÂNCIA 2
1	60135-460	Rua Israel Bezerra	1057	787	5120	0
2	60135-460	Rua Israel Bezerra	1010	x	5140	45
3	60120-110	Rua São Gabriel	27	317	5301	171
4	60130-241	Avenida Pontes Vieira	2551	1380	5269	660
5	60170-190	Rua Araken Silva	103	353	5325	713
6	60170-002	Av. Desembargador Moreira	2565	971	5600	1045
7	60135-460	Rua Israel Bezerra	465	x	5448	555
8	60135-430	Rua Francisco Gonçalves	482	1204	5442	418
9	60135-420	Rua Henriqueta Galeno	586	1173	5607	474
10	60135-280	Rua Tertuliano Potiguara	2201	1472	5649	541
11	60135-280	Rua Tertuliano Potiguara	1313	x	5742	571
12	60135-270	Rua Vicente Linhares	1415	1480	5695	645
13	60175-020	Rua Fonseca Lobo	1444	992	5829	765
14	60175-000	Rua Monsenhor Catão	1200	1557	5995	901
15	60175-000	Rua Monsenhor Catão	1070	x	6122	1041
16	60170-241	Rua Coronel Linhares	2255	1212	5652	631
17	60150-162	Avenida Santos Dumont	3850	1137	6357	1321
18	60150-100	Rua Eduardo Garcia	735	1173	6237	1138
19	60140-200	Rua Paula Ney	960	1023	5997	975
20	60150-100	Rua Eduardo Garcia	1051	x	6101	1093
21	60175-060	Rua Marechal Rondon	4060	783	6290	1314

A Tabela 3 mostra a ordem do percurso realizado pelo carteiro e a ordem dos percursos propostos por HR1, HR2 e HR3, nas duas variações: horário (H) e anti-

horário (AH), bem como as respectivas distâncias para a realização dos percursos. Note-se que, as colunas de 6 a 10 são mostradas as distâncias reais entre o ponto de parada da respectiva linha e o ponto imediatamente anterior e, na última linha, a distância total para a realização de cada percurso. Assim, para melhor entendimento, a distância real percorrida pelo carteiro de Z até o ponto A foi de 10.518,26 metros, e o percurso total realizado pelo carteiro foi de 30.690,44 metros.

**Tabela 3 – Ordem e distância dos percursos no grupo 1**

ORDEM DO PERCURSO					DISTÂNCIA ENTRE PONTOS (METROS)				
Carteiro	HR1	HR2	HR3H	HR3AH	Carteiro	HR1	HR2	HR3H	HR3AH
Z	Z	Z	Z	Z	0	0	0	0	0
A	O	O	O	H	10518,26	9384,85	9384,85	9384,85	10279,2
B	N	N	N	I	219,79	642,57	642,57	642,57	107,27
C	L	Q	L	F	778,26	1070,14	849,68	1070,14	1375,81
D	M	A	M	E	862,51	409,42	622,72	409,42	1007,11
E	H	C	K	D	975,02	747,53	537,22	357,55	423,1
F	I	F	J	G	979,1	107,27	543,12	722,85	698,64
G	K	E	P	C	921,44	935,44	1007,11	593,76	494,54
H	J	D	Q	A	893,79	722,85	423,1	794,94	443,9
I	P	G	B	B	107,27	593,76	698,64	591,85	219,79
J	Q	B	A	Q	598,48	794,94	971,23	248,3	540,9
K	B	P	C	P	266,36	591,85	512,3	537,22	378,95
L	A	J	G	J	894,5	248,3	383,96	401,79	383,96
M	C	I	D	K	409,42	537,22	1027,7	719,8	266,36
N	G	H	E	M	587,93	401,79	392,03	975,02	402,04
O	D	K	F	L	550,59	719,8	937,4	979,1	922,3
P	E	L	I	N	561,57	975,02	894,5	1173,15	917,17
Q	F	M	H	O	794,94	979,1	409,42	392,03	550,59
Z	Z	Z	Z	Z	9771,21	10540,9	9383,76	10071	9396,16
<b>DISTÂNCIA ACUMULADA</b>					<b>30690,44</b>	<b>30402,71</b>	<b>29621,31</b>	<b>30065,36</b>	<b>28807,75</b>
<b>COMPARAÇÃO COM O CARTEIRO</b>					<b>0</b>	<b>-287,73</b>	<b>-1069,13</b>	<b>-625,08</b>	<b>-1882,69</b>
<b>DIFERENÇA EM PERCENTUAL</b>					<b>0</b>	<b>-0,94</b>	<b>-3,48</b>	<b>-2,04</b>	<b>-6,13</b>

Observa-se que a diferença entre as soluções é pequena: HR1 obteve 0,94% de economia com relação ao carteiro, o que representa 287,73 metros; HR2 alcançou 1.069,13 metros de economia, que implica em 3,48% com relação ao carteiro, representando o segundo melhor desempenho; HR3H conseguiu uma economia de 2,04% com relação ao carteiro, que significa 625,08 metros; e, por fim, a economia mais expressiva foi demonstrada por HR3AH, que representou 6,13%

da distância percorrida originalmente pelo carteiro, o que representa 1.882 metros. Deve-se considerar, entretanto, que o percurso improdutivo é muito alto, com a média de 19.623 metros, o que representa 65,59% do percurso médio total, no caso, 29.918 metros. Isso implica em dizer que as possibilidades de economia percentual na distribuição diminuem consideravelmente, pois aproximadamente 66% do percurso é apenas para chegar à área de atuação do carteiro. Conseqüentemente, se um dos acessos à área é obviamente mais próximo do depósito, então as diferenças no percurso improdutivo não influenciarão de modo significativo no resultado, embora apresentem valores diferentes. Assim, se fosse feita a opção de ser considerado como parâmetro de ganho apenas a área percorrida com efetiva distribuição, os resultados seriam mais significativos, porém, não traduziriam os resultados globais de cada método proposto.

A Tabela 4 possui a mesma formatação da Tabela 3; porém, seus dados se referem ao percurso do carteiro no grupo 2 e à aplicação de HR1, HR2 e HR3 (nas duas variações: H e AH) ao mesmo grupo

