AURO CASTIGLIA RADUAN

ROTEIRIZAÇÃO PARCIALMENTE DINÂMICA APLICADA A SERVIÇOS DE CAMPO

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

São Paulo
2009

AURO CASTIGLIA RADUAN

ROTEIRIZAÇÃO PARCIALMENTE DINÂMICA APLICADA A SERVIÇOS DE CAMPO

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

Área de Concentração:
Engenharia de Sistemas Logísticos

Orientador:
Prof. Dr. Nicolau D. Fares Gualda

São Paulo
2009

FICHA CATALOGRÁFICA

Raduan, Auro Castiglia
Roteirização parcialmente dinâmica aplicada a serviços de campo / A.C. Raduan. -- São Paulo, 2009.
121 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1. Roteirização I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II. t.

A Meus Pais

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Nicolau Dionisio Fares Gualda pelo constante apoio e insistente busca dos melhores caminhos a serem seguidos no decorrer do trabalho.

Ao Prof. Dr. Cláudio Barbieri da Cunha pelos preciosos ensinamentos desde o Curso de Especialização em Logística e que foram determinantes para o desenvolvimento do tema da dissertação.

Aos demais professores do Programa de Sistemas Logísticos e do Curso de Especialização em Logística (CELOG), em especial aos Prof. Drs. Hugo Tsugunobu Yoshida Yoshizaki, Rui Carlos Botter e Miguel Cezar Santoro.

Ao Prof. Dr. Marco Antonio Brinati pelo apoio nas diversas fases deste trabalho.

Aos meus pais Magid e Josefina que me legaram o espírito de luta e incessante dedicação ao trabalho.

À minha esposa Yone, pela paciência e incentivo durante o decorrer deste trabalho.

Ao Walter de Lima Silva, e outros colaboradores de nossa empresa que me permitiram dedicação integral ao programa de mestrado.

Aos demais professores da Escola Politécnica e de outras Instituições que farão parte das Bancas e cujos nomes ainda não conheço.

RESUMO

A Roteirização de Veículos desempenha papel fundamental nos processos modernos de distribuição de produtos e realização de serviços. A atual disseminação de recursos de tecnologia de informação e comunicação, de forma confiável e econômicamente acessível, permite trabalhar com informações em tempo real e melhoram os padrões de nível de serviço associados.

O presente trabalho apresenta uma solução para roteirização de veículos cujas equipes de bordo realizam serviços que justificam seu deslocamento, uma vez que as demandas estão geograficamente dispersas. Tais demandas são, em parte, conhecidas antes do despacho (permitem programação antecipada) dos veículos e suas equipes; outra parte surge durante a jornada de trabalho. Como exemplos podem-se citar os casos de serviços de montagem e manutenção de instalações, equipamentos, engenharia e inspeção de tráfego, policiamento etc.

Trata-se da aplicação da roteirização parcialmente dinâmica, conforme Larsen (2000), cujas bases foram definidas por Psaraftis (1988,1995), Bertsimas et al (1993) no problema DTRP (Dynamic Travelling Repairman Problem).

A função objetivo apresenta uma combinação de minimização dos custos de deslocamento, para os pedidos de serviços conhecidos antes da saída dos veículos e de minimização do tempo de resposta (chegada no local do cliente ou da ocorrência) para os casos de pedidos imediatos ou emergenciais.

A solução do problema envolve um modelo computacional de testes e avaliação, heurística de Clarke e Wright (1964) para formação das rotas estáticas, no Método Húngaro (Kuhn, 1955) para designar o veículo que resulta no menor tempo de resposta no atendimento a um pedido emergencial e a heurística de Clarke e Wright modificada na otimização do restante dos pedidos quando o veículo voltar a sua rota original. O modelo computacional foi testado em uma empresa de manutenção de elevadores na cidade de São Paulo, Brasil, onde demonstrou resultados comparativamente melhores em relação ao sistema de roteirização utilizado atualmente pela empresa.

Palavras-Chave : Problema de Roteirização Dinâmica a Parcialmente Dinâmica, Problema Dinâmico do Reparador Viajante, Método Húngaro, Problema de Designação.

ABSTRACT

The Vehicle Routing Problem plays a critical role on modern processes related to physical distribution of goods and services. The present expansion of information and communication technology in a reliable, economic and accessible way allows real time information and requires the utilization of appropriate tools for real time decisions resulting in significant improvements in quality and service level related to dynamic vehicle routing.

A dynamic routing problem is presented, in which vehicles serve geographic dispersed service demands that justify their movement in a fixed area. Such service demands are partially known before vehicles dispatching (allowing prior programming) whilst others are known during the work journey. As examples, one can mention cases concerning installation and maintenance of utilities, equipment, engineering and surveillance services that refer to applications of Partially Dynamic Routing according to Larsen (2000), the groundings of which were defined by Psaraftis (1988,1995), Bertsimas et al (1993) in the Dynamic Travelling Repairman Problem (DTRP). The objective function is a combination of the minimization of movement costs to serve the prior demands and the minimization of time to reach (time to response) Dynamic-or-emergency-demand sites.

The proposed solution involves a computational model for testing and evaluating a set of heuristics and methods comprising the Clarke and Wright (1964) Heuristic to compose the static routes, the Hungarian Method (Kuhn, 1955) to assign vehicles to the dynamic demands that produces the lowest response time and, finally, a Clarke and Wright Modified Heuristic used to optimize the remainder of the route when each diverted vehicle returns to its static route. The Computational Model was applied to a lift maintenance company located in the city of São Paulo (Brazil) demonstrating better results as compared to the present routing system.