**Tabela 4 – Ordem e distância dos percursos no grupo 2**

ORDEM DO PERCURSO					DISTÂNCIA PERCORRIDA (METROS)				
Carteiro	HR1	HR2	HR3H	HR3AH	Carteiro	HR1	HR2	HR3H	HR3AH
Z	Z	Z	Z	Z	0	0	0	0	0
A	A	A	F	A	6901,51	6901,51	6901,51	8432	6901,51
B	B	B	E	B	45,71	45,71	45,71	1620,21	45,71
C	C	C	D	C	179,98	179,98	179,98	466,4	179,98
D	K	J	H	S	1102,69	846,68	807,82	800	1425,15
E	M	G	I	T	128,84	214,32	320,16	570,01	200,73
F	N	I	G	U	739,33	172,65	420,43	321,47	86,78
G	S	H	J	Q	866,68	536,15	258,32	372,5	449,34
H	U	D	L	R	302,98	181,76	424,32	385,16	731,65
I	T	E	K	P	570,01	72,85	128,84	96,94	286,41
J	Q	F	M	O	409,28	429,15	739,33	214,32	251,81
K	R	L	N	N	482,81	731,65	1528,8	172,65	418,52
L	P	K	O	M	96,94	286,41	96,94	251,81	171,96
M	O	M	P	K	214,87	251,81	214,32	286,41	214,32
N	L	N	R	L	172,65	617,2	172,65	606,84	96,94
O	J	O	Q	J	251,81	371,54	251,81	386,77	371,54
P	I	P	U	G	139,23	281,19	286,41	388,75	320,16
Q	D	R	T	I	326,06	517,73	606,84	72,85	420,43
R	E	Q	S	H	731,65	128,84	386,77	194,18	258,32
S	F	T	C	D	424,66	739,33	366,67	1342,87	424,32
T	H	U	B	E	200,73	302,98	181,76	179,98	128,84
U	G	S	A	F	86,78	274,93	199,14	517,27	739,33
Z	Z	Z	Z	Z	8545,53	7546,85	8242,05	7207,93	8242,05
<b>DISTÂNCIA ACUMULADA</b>					<b>22920,73</b>	<b>21631,22</b>	<b>22760,58</b>	<b>24887,32</b>	<b>22365,80</b>
<b>COMPARAÇÃO COM O CARTEIRO</b>					<b>0,00</b>	<b>-1289,51</b>	<b>-160,15</b>	<b>1966,59</b>	<b>-554,93</b>
<b>DIFERENÇA EM PERCENTUAL</b>					<b>0,00</b>	<b>-5,63</b>	<b>-0,70</b>	<b>8,58</b>	<b>-2,42</b>

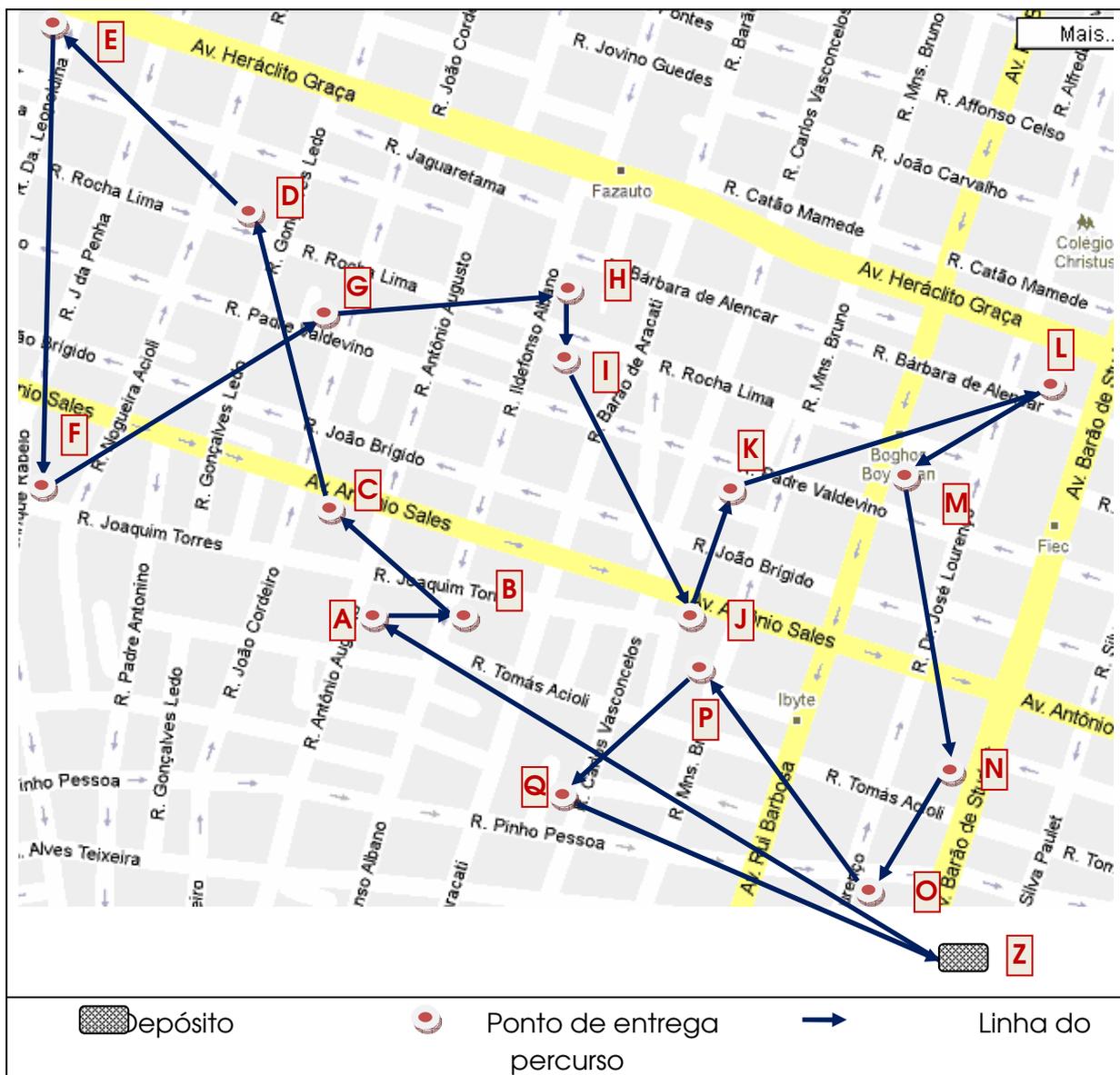
Os resultados da aplicação dos métodos propostos no grupo 2 foram um pouco piores do que os resultados conquistados no grupo 1. HR1 apresentou o melhor desempenho, pois apresentou economia de 1.289,51 metros com relação ao percurso do carteiro, o que representa 5,63% de ganho. HR2 economizou apenas 160,15 metros, representando menos de 1% de economia. HR3H apresentou o pior resultado, pois resultou em um percurso 8,58% maior do que o do carteiro, o que significa um acréscimo de 1.966,59 metros. Por fim, HR3AH, que apresentou o melhor resultado no grupo 1, mostrou uma economia com relação ao carteiro de apenas 2,42%, ou 554,93 metros. Os percursos para o grupo 2 também apresentaram percurso improdutivo elevado, em média de 66% do percurso total, o que, como já explicado, caso exista um caminho de acesso à área de distribuição

obviamente mais curto, implica numa maior dificuldade para propor distritos percentualmente mais econômicos.

#### **4.2.1 Percurso do carteiro**

Os percursos realizados pelos carteiros nos grupos 1 e 2 estão ilustrados, através das linhas em cor azul, nas Figuras 12 e 13, respectivamente. Deve-se salientar que a representação do depósito, identificado pela letra Z, é simbólica, no sentido de que o mesmo está localizado a vários quilômetros de distância da área mostrada nas figuras, conforme pode ser observado na coluna 6 das Tabelas 1 e 2.

O percurso realizado pelo carteiro no grupo 1 foi de 30.690,44 metros, conforme Tabela 3.



**Figura 14: Ilustração do percurso do carteiro no grupo 1**

A Figura 13 ilustra o percurso realizado pelo carteiro no grupo 2 que, conforme Tabela 4, a distância percorrida pelo carteiro para sua realização foi de 22.920,73 metros.



**Figura 15: Ilustração do percurso do carteiro no grupo 2**

#### 4.2.2 Resultados de HR1

Conforme Figura 14, HR1 aplicado no grupo 1 propõe o percurso em sentido anti-horário, diferente do carteiro que fez o percurso em sentido horário, tornando os percursos parecidos, porém em sentidos inversos.

O percurso proposto por HR1 é, conforme Tabela 3, de 30.402,71 metros, tornando-o menor 287,73 metros do que o percurso do carteiro para o mesmo grupo.



**Figura 16: Ilustração da aplicação de HR1 ao grupo 1**

A Figura 15 mostra HR1 aplicado ao grupo 2 que, embora inicialmente faça o percurso igual ao do carteiro, muda a partir do ponto de entrega da Rua São Gabriel, representado pelo ponto C, resultando em uma proposta de percurso em sentido anti-horário, diferente do carteiro que realizou em sentido horário.

De acordo com a Tabela 4, HR1 aplicado no grupo 2 resultou em um percurso de 21.631,22 metros, menor do que o percurso realizado pelo carteiro em 1.289,51 metros.

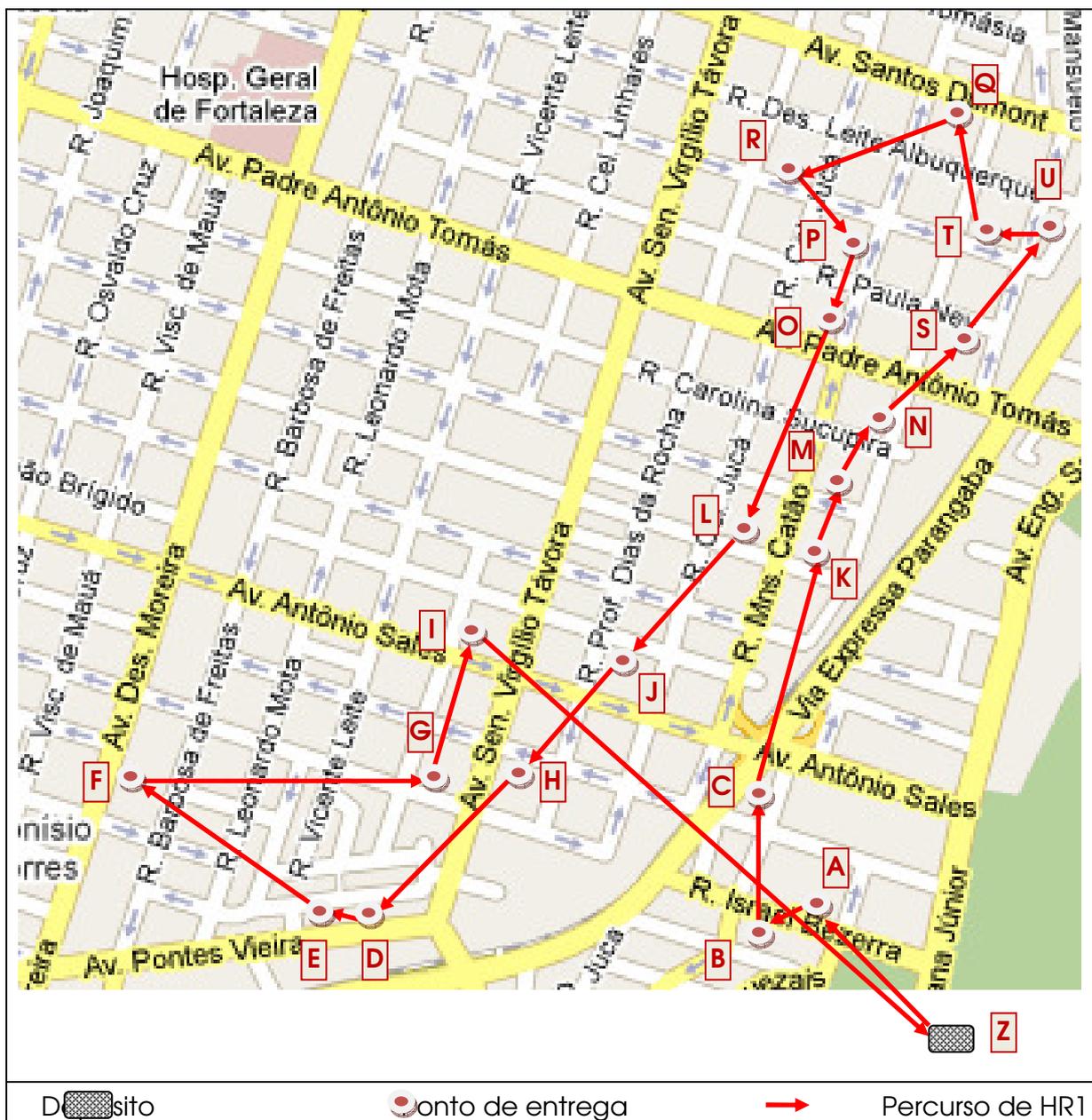
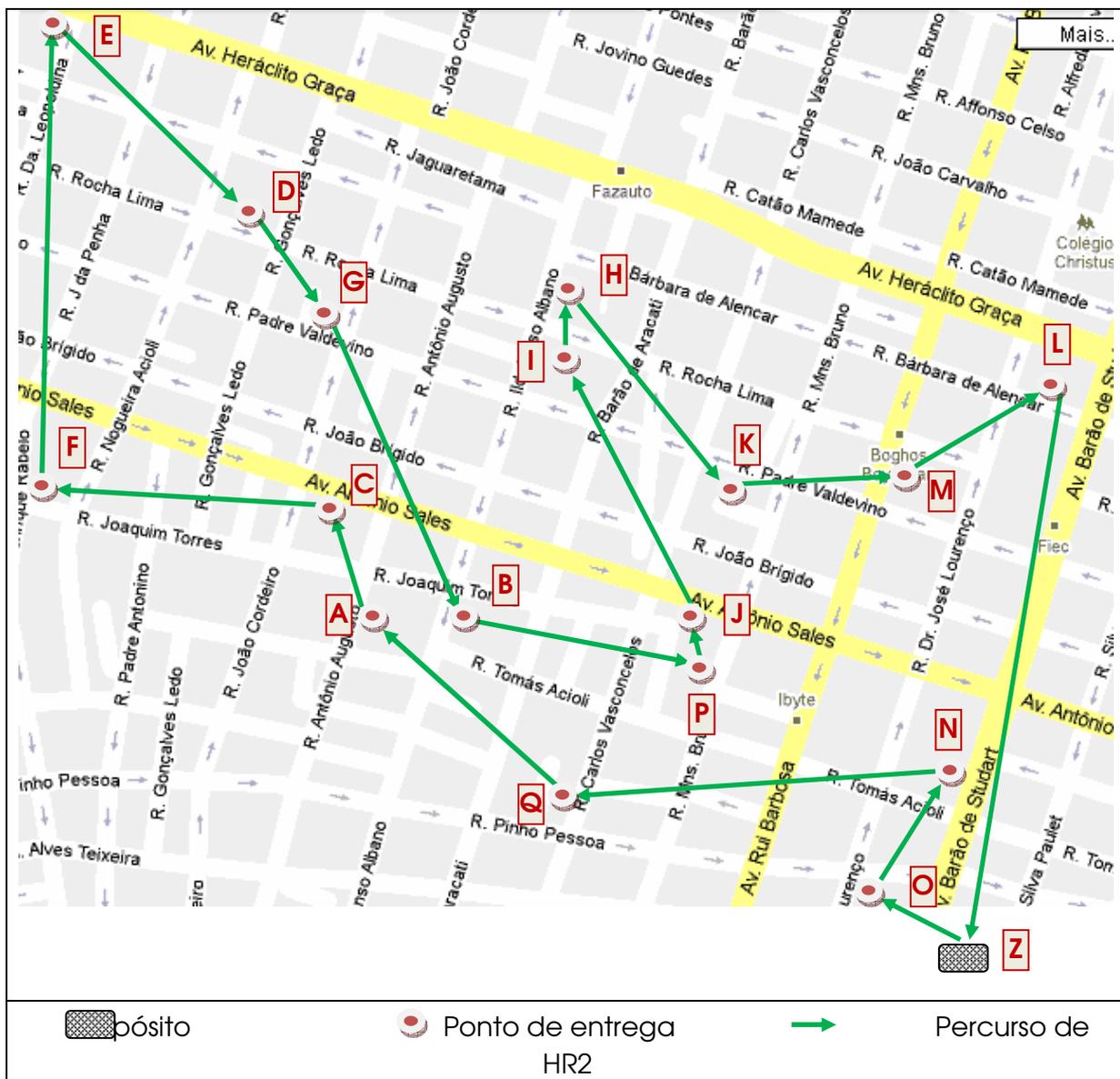