Keywords : Dynamic Vehicle Routing Problem, Dynamic Traveling Repairman Problem, Hungarian Method, Assignment Problem.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS 1

1.1 Descrição e Relevância do Problema 1
1.2 Objetivos 2
1.2.1 Objetivo Geral 2
1.2.2 Objetivos Específicos 2
1.3 Delimitação da Estratégia de Solução 2
1.4 Organização do Trabalho 3

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 4

2.1 Revisão dos Conceitos Básicos 4
2.2 O Problema da Roteirização sob Incerteza: Os Métodos Probabilísticos e Estocásticos 7
2.3 Roteirização Estática e Dinâmica 8
2.4 Métodos de Otimização Dinâmicos ou em Tempo Real 13
2.4.1 O Problema Dinâmico do Caixeiro Viajante 13
2.4.2 O Problema Dinâmico do Reparador Viajante 15
2.4.2.1 O problema dinâmico do reparador viajante com um servidor 16
2.4.2.2 O problema dinâmico do reparador viajante com m servidores 21
2.4.2.3 Uma generalização para tráfego leve e intenso 23
2.4.2.4 Coletas e entregas 24
2.4.2.5 Estratégias de espera para coleta e entrega com janela de tempo 25
2.4.3 O Problema Dinâmico do Disque para Viajar 27
2.5 Problemas Relacionados 28
2.6 O Nível de Dinamismo 32
2.6.1 Dinamismo sem Considerar a Incidência de Pedidos no Tempo 32
2.6.2 Dinamismo Considerando a Incidência de Pedidos no Tempo 33
2.7 O Problema Parcialmente Dinâmico do Reparador Viajante 35
2.8 Conclusões do Capítulo 37

3 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA 38

3.1 Os Serviços de Atendimento e Manutenção em Campo 38
3.2 O Sistema de Atendimento de Serviços em Campo 40
3.2.1 Os Processos típicos de uma Central de Operações 41
3.3 Sistemas de Atendimento em Instituições e Empresas na Cidade de São Paulo 42
3.3.1 O Sistema de Atendimento 43
3.3.2 Localização da Demanda 43
3.3.3 Localização do Veículo 44
3.3.4 Formas de Despacho 44
3.3.5 Particionamento da Área de Atendimento 45
3.3.6 Outras Características 46

3.4 O Problema do Cálculo das Distâncias..... 47
3.4.1 Rede de Transporte, Nós, Arcos e Distâncias 47
3.4.2 A Distância Linear..... 48
3.4.3 Grandes Distâncias 48
3.4.4 A Distância Real..... 49
3.4.5 A Relação Linear de Ajuste da Distância Linear para a Distância Real... 50

4 ESTRATÉGIA DE SOLUÇÃO 52

4.1 Visão Geral da Solução 52
4.2 Roteirização Estática 54
4.3 Designação Dinâmica..... 55
4.3.1 Estratégia NN – Vizinho mais próximo..... 56
4.3.2 Estratégia NN com Espera 58
4.3.3 A Solução da Matriz de Decisão pelo Método Húngaro 60
4.4 Roteirização Dinâmica..... 62
4.5 O Modelo Computacional..... 63
4.5.1 Visão Geral e Principais Componentes..... 63
4.5.2 Fluxograma das rotinas de processamento..... 64
4.5.3 Indicadores de Desempenho..... 67
4.6 Infraestrutura de Comunicações e de Informática..... 68

5 AVALIAÇÃO DA ESTRATÉGIA DE SOLUÇÃO ATRAVÉS DE EXPERIMENTOS PRÁTICOS..... 70

5.1 O Aplicação a um caso prático..... 70
5.2 Obtenção e Preparação dos Dados 71
5.2.1 O Plano Euclideano 72
5.2.2 A Determinação das Rotas Manuais..... 73
5.3 Aplicação do Modelo Computacional 73
5.4 Comparativos 74
5.4.1 Distâncias e Tempo de Atendimento dos Pedidos..... 74
5.4.2 Tempo de Espera 77
5.4.3 Tempos de Processamento 79
5.5 Conclusão do Capítulo..... 81

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS 82

6.1 Conclusões 82
6.2 Sugestões para pesquisa futura..... 83

REFERÊNCIAS..... 84

APÊNDICES

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Agenda de conveniência de entrega. 30
Figura 2.2 – Objetivos primários e nível de dinamismo em diversas aplicações. 34
Figura 3.1 Exemplo de atendimento de Pedidos Antecipados(PA) e Imediatos 40
(PI)em um plano Euclideano. 40
Figura 3.2 – Processos de um sistema de atendimento. 41
Figura 3.3 – Distância linear versus distância real. 50
Figura 4.1 – Os principais processos funcionais envolvidos na solução 54
Figura 4.2 – Os veículos são designados por proximidade (NN). 56
Figura 4.3 O desvio do servidor de uma rota estática para atender Pedidos Imediatos. 57
Figura 4.4 Condição mais adequada para atender os pedidos imediatos através de.. 58
uma Estratégia de Espera..... 58
Figura 4.5 Instante de decisão na Estratégia NN com espera..... 59
Figura 4.6 Formação da Matriz de Decisão para novos pedidos imediatos. 60
Figura 4.7 Matriz de Decisão equilibrada para possibilitar a resolução pelo..... 61
Método Húngaro. 61
Figura 4.8 O processo de Roteirização Dinâmica..... 62
Figura 4.9 A Heurística de Clarke e Wright Modificada 63
Figura 4.10 – Componentes gerais do modelo computacional..... 64
Figura 4.11 Fluxograma das rotinas de processamento do modelo computacional .. 67
Figura 5.1 – Pontos que representam os edifícios que sofreram manutenção no 72
dia 1 da aplicação a um caso prático. 72
Figura 5.2 – Comparativo das Distâncias Percorridas entre os Métodos..... 77
Figura 5.3 – Comparativo dos Tempos Totais de Atendimento..... 77
Figura 5.4 – Comparativo do Tempo de Resposta Médio entre os Métodos 79

LISTA DE QUADROS

Quadro 5.1 – Comparativo de tempo para atendimento de todos os pedidos e distâncias percorridas nos Métodos Manual e através do Modelo Computacional 76

Quadro 5.2 - Tempos de Resposta (Espera Média) por dia 78

Quadro 5.3 – Quadro comparativo do tempo de resposta médio entre os métodos .. 79

Quadro 5.4 – Tempo de processamento do Modelo Computacional..... 80

Quadro 5.5 – Tempo de processamento do Método Húngaro para resolução.....
de diversas ordens da matriz de decisão do Modelo Computacional 80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADART	Autonomous Dial-A-Ride Transit
COPOM	Central de Operações da Policia Militar de São Paulo
DARP	Dial-A-Ride Problem
DDARP	Dinamic Dial-A-Ride Problem
DPDP	single-vehicle Dynamic Pick-Up and Delivery Problem
DTRP	Dynamic Traveling Repairman Problem
DTSP	Dynamic Traveling Salesman Problem
FCFS	First-Come, First-Served
MTF	Many-to-Few
MTM	Many-to-Many
MTO	Many-to-One
NN	Nearest Neighbor
PART	Partitioning Policy
PDTRP	Partially Dynamic Repairman Problem
PTSP	Probabilistic Traveling Salesman Problem
RA μ	Simple Random Assignment Policy
SFC	Space Filling Curve
SQM	Stochastic Queue Median
SQMP	Stochastic Queue Median Problem
TRP	Traveling Repairman Problem
TSP	Traveling Salesman Problem
VRP	Vehicle Routing Problem

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1 Descrição e Relevância do Problema

O problema de roteirização de veículos (vehicle routing problem, VRP) tem recebido uma grande atenção dos pesquisadores, funcionários do governo e empresários nos últimos 40 anos, devido à sua complexidade, bem como seu papel crítico nos sistemas de distribuição de mercadorias e atendimento de serviços.

A popularidade da internet e a larga utilização do comércio eletrônico obrigam as instituições e empresas a adotarem uma logística em tempo real.

As atividades que compõem a roteirização até então acontecendo antes do despacho, adquirem agora uma nova dimensão em sua programação, uma vez que as tecnologias de informática e de comunicações disponibilizam acesso confiável à localização e comunicação instantânea entre os diversos interlocutores: os demandantes dos produtos e serviços, os fornecedores, as centrais de distribuição, de controle e/ou de despacho e os veículos envolvidos no processo.

Estes veículos, mesmo após sua saída da base e durante toda a jornada podem enviar seu posicionamento e receber as solicitações de serviço, proporcionando assim o atendimento antecipado e consequentes melhorias no nível de serviço ao cliente.

Portanto, as roteirizações dinâmica e parcialmente dinâmica passam a disputar espaço com a roteirização estática que tem sido a prática mais frequente até então pelas empresas e pesquisadores ligados ao assunto.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Esta pesquisa tem o objetivo geral de definir, construir e avaliar uma estratégia de solução para Roteirização Parcialmente Dinâmica em Serviços de Campo com minimização de distância percorrida para pedidos antecipados e minimização do tempo de espera para pedidos imediatos dado um conjunto de Servidores disponível.

1.2.2 Objetivos Específicos

São objetivos específicos da pesquisa :

- Levantar e estruturar os fatores influenciadores de um Sistema de Roteirização Dinâmica e Parcialmente Dinâmica.
- Desenvolver um Modelo Computacional que implemente as heurísticas, métodos e rotinas necessárias para solução.
- Aplicar o Modelo Computacional em um caso real de uma empresa que presta serviços em campo.
- Comparar e analisar o desempenho do Modelo Computacional nos casos reais em relação aos objetivos de otimização de distância e tempo de resposta.
- Avaliar o tempo de processamento do Modelo Computacional frente às restrições de tempo de resposta necessárias para o atendimento do problema apresentado.

1.3 Delimitação da Estratégia de Solução

São muitas as modalidades de roteirização dinâmica, porém este trabalho prioriza a solução para o problema da Roteirização Parcialmente Dinâmica para

Serviços de Campo, mencionado por Bertsimas e Van Ryzin (1991), como Dynamic Travelling Repairman Problem (DTRP), combinada com a Roteirização Estática.

1.4 Organização do Trabalho

A organização dos capítulos permite uma compreensão gradativa e crescente dos assuntos relacionados aos problemas de Roteirização Dinâmica e Parcialmente Dinâmica de Veículos, culminando com as soluções operacionais do problema mencionado.

O capítulo 2 apresenta um resumo da revisão bibliográfica, com os principais autores e respectivas teorias sobre o problema dinâmico da roteirização e designação.

O capítulo 3 caracteriza e define o problema estudado.

No capítulo 4 são detalhados os métodos e o Modelo Computacional adotados para solução do problema.

Os resultados computacionais são mostrados e analisados no capítulo 5.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões e recomendações para próximas pesquisas sobre o tema.

Além das referências bibliográficas, o trabalho também inclui apêndices.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo permite acompanhar a evolução do problema clássico da Roteirização de Veículos até seu desdobramento para os aspectos específicos de seu cenário dinâmico. Tudo isto, com a finalidade de fundamentar o desenvolvimento de uma solução para o Problema Dinâmico do Reparador Viajante no decorrer dos capítulos seguintes.

2.1 Revisão dos Conceitos Básicos

No aspecto operacional, para que determinada atividade de transporte de bens e serviços seja realizada de forma eficaz e eficiente, há que se planejar adequadamente a sequência de locais a serem atendidos e em que instante no tempo.

A eficiência neste processo denota uma preocupação com o nível de serviço ao cliente, bem como com o custo decorrente desta atividade. Definindo abaixo os termos utilizados na literatura, conforme Bodin et al. (1983):

- Quando se trata da dimensão geográfica do problema: o sequenciamento dos locais, aplica-se um Processo de Roteirização (*Routing*).

- Quando a preocupação reside no aspecto temporal: em que momento se chega ou sai de um local, aplica-se um Processo de Programação (*Scheduling*) ou de cronograma dos recursos e atividades.