Figura 17: Ilustração da aplicação de HR1 no grupo 2

#### 4.2.3 Resultados de HR2

A Figura 16 ilustra a HR2 aplicado ao grupo 1, onde as linhas verdes representam o percurso proposto. De acordo com a Tabela 3, o percurso proposto por HR2 para o grupo 1 é de 29.621,31 metros. Assim, o percurso proposto por HR2

é menor do que o realizado pelo carteiro em 1.069,13 metros, e 781,40 metros menor do que o percurso proposto por HR1.



**Figura 18: Ilustração da aplicação de HR2 ao grupo 1**

HR2 aplicado ao grupo 2, conforme ilustra a Figura 17, resultou em um percurso de 22.760,58 metros, de acordo com a Tabela 4. HR2, comparado ao percurso realizado pelo carteiro, apresentou um ganho de 160,15 metros. Porém, no grupo 2, HR2 apresentou resultado inferior à HR1, onde a diferença foi de 1.129,36 metros.

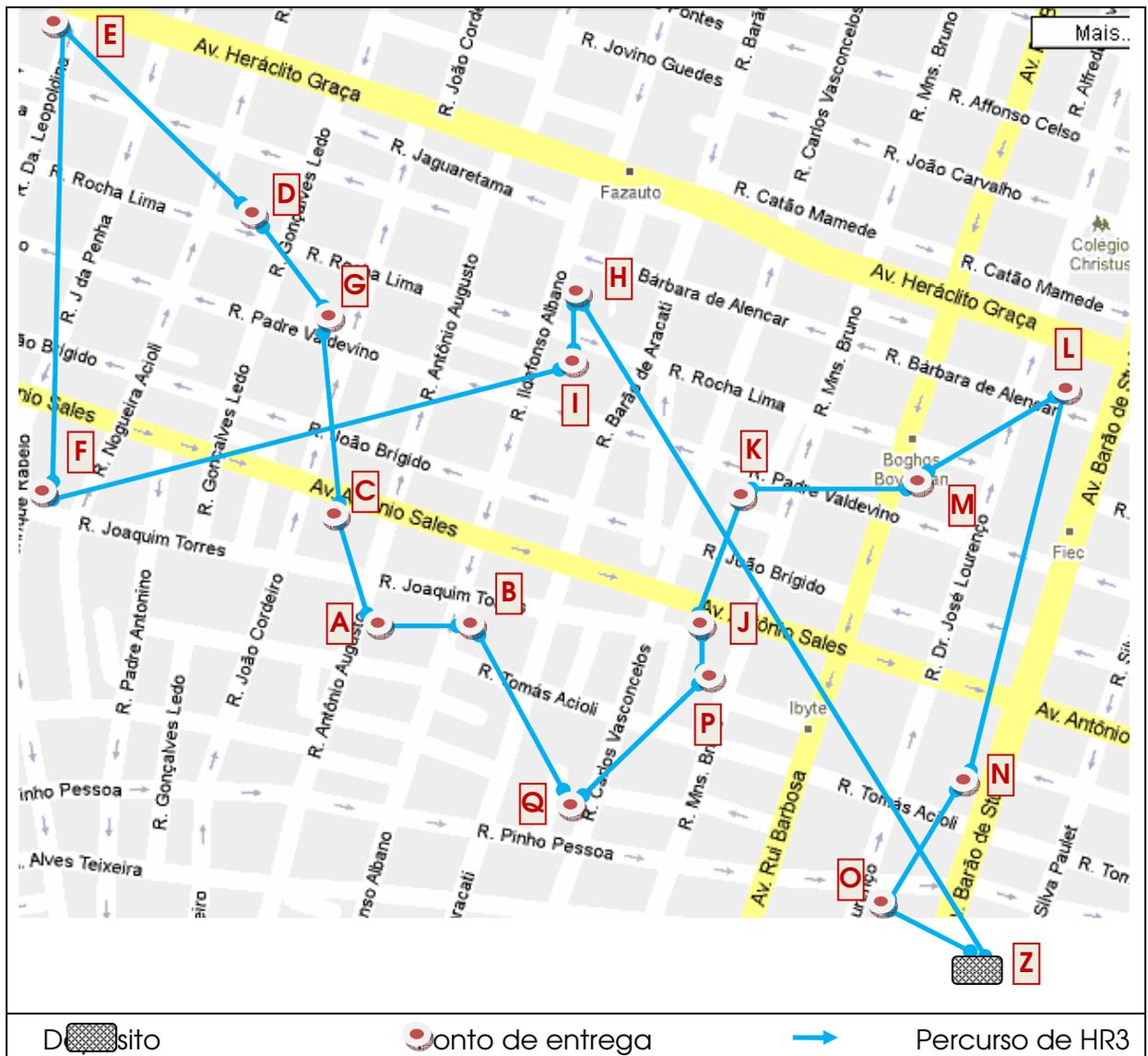


**Figura 19: Ilustração da aplicação de HR2 no grupo 2**

#### 4.2.4 Resultados de HR3

A Figura 18 ilustra HR3 aplicado ao grupo 1, onde as linhas em cor azul ciano representam o percurso proposto. Como HR3 não define a direção do percurso, entende-se que o percurso pode ser iniciado do depósito para o ponto O ou do depósito para o ponto H. Conforme a Tabela 3, o percurso iniciado pelo ponto O