Seguindo as mesmas definições acima Toth e Vigo (2001) detalham as características típicas dos problemas de Roteirização e Programação em relação aos seus principais componentes (rede de vias, clientes, garagens, veículos e motoristas), as diferentes restrições operacionais que podem ser impostas na construção das rotas e os diferentes objetivos a serem obtidos no processo de otimização.

A rede de vias usada para o transporte de mercadorias ou atendimento de um serviço é geralmente descrita por meio de um Grafo, cujos Arcos representam segmentos de uma estrada ou via urbana e os Vértices ou Nós denotam junções das vias, clientes ou garagens. Estes arcos podem ser Direcionados ou Não Direcionados, dependendo se puderem ser percorridos em apenas um sentido ou em ambos, como é o caso de vias de mão única ou dupla. Cada arco está associado a um encargo que geralmente representa seu tamanho (distância) e/ou tempo de viagem, o qual depende do tipo de veículo ou do momento em que o arco é percorrido.

Também os arcos podem ser Simétricos quando o seu encargo de passagem na ida é igual ao encargo no retorno e Não Simétrico no caso contrário.

As características associadas aos clientes são:

- Estão localizados nos nós ou vértices dos grafos.
- Possuem uma demanda igual à quantidade de mercadorias ou serviços que devem ser coletados (caso de mercadorias) ou entregues.
- Determinam um período do dia (Janela de Tempo) durante o qual o cliente pode ser atendido, por exemplo, no caso de restrições de abertura ou fechamento de seu estabelecimento ou regulamentação de tráfego.
- Requerem um tempo para carga e descarga dependendo do tipo de veículo.
- Exigem determinados equipamentos ou tipos de veículos devido às condições operacionais, como número de docas, altura do pátio, recebimento/expedição etc.
- Em alguns casos não é possível atender o cliente na totalidade, nestes casos o serviço é postergado ou parcelado. Para lidar com situações como estas, diferentes prioridades ou penalidades são estabelecidas no modelo do problema.
- As rotas executadas para atender os clientes, iniciam e terminam em uma ou mais garagens localizadas nos nós do grafo.

- O transporte é executado por uma frota de veículos, cuja composição e capacidade podem ser fixas ou definidas de acordo com os requisitos dos clientes.

As características associadas aos veículos são:

- Residem em uma garagem (base) e podem iniciar e terminar uma viagem na mesma ou em outra garagem.
- Possuem uma capacidade limite expressa, como: peso, volume, número de paletes ou outra grandeza que podem transportar.
- Podem conter subdivisões ou compartimentos, cada um associado a uma capacidade e tipo de mercadoria que pode transportar.
- Podem estar equipados com dispositivos especiais para carga ou descarga.
- Possuem limitações de tráfego em determinados arcos do grafo.
- Estão associados a encargos de utilização (por unidade de distância, por unidade de tempo, por rota etc.).

A jornada de trabalho de motoristas ou técnicos associados aos veículos deve satisfazer restrições legais em termos de número de dias e horas de trabalho por dia.

Outras características dizem respeito à operação:

- Serviços puramente de coleta, entrega, ou ambos.
- Restrições de precedência, quando uma ordem de visita aos clientes deve ser obedecida.
- Com coleta no retorno (*Backhaul*), quando após a entrega ou entregas existe o aproveitamento do veículo para coleta individual ou grupo de coletas, acontecendo de forma intercalada ou não com as entregas.

Os objetivos usuais para otimização no problema de roteirização, estão abaixo discriminados:

- Minimização do custo total de transporte, dependendo da distância percorrida e dos custos fixos dos veículos.
- Minimização do número de veículos (ou motoristas) necessários para atender todos os clientes.
- Balanceamento de rotas, de acordo com o tempo de viagem e carga transportada.

Também podemos considerar, em alguns casos, uma ponderação dos objetivos mencionados.

2.2 O Problema da Roteirização sob Incerteza: Os Métodos Probabilísticos e Estocásticos

Jaillet e Odoni (1988) descrevem o Problema Probabilístico do Caixeiro Viajante (*Probabilistic Traveling Salesman Problem*, PTSP), como o de uma empresa que deseja manter uma rota fixa de visitação aos seus clientes, sendo que estes podem ser visitados ou ter entregas de acordo com uma probabilidade p e não necessitem com a probabilidade 1-p. Não havendo entrega para determinado cliente, o caixeiro viajante ou veículo não passa por ele em direção a um próximo cliente. Havendo uma variante no tempo tem-se um caso Estocástico.

O Problema Estocástico de Roteirização de Veículos (*Stochastic* VRP) introduz mais alguns elementos de variabilidade dentro do sistema em questão, conforme Cordeau, Laporte e Savelsberg (2005).

Os três casos mais comuns são:

(1) Clientes Estocásticos, o cliente i está presente com probabilidade p_i e está ausente com probabilidade $1 - p_i$;

(2) Demanda Estocástica, a demanda ε_i do cliente i é uma variável aleatória;

(3) Tempo Estocástico: o tempo de serviço s_i do cliente i e o tempo de trajeto do cliente i até o cliente j, t_{ij} são variáveis aleatórias. Sendo variáveis aleatórias, novos conceitos de otimização e viabilidade são necessários.

O VRP Estocástico pode ser formulado e resolvido no contexto da programação estocástica, onde uma primeira solução ou solução *a priori* é calculada e, em um segundo estágio, uma revisão é aplicada à primeira solução.

2.3 Roteirização Estática e Dinâmica

Na modelagem de um problema de roteirização, quando todas as informações sobre os clientes e suas demandas forem conhecidas com antecedência em relação à saída dos veículos, geralmente fixam-se outras variáveis como, por exemplo, o custo e o tempo para atendimento. Neste caso a Roteirização é denominada de Estática, uma vez que as variáveis não se modificam no modelo de otimização.

No entanto, quando os clientes e suas demandas são conhecidos gradativamente, durante a jornada de trabalho do veículo, ou seja, após sua saída, o Modelo recebe a denominação de Roteirização Dinâmica.