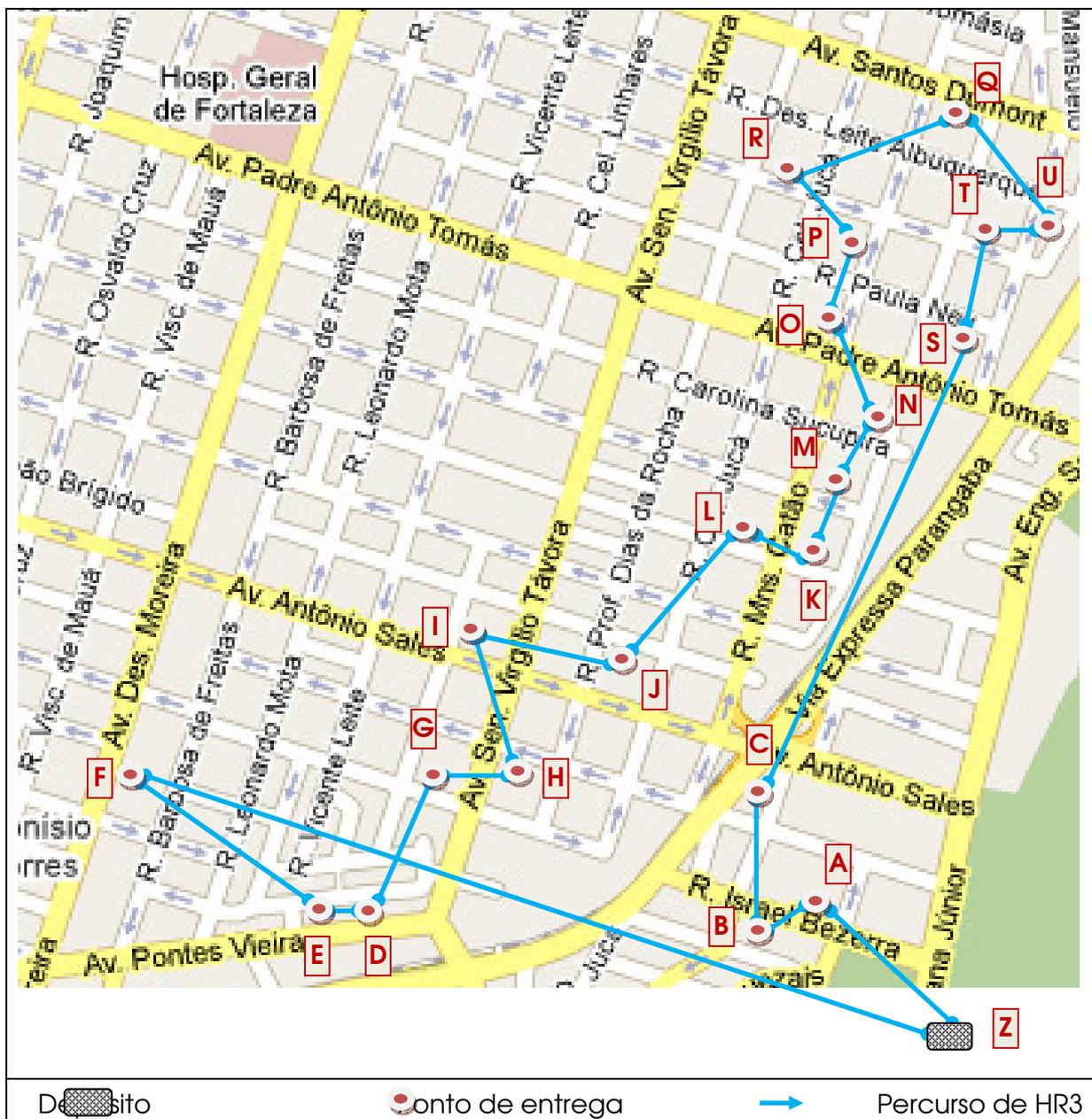
apresenta a distância a ser percorrida de 30.065,36 metros, enquanto que, se iniciado pelo ponto H, a distância proposta é 28.807,75 metros.



**Figura 20: Ilustração da aplicação de HR3 ao grupo 1**

A Figura 19 ilustra a aplicação de HR3 ao grupo 2. Considerando que essa heurística não estabelece o sentido do percurso, fez-se a medição de ambas alternativas. De acordo com a Tabela 4, o percurso em sentido horário, onde o primeiro ponto de entrega percorrido foi o ponto F, apresentou como resultado 24.887,32 metros, sendo pior do que o percurso em sentido anti-horário, cujo primeiro ponto de entrega percorrido foi o ponto A, que apontou percurso de 22.365,80 metros. Dessa forma, o resultado foi pior do que HR1, onde a diferença foi

de 734,58 metros, mas foi melhor do que o carteiro, HR2 e HR3 sentido horário, onde a diferença foi de 554,93, 394,78 e 2.521,52 metros, respectivamente.



**Figura 21: Ilustração da aplicação de HR3 ao grupo 2**

#### **4.2.5 Resultados comparativos entre o percurso do carteiro, HR1, HR2 e HR3**

Conforme a Tabela 3, considerando a distância real, a melhor proposta foi dada por HR3 em sentido anti-horário: 28.807,75 metros.

Conforme a Tabela 4, considerando a distância real, a melhor proposta para o grupo 2 foi dada por HR3 em sentido anti-horário: 21.631,22 metros.

## 5 Conclusões

Os algoritmos propostos para resolver o problema específico mostraram que com base na teoria acadêmica foi possível diversificar e intensificar, de forma eficiente, a busca por boas soluções. Isto ficou comprovado com os resultados obtidos através dos experimentos práticos.

Os resultados alcançados com as técnicas propostas foram satisfatórios, tendo em vista que não dependeram da experiência de pessoas ligadas ao CEE. Estes resultados dependeram somente do refinamento, baseado nas técnicas de Pesquisa Operacional, de como alocar nos grupos o que deve ser entregue pelo Centro de Entrega de Encomendas; e, depois de dividir os grupos, de como elaborar o melhor percurso em função dos pontos de parada. Além disso, ficou comprovado que resolver o problema com estas técnicas é fazer uso da racionalidade, fundamentado nas experiências acadêmicas, as quais possuem uma lógica entrelaçada.

Em termos práticos, as técnicas propostas recorrem a várias formas de hibridização para tornar os algoritmos competitivos, eficazes e eficientes.

As técnicas propostas mostraram também que é possível ser eficiente quando comparadas com heurísticas bastante conhecidas. Isto se deve a hibridização usada em todas as heurísticas desenvolvidas neste trabalho.

Não foi possível testar os métodos de resolução do problema proposto nos problemas da literatura porque não foram encontrados dados capazes de simular o problema com estas características específicas.

Não foi possível também propor métodos que considerassem a restrição de janela de tempo ou de capacidade dos veículos, pois não foi permitido o acesso aos parâmetros utilizados pelos Correios.

A análise da evolução das soluções, desde a solução inicial até a solução final, mostrou que as heurísticas podem ser empregadas facilmente na resolução do problema no CEE. Dessa forma, as horas gastas para fazer esta atividade poderão

ser aproveitadas em outras atividades deste setor, principalmente pelo pessoal envolvido diretamente nessa tarefa.

Por tudo isso o objetivo de construir várias técnicas de resolução do problema específico foi muito válido, pois gerou um planejamento adequado com eficácia e eficiência que só depende dos dados existentes na instituição.