Na tese de Allan Larsen (2000), referenciando-se a Psaraftis (1995), relacionam-se as doze diferenças entre a Roteirização Estática tradicional e a Roteirização Dinâmica:

1. A Dimensão de Tempo é Essencial.

Em um problema de roteirização estática, a dimensão de tempo pode ou não ser importante. Como vimos em 2.1, somente quando o problema tiver um componente de Programação (*Scheduling*) a dimensão de tempo estará presente na roteirização estática.

Problemas clássicos como o do Caixeiro Viajante e de roteirização de veículos não possuem o componente de programação. Em todos estes problemas, os tempos são proporcionais às distâncias percorridas e em função disto são tratados separadamente na formulação e solução destes problemas.

Diferentemente, na roteirização dinâmica a dimensão de tempo é essencial, seja o problema restrito por tempo ou não. No mínimo o despachante deve possuir a localização espacial de todos os veículos e sua disponibilidade, além da entrada de novos clientes e cargas no sistema a cada instante de tempo.

2. O Problema pode não ter um limite definido.

No problema estático o processo é mais ou menos limitado *a priori*, enquanto no dinâmico não existe uma limitação devido ao desconhecimento dos eventos que ainda estão por ocorrer. Uma resultante disto é que no problema estático, definem-se roteiros (por exemplo, todos os pontos são percorridos pelo veículo, que ao final retorna para a garagem) enquanto no problema dinâmico, em cada instante, somente pode-se definir um caminho.

Apenas ao final da jornada, em um cenário dinâmico, tem-se um roteiro totalmente conhecido.

3. As Informações sobre o futuro são desconhecidas ou imprecisas.

No caso estático, quando se define um roteiro, eliminam-se as dimensões de tempo "Passado", "Presente" ou "Futuro" do planejamento, particularmente quando este não contemplar o processo de programação. Porém, mesmo que haja este processo, todos os dados do problema são considerados de mesma qualidade, estejam estes situados no início, durante ou após o roteiro do veículo.

Não é o caso no cenário dinâmico, em que dados reais se tornam disponíveis durante o planejamento (exemplo do momento da solicitação de um cliente), enquanto outras decisões são tomadas sobre um futuro incerto (deslocamento de um veículo para atender um pedido mais distante, devido ao desconhecimento da possibilidade de entrada de um pedido mais próximo).

Em alguns estudos procura-se explorar o futuro por meio de métodos probabilísticos e estocásticos.

4. Eventos próximos são mais importantes.

Devido à mesma qualidade da informação, sejam estas ocorrendo no início, durante ou final da rota de um veículo e sua falta de atualização, todos os eventos possuem o mesmo peso na roteirização estática.

Em um cenário de roteirização dinâmica, com as informações mais atuais com peso muito superior às do futuro, pode ser arriscado comprometer um veículo para demandas de longo prazo, até porque o cenário até lá pode se modificar e tornar tais decisões não ótimas.

O foco do despachante será o curto prazo, embora nos casos onde for possível, não deve ser totalmente míope (sem maior amplitude de visão) quando se tratar de roteirização dinâmica.

5. Mecanismos de atualização das informações são essenciais.

Por se tratar de um processo em tempo real, quase todas as informações em um problema de roteirização dinâmica são passíveis de atualização durante um dia de operação.

Panes em veículos, cancelamento ou mudança na solicitação ou no horário de coleta ou entrega a um cliente, são exemplos de eventos que atualizam o processo de planejamento no ambiente dinâmico.

Por esta razão, que mecanismos de atualização, devem fazer parte integral do modelo de solução de um problema de roteirização dinâmica.

Naturalmente, estes mesmos mecanismos não fazem sentido na roteirização estática a não ser em processos posteriores de validação de seus parâmetros, como análise de sensibilidade, jogos, *What If* etc.

6. Decisões de re-sequenciamento e de reatribuição podem ser necessárias.

Uma nova entrada de informação na roteirização dinâmica pode implicar em que decisões anteriores tornam o problema subótimo. Este fato obriga o despachante a reroteirizar ou mesmo reatribuir veículos a outras solicitações, de forma a responder a esta nova situação de forma otimizada.

Naturalmente, finalizada a jornada de trabalho pode-se concluir que em alguns aspectos o roteiro seguido por determinado veículo pode não ter sido o melhor, visão que contrasta com aquela ocorrida nos vários instantes de decisão, que compuseram o processo de roteirização dinâmica.

7. O Tempo de processamento deve ser rápido.

Em um cenário de roteirização estática, o despachante pode se dar ao luxo de esperar algumas horas, de forma a obter uma solução de alta qualidade, em alguns casos até uma solução ótima (exemplo: receber todos os pedidos que somente serão entregues no dia seguinte).

No caso dinâmico isto não é possível, uma vez que o despachante, diante de uma nova informação, deseja conhecer o mais rápido possível a solução para evitar a espera do cliente e a retenção do veículo.

Enquanto na Roteirização Estática podemos obter a solução em horas, na dinâmica o mesmo deve ser realizado em no máximo minutos. O tempo de processamento das restrições implica em que a reroteirização e reatribuição sejam frequentemente realizadas por meio de heurísticas rápidas de inserção, intercâmbio k (*k-interchange*) ou outras similares.

8. Mecanismos de Prorrogação Indefinida são essenciais.

Prorrogação Indefinida significa que o atendimento a uma solicitação pode ser prorrogado indefinidamente, devido a uma condição geográfica desfavorável em relação às outras solicitações. Este problema pode ser atenuado quando se utiliza Janela de Tempo ou parâmetros de penalização na função objetivo no caso de haver espera excessiva.

9. A Função objetivo pode ser diferente.

Os objetivos tradicionais na roteirização estática, como minimização da distância total percorrida, ou maximização no atendimento dos clientes, podem não fazer sentido no cenário dinâmico, uma vez que neste caso não existem limites estabelecidos.