Outro resultado da aplicação no problema prático foi mostrar que compensa desenvolver um ou mais algoritmos testando-o em problemas práticos específicos.

Como proposta para trabalhos futuros, sugerimos:

- Incorporar novos atributos às heurísticas, como janela de tempo e restrição de capacidade do veículo. Uma sugestão seria, após a definição do melhor caminho dentro dos grupos, realocar os pontos com restrição de tempo em posições que atendessem o atributo restritivo;
- Apesar dos bons resultados mostrados pelos métodos de roteamento propostos, HR1, HR2 e HR3, estes poderiam ser testados considerando as distâncias reais e não as distâncias euclidianas, como realizado neste trabalho;
- Aplicar os métodos propostos em outros CEEs, a fim de verificar o desempenho das heurísticas propostas em realidades de outros centros de distribuição;
- E, por último, aplicar os métodos propostos em problemas de roteamento fora do ambiente dos Correios, de modo a verificar o desempenho dos mesmos em situações diversas, e compará-los com os resultados de métodos cuja aceitação é evidenciada na literatura desse tipo de problema
- Elaborar sistema computacional com intuito de gerar dados mais precisos

## Referências

ALVARENGA, Guilherme Bastos. **Um algoritmo híbrido para o problema de roteamento de veículos estático e dinâmico com janela de tempo**. 2005. 199 f. Tese (Doutorado em Ciência da Computação). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

AARTS, E. H. L.; LENSTRA, J. K. **Local Search in Combinatorial Optimization**. John Wiley & Sons Ltd., 1997, p. 1-17

ASSAD, A. A. Modeling and implementation issues in vehicle routing. **In: Vehicle Routing: Methods and Studies**, Golden, B. L.; Assad, A. A. (eds), North Holland, Amsterdam, 1988, p. 7-46.

BALLOU (2006), Ronald H. **Gerenciamento da cadeia de suprimentos/logística empresarial**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

BODIN, L.D. Twenty years of routing and scheduling. **Operations Research**, v.38, n.4, 1990, p.571-579.

BOWERSOX, CLOSS E COOPER (2006), Donald J.; CLOSS, David J.; COOPER, M. Bixby. **Gestão logística de cadeias de suprimentos**. Porto Alegre: Bookman, 2006.

CHOPRA, Sunil; MEINDL, Peter. **Gerenciamento da cadeia de suprimentos**. São Paulo: Prentice Hall, 2003.

CHRISTOPHER, Martin. **Logística e gerenciamento da cadeia de suprimentos: criando redes que agregam valor**. 2. ed. São Paulo: Thomson Learning, 2007.

CLARCK, G.; WRIGHT, J.W. Scheduling of Vehicle from a Central Depot to a Number of Delivery Points. **Operational Research**. 1964, 12, 568-581.

CORREIOS – Empresa Brasileira de Correios e Telégrafos. **História Postal**. Disponível em <<http://www.correios.com.br>>. Acesso em 29 nov. 2009.  
\_\_\_\_\_. **Manual de distribuição e coleta**. Brasília: Correios, 2005.

DORIGO, M.; MANIEZZO, V.; COLORNI, A. The Ant System: an autocatalytic optimization process. **Technical Report** 91-016 Revised. Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Milano: Itália, 1991.

FERREIRA, Aurélio Buarque de Holanda. **Novo Aurélio Século XXI**: o dicionário da língua portuguesa. 3. ed. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 2002.

FISHER, M.; JAIKUMAR, R.; WASSENHOVE, L. V. An generalized assignment heuristic for vehicle routing. **Networks**, 1981, vol. 11, pp 109-124.

GLOVER, F. **Future paths for Integer Programming and Links to Artificial Intelligence**. 1986, v. 5, p. 553–549.

GLOVER, F.; Kochenberger, G. (eds) **Handbook of Metaheuristics**. Kluwer Academic Publishers, 2002.

GOLDBARG, Marco Cesar; LUNA, Henrique Pacca L. **Otimização combinatória e programação linear**: modelos e algoritmos. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005.

GONÇALVES, Tiago L.; FAMPA, Marcia Helena Costa; SANTOS, André Gustavo dos; OCHI, Luiz Satoru. Metaheurística Busca Tabu e Programação Matemática: Uma Abordagem Híbrida Aplicada ao Problema de Programação de Tripulações. In: Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional, 31, 2008, Belém. **Anais Eletrônicos...** Belém: UNAMA, 2008. Disponível em <[http://www.sbmac.org.br/eventos/cnmac/xxxi\\_cnmac/PDF//200.pdf](http://www.sbmac.org.br/eventos/cnmac/xxxi_cnmac/PDF//200.pdf)>. Acesso em 06 jun 2010.

HOLLAND, J. H. **Adaptation in Natural and Artificial System**. Ann Arbor, Michigan: The University of Michigan Press, 1975.

KIRKPATRICK, S.; GELATT, C.D Jr.; VECCHI, M.P. Optimization by Simulated Annealing. **Science**, vol. 220, n. 4598 p. 671-680, 1983.

LIMA, Maurício Pimenta. **Custos logísticos na economia brasileira**. CENTRO DE ESTUDOS EM LOGÍSTICA (CEL), COPPEAD-UFRJ. Disponível em <[http://www.centrodelogistica.com.br/new/art\\_custos\\_logisticos\\_economia\\_brasileira.pdf](http://www.centrodelogistica.com.br/new/art_custos_logisticos_economia_brasileira.pdf)>. Acesso em: 07 mai. 2010.

MARTINS, Gilberto de A. **Manual para Elaboração de Monografias e Dissertações**. 3ª ed. São Paulo: Atlas, 2002.

MATOS, Kelma S. L. e VIEIRA, Sofia Lerche. **Pesquisa Educacional: o prazer de conhecer**. Fortaleza: Editora Demócrito Rocha, 2001.

PACHECO, Marco Aurélio Cavalcanti. **Algoritmos genéticos: princípios e aplicações**. Versão 1, 1999. Disponível em <[www.ica.ele.puc-rio.br](http://www.ica.ele.puc-rio.br)>. Acesso em 08 jun 2010.

RIBEIRO, Glaydston Mattos; DE RUIZ, Maria Dolores Villegas; DEXHEIMER, Letícia. **Programa de roteamento de veículos: aplicação no sistema de coleta dos correios**. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 21., 2001, Salvador. Anais... Salvador: FTC, 2001. 1 CD-ROM.

RIBEIRO, Celso Carneiro. **Metaheurísticas**. Versão original, 1998. Disponível em <<http://www.inf.puc-rio.br/~celso>>. Acesso em 09 mar 2008.

Ronen, D. **Perspectives on practical aspects of truck routing and scheduling**. European Journal of Operational Research, 1988, 35(2):137-145.

SOUZA, P.S. **Asynchronous organizations for multi-algorithms problems**. Pittsburgh: Carnegie Mellow University, Department of Electrical and Computer Engineering. 1993. 139p. (Tese de Doutorado).

TENKLEY, Nari Louise. **Order picking: modelos e algoritmos de roteamento**. 2008. 71 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

VERGARA, Sylvia C. **Projetos e Relatórios de Pesquisa em Administração**. 4<sup>a</sup>-ed. São Paulo: Atlas, 2003.