Pode ser razoável na roteirização dinâmica, otimizar somente com as informações disponíveis. Alguns sistemas utilizam funções objetivo não lineares, de forma a evitar o fenômeno da prorrogação indefinida.

10. Restrições de tempo podem ser diferentes.

Restrições de tempo, tais como o tempo de Coleta Mais Tarde, no caso de restrições por Janela de Tempo, tendem a ser mais flexíveis, em um cenário de roteirização dinâmica que de roteirização estática. Isto se deve ao fato da negação de atendimento a uma solicitação em dado instante, na roteirização dinâmica, ser menos atrativa do que a violação da restrição de tempo. Ou seja, prefere-se atrasar determinada entrega a não atender o cliente, e se isto não for possível se tentará negociar uma nova situação.

11. A Flexibilidade de variar o tamanho da frota é menor.

Em teoria, uma alternativa para evitar a negação ou postergação de serviço, a um cliente, em casos como os já mencionados, é adicionar veículos de reserva à frota disponível.

No entanto, esta proposição pode não ser possível em um caso dinâmico, devido à inexistência ou impossibilidade de acesso a veículos de reserva em tempo real.

No caso estático, o longo intervalo de tempo, entre o planejamento e a execução da rota, permite a obtenção de recursos adicionais quando necessário.

Portanto, se os recursos na forma de veículos forem exíguos, o resultado será uma diminuição no nível de serviço ao cliente, com atrasos e negação no atendimento. Também, poderá surgir o fenômeno de filas de solicitações, aguardando a disponibilidade de veículos.

12. Questões de fila podem ser importantes.

Se a demanda de clientes for superior a certo parâmetro, o sistema se tornará congestionado com filas e demoras no atendimento. Os algorítmos de otimização clássicos do ambiente Estático neste caso irão produzir resultados inexpressivos.

Embora, as teorias de roteirização e de filas serem muito estudadas, o esforço para combinar, em uma só teoria as duas tem sido escasso e uma solução para o congestionamento continua sendo a previsibilidade e o correto dimensionamento da frota.

2.4 Métodos de Otimização Dinâmicos ou em Tempo Real

2.4.1 O Problema Dinâmico do Caixeiro Viajante

São inúmeros os trabalhos sobre o Problema do Caixeiro Viajante, a maior parte deles tratando de sua forma estática e determinística.

Em 1988, Psaraftis definiu a versão dinâmica do mesmo problema chamando-a de Problema Dinâmico do Caixeiro Viajante (*Dynamic Traveling Salesman Problem*, DTSP), motivado pelo fato de que todos os demais problemas encontrados na literatura sobre roteirização, a exemplo do Problema de Roteirização de Veículos, serem generalizações ou extensões do clássico Problema do Caixeiro Viajante em sua forma estática.

Psaraftis (1988) define o DTSP como segue:

- G é um grafo completo consistindo de n nós.
- As demandas de serviço são geradas de forma independente em cada nó do grafo.
- O processo de geração é através de uma distribuição de Poisson com intensidade λ .
- As demandas devem ser atendidas pelo caixeiro viajante que viaja a uma velocidade constante do nó i até o nó j no tempo t_{ij} .

- O tempo de serviço de cada uma das demandas é t_0 .

O problema agora consiste em encontrar uma política de roteirização "ótima", a ser seguida. Psaraftis (1988) identifica as questões seguintes como interessantes e futuros temas para pesquisas:

1. Medidas de Desempenho.

Em redes de comunicação, as medidas de desempenho são baseadas em capacidade de processamento ou em espera para atendimento. Em um contexto de roteirização, estas medidas, significam que uma política "ótima" é aquela que atende o máximo de demandas por unidade de tempo ou aquela que resulte no mínimo tempo de espera dos atendimentos.

2. Tráfego Leve.

Se a taxa de chegada λ for "relativamente baixa", o veículo estará apto a atender e o processamento será n.λ, independente da política. Enquanto o tempo de espera, naturalmente irá depender da política utilizada.

A política de atender a demanda, à medida que esta surgir, e ao final de cada atendimento esperar o próximo, resulta em menor tempo de espera individual.

No caso de agrupar as demandas, para depois atendê-las uma a uma, resulta em maior tempo de espera, embora com melhor aproveitamento do tempo disponível do veículo.

3. Tráfego Intenso.

Por outro lado, se a taxa de chegada λ assume valores altos, a situação se torna mais complicada. Em alguns casos, esta taxa é tão elevada que o veículo não consegue dar conta da demanda. Em sistemas muito carregados, a demanda poderia até mesmo ser rejeitada.

4. Reposicionamento.

Em casos onde a taxa de chegada é baixa, pode fazer sentido reposicionar o veículo para um nó estrategicamente localizado. Este problema lembra um problema de localização de instalações e Psaraftis (1988) sugere futuros estudos, a partir da combinação de roteirização de veículos e localização de instalações.

Ainda, existem diferentes versões de DTSP. Podemos ter o Grafo G: Incompleto, Simétrico ou Euclideano. Também o processo de geração de novas demandas pode não obedecer a uma distribuição de Poisson e a taxa de chegada pode variar de acordo com os nós. E finalmente, Psaraftis (1988) sugere pesquisas para o caso de uma Política Míope ser ótima e se faz ou não sentido acumular demandas (lotes), antes de ir para o próximo nó.

2.4.2 O Problema Dinâmico do Reparador Viajante

O Problema Dinâmico do Reparador Viajante, do inglês Dynamic Travelling Repairman Problem (DTRP), foi introduzido por Bertsimas e Van Ryzin (1991), cujo artigo propõe e analisa um modelo matemático genérico para os problemas de roteirização estocástica e dinâmica de roteirização de veículos.

O modelo é motivado pelas aplicações, cujo objetivo é minimizar o tempo de espera por serviço, em um ambiente estocástico e de mudança dinâmica. É uma contraposição aos problemas clássicos de roteirização de veículos onde se procura minimizar o tempo total de viagem em um ambiente estático e determinístico.