Wilson, E.O. e Hölldobler, B. **The ants**. Springer-Verlag, Berlin, 1990.

ZANQUETTO FILHO, Hélio; FIGUEIREDO, Liana Almeida de; MONDADORI JUNIOR, Inri João. **Os custos logísticos de uma distribuidora de alimentos não perecíveis**. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 23., 2003, Ouro Preto. Anais... Ouro Preto: UFOP, 2003. 1 CD-ROM.

### APÊNDICE A – Resultados da heurística HD1

(continua)

HEURÍSTICA DIVIDIR 1							
GRUPO 1		GRUPO 2		GRUPO 3		GRUPO 4	
CEP 1	TEMPOS	CEP 1	TEMPOS	CEP 1	TEMPOS	CEP 1	TEMPOS
60120-420	0,8342	60115-001	8,6187	60115-280	12,0043	60115-000	22,2962
60125-121	9,0396	60115-040	0	60120-000	3,1881	60115-010	0,5128
60125-140	0,6351	60115-082	9,4381	60125-020	0	60115-080	24,2915
60125-150	27,1265	60115-171	9,1085	60125-040	1,3744	60115-081	4,941
60125-151	5,792	60115-191	11,4478	60125-050	0,2485	60115-170	11,8555
60125-161	6,8851	60115-221	5,9623	60125-060	1,7404	60115-190	14,1669
60135-200	3,9165	60115-222	15,7039	60125-120	21,6268	60115-210	0,2564
60130-001	4,8731	60115-260	0,2977	60140-110	3,2759	60115-220	9,165
60130-040	2,5964	60115-281	6,6636	60140-140	5,9459	60115-240	0
60130-050	3,6598	60115-282	17,7886	60140-190	2,73	60115-270	1,3256
60130-061	4,002	60120-001	12,4966	60140-200	7,8631	60120-010	1,9891
60130-090	4,9484	60120-002	28,0245	60140-230	0	60125-030	0
60130-110	4,0293	60120-020	16,1077	60140-231	1,9321	60135-000	5,703
60130-120	1,4204	60120-021	13,1609	60150-040	0	60135-040	14,9319
60130-241	17,9453	60120-040	0,5231	60150-060	4,7114	60135-080	4,6948
60130-271	1,1364	60120-060	0,5231	60150-080	0,2564	60135-100	11,2249
60130-301	3,409	60120-100	3,8932	60150-090	0,2675	60135-110	0,246
60130-350	3,2264	60120-140	7,0154	60150-100	6,8052	60135-330	0
60130-371	4,2391	60120-170	2,2248	60150-140	1,7789	60140-000	4,439
60130-410	0,2615	60120-200	1,8652	60150-150	9,383	60140-050	0,5351
60130-421	0,8342	60120-220	3,7194	60150-161	70,9799	60140-060	6,646
60130-440	0,8016	60120-230	3,059	60150-162	24,3339	60140-061	8,9317
60130-460	0,8729	60120-270	0,2615	60150-170	4,8747	60140-100	1,9111
60130-550	0,278	60120-280	0,5231	60150-190	20,4319	60140-170	0,8189
60130-830	0,2615	60120-290	0,2615	60150-280	0,2675	60140-180	0,2564
60135-041	8,6368	60120-310	1,9468	60160-041	1,2238	60150-000	4,4642
60135-101	17,8573	60120-340	3,5118	60160-110	12,4508	60150-030	0
60135-102	10,9496	60125-000	10,6968	60160-120	7,4374	60150-110	0,6118
60135-180	6,8749	60125-001	8,7101	60160-130	1,8489	60150-120	4,0325
60135-270	11,4054	60125-070	19,4368	60160-140	6,9758	60150-160	70,5412
60135-280	6,1974	60125-071	11,937	60160-150	9,4749	60160-000	0
60135-290	0,246	60125-100	24,2679	60160-230	49,8936	60160-020	0
60135-400	2,6599	60125-101	12,7613	60160-240	5,3817	60160-040	1,0978
60135-410	4,0291	60125-160	9,2382	60160-250	7,6111	60160-050	1,314
60135-420	8,3739	60125-200	0,2485	60160-281	1,7826	60160-060	2,322
60135-430	4,6683	60130-000	0,8522	60170-000	12,549	60160-070	2,5892
60135-460	6,2642	60130-060	7,2185	60170-010	0,298	60160-080	4,7344
60135-590	0,2625	60130-080	0,5347	60170-020	8,3918	60160-090	0
60135-620	0,492	60130-100	0,5351	60170-040	15,7448	60160-100	0,2485

HEURÍSTICA DIVIDIR 1							
GRUPO 1		GRUPO 2		GRUPO 3		GRUPO 4	
CEP 1	TEMPOS	CEP 1	TEMPOS	CEP 1	TEMPOS	CEP 1	TEMPOS
60135-690	5,4848	60130-160	6,6223	60170-150	5,9955	60160-160	0,2564
60140-120	12,403	60130-170	0,2675	60170-240	6,3543	60160-200	1,6802
60140-160	19,6945	60130-210	0,8522	60170-250	12,7838	60160-210	0,8594
60170-001	13,7394	60130-220	1,6057	60170-310	6,24	60160-220	0
60170-002	45,7688	60130-230	0,2675			60160-280	9,6049
60170-021	5,3486	60130-240	15,4738			60165-010	7,0493
60170-041	5,0531	60130-270	2,5569			60165-011	8,6285
60170-151	6,5914	60130-300	2,3844			60165-050	3,7561
60170-190	0,246	60130-320	0,2615			60165-060	0,2564
60170-241	2,0979	60130-330	2,0012			60165-070	21,0793
60170-251	19,2948	60130-340	0			60165-080	4,9965
60170-280	1,5929	60130-370	9,319			60165-081	12,504
60170-311	5,2527	60130-400	0,5231			60165-082	4,4213
60170-320	9,524	60130-420	2,2248			60165-090	6,5543
		60130-430	0,2615			60165-100	0,2304
		60130-450	1,3079			60165-110	4,2903
		60130-490	2,0368			60165-120	1,7803
		60130-530	0,8342			60165-121	23,2344
		60130-600	4,0011			60165-170	2,0342
		60130-630	0			60165-180	6,9612
		60130-650	0,5231			60165-200	0,5481
		60130-690	0,2615			60165-210	0,5481
		60130-720	0,2615			60165-220	0,274
		60130-730	0,5231			60165-230	1,8336
		60130-740	0,278			60165-270	2,534
		60130-760	0			60170-050	0,2485
		60130-810	0,2615			60170-060	0,984
		60131-000	0			60170-210	2,7479
		60131-270	0,2615			60170-220	0
		60135-070	0,336				
		60135-130	1,6045				
		60135-140	1,6057				
		60135-141	0				
		60135-150	0,284				
		60135-170	3,1645				
		60135-260	0,2675				
		60135-450	0,492				
<b>TOTAL</b>	<b>354,0335</b>	<b>TOTAL</b>	<b>353,5097</b>	<b>TOTAL</b>	<b>378,4576</b>	<b>TOTAL</b>	<b>372,99</b>

## APÊNDICE B – Resultados da heurística HD2

(continua)

<b>HEURÍSTICA DIVIDIR 2</b>							
<b>GRUPO 1</b>		<b>GRUPO 2</b>		<b>GRUPO 3</b>		<b>GRUPO 4</b>	
<b>CEP 1</b>	<b>TEMPOS</b>	<b>CEP 1</b>	<b>TEMPOS</b>	<b>CEP 1</b>	<b>TEMPOS</b>	<b>CEP 1</b>	<b>TEMPOS</b>
60120-040	0,5231	60115-001	8,6187	60150-161	70,9799	60115-000	22,2962
60120-280	0,5231	60115-040	0	60160-230	49,8936	60115-010	0,5128
60120-290	0,2615	60115-081	9,4381	60150-162	24,3339	60115-080	24,2915
60120-310	1,9468	60115-082	4,941	60165-121	23,2344	60115-170	11,8555
60120-420	0,8342	60115-171	9,1085	60165-070	21,0793	60115-190	14,1669
60125-001	8,7101	60115-191	11,4478	60150-190	20,4319	60115-220	9,165
60125-071	11,937	60115-210	0,2564	60170-040	15,7448	60115-240	0
60125-101	12,7613	60115-221	5,9623	60170-250	12,7838	60115-270	1,3256
60125-140	0,6351	60115-222	15,7039	60170-000	12,549	60115-280	12,0043
60125-151	5,792	60115-260	0,2977	60165-081	12,504	60120-000	3,1881
60125-161	6,8851	60115-281	6,6636	60160-110	12,4508	60120-010	1,9891
60130-001	4,8731	60115-282	17,7886	60125-160	9,2382	60120-020	16,1077
60130-040	2,5964	60120-001	12,4966	60170-020	8,3918	60125-070	19,4368
60130-050	3,6598	60120-002	28,0245	60160-250	7,6111	60125-100	24,2679
60130-061	4,002	60120-060	0,5231	60160-120	7,4374	60125-120	21,6268
60130-090	4,9484	60120-100	3,8932	60160-140	6,9758	60135-270	11,4054
60130-100	0,5351	60120-170	2,2248	60165-180	6,9612	60140-100	1,9111
60130-110	4,0293	60120-200	1,8652	60165-090	6,5543	60140-180	0,2564
60130-120	1,4204	60120-220	3,7194	60170-240	6,3543	60150-000	4,4642
60130-241	17,9453	60120-230	3,059	60170-310	6,24	60150-110	0,6118
60130-271	1,1364	60120-270	0,2615	60170-150	5,9955	60150-120	4,0325
60130-301	3,409	60120-340	3,5118	60160-240	5,3817	60150-160	70,5412
60130-320	0,2615	60125-000	10,6968	60165-080	4,9965	60160-000	0
60130-330	2,0012	60125-050	0,2485	60150-170	4,8747	60160-020	0
60130-350	3,2264	60125-150	27,1265	60165-082	4,4213	60160-040	1,0978
60130-371	4,2391	60125-200	0,2485	60165-110	4,2903	60160-041	1,2238
60130-410	0,2615	60130-000	0,8522	60170-210	2,7479	60160-050	1,314
60130-421	0,8342	60130-060	7,2185	60165-270	2,534	60160-060	2,322
60130-830	0,2615	60130-080	0,5347	60165-170	2,0342	60160-070	2,5892
60135-041	8,6368	60130-160	6,6223	60160-130	1,8489	60160-080	4,7344
60135-101	17,8573	60130-170	0,2675	60165-230	1,8336	60160-090	0
60135-102	10,9496	60130-210	0,8522	60170-060	0,984	60160-100	0,2485
60135-200	3,9165	60130-220	1,6057	60165-200	0,5481	60160-150	9,4749
60135-280	6,1974	60130-230	0,2675	60165-210	0,5481	60160-160	0,2564
60135-290	0,246	60130-240	15,4738	60170-010	0,298	60160-200	1,6802
60135-400	2,6599	60130-270	2,5569	60165-220	0,274	60160-210	0,8594
60135-410	4,0291	60130-300	2,3844	60170-050	0,2485	60160-220	0
60135-430	4,6683	60130-340	0	60165-100	0,2304	60160-280	9,6049
60135-460	6,2642	60130-370	9,319	60170-220	0	60160-281	1,7826

(continuação)

HEURÍSTICA DIVIDIR 2							
GRUPO 1		GRUPO 2		GRUPO 3		GRUPO 4	
CEP 1	TEMPOS	CEP 1	TEMPOS	CEP 1	TEMPOS	CEP 1	TEMPOS
60135-590	0,2625	60130-400	0,5231	60125-020	0	60165-010	7,0493
60135-620	0,492	60130-420	2,2248	60125-030	0	60165-011	8,6285
60135-690	5,4848	60130-430	0,2615	60125-040	1,3744	60165-050	3,7561
60140-120	12,403	60130-440	0,8016			60165-060	0,2564
60140-160	19,6945	60130-450	1,3079			60165-120	1,7803
60140-200	7,8631	60130-460	0,8729				
60150-100	6,8052	60130-490	2,0368				
60150-150	9,383	60130-530	0,8342				
60120-021	13,1609	60130-550	0,278				
60170-001	13,7394	60130-600	4,0011				
60170-002	45,7688	60130-630	0				
60170-021	5,3486	60130-650	0,5231				
60170-041	5,0531	60130-690	0,2615				
60170-151	6,5914	60130-720	0,2615				
60170-190	0,246	60130-730	0,5231				
60170-241	2,0979	60130-740	0,278				
60170-251	19,2948	60130-760	0				
60170-280	1,5929	60130-810	0,2615				
60170-311	5,2527	60131-000	0				
60170-320	9,524	60131-270	0,2615				
60125-121	9,0396	60135-000	5,703				
60135-330	0	60135-040	14,9319				
60135-420	8,3739	60135-070	0,336				
		60135-080	4,6948				
		60135-100	11,2249				
		60135-110	0,246				
		60135-130	1,6045				
		60135-140	1,6057				
		60135-141	0				
		60135-150	0,284				
		60135-170	3,1645				
		60135-180	6,8749				
		60135-260	0,2675				
		60135-450	0,492				
		60140-000	4,439				
		60140-050	0,5351				
		60140-060	6,646				
		60140-061	8,9317				
		60140-110	3,2759				
		60140-140	5,9459				
		60140-170	0,8189				

(conclusão)

HEURÍSTICA DIVIDIR 2							
GRUPO1		GRUPO 2		GRUPO 3		GRUPO 4	
CEP 1	TEMPOS	CEP 1	TEMPOS	CEP 1	TEMPOS	CEP 1	TEMPOS
		60140-180	0,2564				
		60140-190	2,73				
		60140-230	0				
		60140-231	1,9321				
		60150-030	0				
		60150-040	0				
		60150-060	4,7114				
		60150-080	0,2564				
		60150-090	0,2675				
		60150-140	1,7789				
		60150-280	0,2675				
		60120-140	7,0154				
		60125-060	1,7404				
<b>TOTAL</b>	<b>383,3471</b>	<b>TOTAL</b>	<b>354,571</b>	<b>TOTAL</b>	<b>387,2136</b>	<b>TOTAL</b>	<b>334,1155</b>