As áreas potenciais de aplicação são: serviços de reparação, reposição de estoque e serviços emergenciais.

2.4.2.1 O problema dinâmico do reparador viajante com um servidor

O Problema Dinâmico do Reparador Viajante mencionado no artigo de Bertsimas e Van Ryzin (1991) para um servidor é como segue: as demandas por serviço surgem de acordo com um processo de Poisson, são independentes e uniformemente distribuídas em uma região Euclidiana e requerem uma quantidade independente e identicamente distribuída de serviço no local da demanda, por meio de um veículo, neste artigo muitas vezes chamado de Servidor em referência à teoria das filas.

O problema é encontrar uma política para roteirizar o veículo de serviço que minimize o tempo médio de permanência das demandas no sistema.

Os autores propõem e analisam várias políticas para o DTRP. Encontram uma política provavelmente ótima para o tráfego leve e várias políticas com tempo de sistema dentro de um fator constante da política ótima em situações de tráfego intenso. Também, mostram que o tempo de espera cresce muito mais rápido do que nas filas tradicionais quando as condições de tráfego se intensificam, embora as condições de estabilidade não dependam da geometria do sistema.

No corpo do artigo, os autores comentam que o problema do caixeiro viajante, embora em muitas aplicações seja considerado determinístico, sua aproximação estática para o problema é na realidade tanto probabilística como variante em tempo (dinâmica). Ainda, frequentemente existem custos associados com a espera pela entrega que não são considerados no objetivo de minimizar a distância de viagem.

Por exemplo, uma aplicação típica de TSP é a roteirização de veículos de uma garagem central para um conjunto de pontos de demanda, de forma a minimizar o custo total de viagem.

Em sistemas de distribuição real, os pedidos chegam aleatoriamente no tempo e o despacho de veículos é um processo contínuo de agrupar as demandas, formando rotas e despachando os veículos. Neste ambiente dinâmico, a espera pela entrega (ou serviço) pode ser um fator mais importante do que o custo de viagem.

Aplicações onde a espera pelo atendimento é um objetivo mais adequado do que o custo de viagem e cuja demanda apresenta padrões tanto dinâmicos como estocásticos incluem:

Casos em que as requisições para reabastecimento de estoque (matérias primas, mercadorias etc.) sejam provenientes de locais remotos e que necessitem ser entregues a partir de um depósito central. Neste caso, tempos de espera muito longos resultam em aumentos nas quantidades de estoque de forma a prevenir possíveis faltas.

No gerenciamento de uma frota de táxis onde existir a intenção de diminuir o tempo de espera dos clientes. Por esta razão, os decisores necessitam estabelecer boas políticas de despacho, modelar o tamanho da frota e estimativas do nível de serviço.

Demandas que representem solicitações para serviços de emergência, cujo principal objetivo seja reduzir a espera por serviço, ao invés de diminuir o custo de viagem de um veículo de emergência. Neste caso, são necessárias políticas de tempo real que possam ser aplicadas em um ambiente estocástico.

As demandas são representadas por falhas em equipamentos ou instalações geograficamente dispersos que necessitem ser reparados por um técnico de campo (reparador). O objetivo neste caso é minimizar o tempo inoperante devido a defeitos (soma do tempo de espera mais tempo do serviço) dos equipamentos ou instalações geograficamente dispersos. Exemplos desta categoria incluem serviços nos equipamentos de comunicações, redes de utilidades, serviço de atendimento móvel de conserto ou remoção de veículos ou o despacho de especialistas para os locais onde necessários.

E finalmente, o problema no qual um vendedor recebe solicitações aleatoriamente no tempo e deseja realizar visitas aos clientes de forma a otimizar as vendas.

Motivados por estas áreas de aplicação, os autores propõem e analisam um modelo matemático genérico, denominado Problema Dinâmico do Reparador Viajante. Este modelo possui várias características importantes:

- o objetivo é minimizar o tempo de espera, não o custo de viagem;
- a informação sobre demandas futuras é estocástica;
- as demandas variam no tempo (são dinâmicas);
- as políticas devem ser implementadas em tempo real; e
- o problema envolve o fenômeno de filas.

Em geral, segundo os autores, pouco se conhece sobre versões dinâmicas do Problema do Caixeiro Viajante, a versão clássica do DTRP.

Psaraftis (1988) define a versão dinâmica do problema do caixeiro viajante, por meio de um grafo completo de n nós, com demandas geradas em cada nó i, de acordo com uma distribuição de Poisson com parâmetro λ_i. Estas demandas serão atendidas por um vendedor que leva um tempo conhecido t_{ij} para ir de i até j e gasta um tempo estocástico X que possui uma distribuição conhecida, atendendo cada demanda em seu local de origem.

O objetivo é encontrar uma estratégia que otimize alguma medida de desempenho (tempo de espera, processamento etc.). Por comparação, o DTRP é definido no Plano Euclideano e sua otimização é sobre o tempo total no sistema. Nenhum resultado geral foi obtido, porém se produziram várias visões e conjecturas úteis.

Algumas características do DTRP foram consideradas de forma isolada na literatura. A primeira é o objetivo de minimizar a média do tempo no sistema ao invés do tempo total de viagem. Em um ambiente determinístico, esta idéia surge no Problema do Reparador (Entregador) Viajante, no qual uma unidade de reparos deve atender um conjunto de demandas V, iniciando de uma garagem.

Se d(i,j) representa o tempo de viagem de i até j, o problema é encontrar uma rota iniciando da garagem através das demandas que minimize o tempo total de espera das demandas.

Como resultado, se a sequência na qual a unidade de reparo viaja é t = (1, 2, ..., n, 1) , então o tempo total de espera é $W_t = \sum_{i=1}^{n} w_i$ onde $w_i = \sum_{j=1}^{i-1} d(j, j+1)$ é o tempo de espera da demanda i.

O problema lembra o TSP, e pode ser considerado em seu aspecto determinístico e estático análogo ao DTRP. Como é o caso do TSP, o VRP é NP-Completo tanto no grafo como no plano Euclideano. Em contraste com o TSP, que é trivial em Trees, o VRP parece difícil da mesma forma.

Apesar de seu interesse e aplicabilidade, o problema segundo os autores, na época não recebeu muita atenção da comunidade de pesquisa. Como resultado pouco foi explorado sobre o VRP.

Jaillet (1988), Bertsimas (1988) e Bertsimas, Jaillet e Odoni (1990) definem e analisam o Problema Probabilístico do Caixeiro Viajante e o Problema Probabilístico de Roteirização de Veículos como segue:

Existem n pontos conhecidos e em qualquer dada classe do problema somente um subconjunto S consistindo de $|S| = k$ pontos dos n ($0 \leq k \leq n$) que devem ser visitados.

Supondo que a probabilidade daquela instância S ocorrer é p(S). Deseja-se encontrar, *a priori*, um trajeto através dos n pontos. Em qualquer instância do problema, os k pontos, serão visitados na mesma ordem em que eles aparecem no trajeto *a priori*.

O desenvolvimento deste raciocínio prova que a solução do problema não é através do TSP clássico e sim de outras formulações considerando o aspecto probabilístico do problema.

As soluções dos autores que utilizam informações estáticas com adição de probabilidades nos parâmetros não conhecidos *a priori* e provam que mesmo "saltando" os clientes não visitados, a solução ótima não será aquela do TSP clássico. Uma característica importante do Problema Dinâmico do Reparador Viajante é que este incorpora o fenômeno de fila.

Neste cenário, os autores definem o Problema Estocástico da Mediana com Fila, do inglês *Stochastic Queue Median Problem* (SQMP), na qual a decisão mais importante é estratégica: deseja-se localizar um servidor na rede que se comporte como uma fila M/G/1. As chegadas se comportam dinamicamente, como um processo de Poisson e o Servidor (veículo), seguindo uma disciplina primeiro-que-

chega, primeiro-atendido, do inglês *First-Come, First-Served* (FCFS) é despachado de uma garagem central e retorna à origem após o serviço concluído.

O problema é localizar a garagem na rede de forma que a espera média na fila mais o tempo de viagem sejam minimizadas. Este é apropriado para análise de sistemas de serviços de emergência (polícia, bombeiros e serviços de ambulância).

Em nosso cenário, o SQMP pode ser visto como um caso de rede do Problema Dinâmico do Reparador Viajante, na qual a política é localizar o servidor e seguir uma regra de despacho FCFS.

A conexão entre problemas de localização /filas e de roteirização dinâmica de veículos também foi reconhecida por Psaraftis (1988), onde ele conjectura que, para baixas taxas de chegada, o problema dinâmico do caixeiro viajante lembra o problema de medianas, mais especificamente o 1-Mediana.

Os autores analisaram o desempenho desta política para o caso Euclideano e mostraram que isto é verdade. Sua estratégia na análise do Problema Dinâmico do Reparador Viajante foi a seguinte:

Primeiro, foram estabelecidos alguns limites inferiores para o tempo médio do sistema em todas as políticas. Então, utilizando várias técnicas de otimização combinatória, teoria das filas, probabilidade geométrica e simulação, analisaram-se as várias políticas e foram comparados seu desempenho em relação a estes limites inferiores.

Uma variante da política FCFS é demonstrada como ótima no caso de tráfego leve. No tráfego pesado, várias políticas estão dentro de um fator constante dos limites inferiores e, portanto, de uma política ótima. Associando a palavra "tráfego", à taxa de chegada das solicitações.

A política com a melhor garantia provável de desempenho é a baseada em formação de trajetos tipo Problema do Caixeiro Viajante, enquanto empiricamente a melhor política é a do vizinho mais próximo (*Nearest Neighbor*, NN).

Os resultados também demonstraram que o tempo no sistema cresce mais rapidamente com a intensidade de tráfego do que nas filas tradicionais e as condições de estabilidade são independentes da geometria do sistema. As políticas propostas pelos autores são brevemente descritas a seguir:

- O Primeiro que Chega é o Primeiro a ser Atendido. As demandas na ordem que chegam são atendidas pelo sistema.
- A Mediana com Fila Estocástica, do original Stochastic Queue Median (SQM). Esta política é derivada da anterior. Neste caso o servidor viaja diretamente para a mediana da região a ser atendida. Chegando, atende às solicitações obedecendo a uma disciplina FCFS. Após o serviço encerrado, o servidor retorna a esta mesma mediana aguardando um próximo serviço.
- Vizinho Mais Próximo. Após o serviço completado em um local de demanda, o Servidor viaja diretamente para o local da demanda mais próxima.
- Problema do Caixeiro Viajante. As demandas são agrupadas em lotes de tamanho n. Cada vez que este lote é completado, o servidor o atende de acordo com o melhor caminho do TSP. Se mais de um grupo for formado, enquanto o servidor estiver ocupado, estes serão atendidos seguindo uma disciplina FCFS.
- Curva de Preenchimento de Espaços, Space Filling Curve (SFC). As demandas são servidas, à medida que forem encontradas, durante varreduras circulares a favor ou contra à direção do movimento do ponteiro do relógio, cobrindo a região de atendimento.
- Política de Particionamento, *Partitioning Policy* (PART). A região de atendimento é particionada em micro regiões (m2), nas quais as demandas correspondentes serão atendidas usando uma disciplina FCFS. Não havendo mais demandas na microregião anterior, o servidor se desloca, seguindo um critério de movimento para a microregião seguinte onde houver demanda pendente.

2.4.2.2 O problema dinâmico do reparador viajante com m servidores

Os autores Bertsimas e Van Ryzin, em 1993, lançaram um artigo ampliando as análises realizadas no artigo de 1991, para um cenário com vários servidores com

ou sem restrições de capacidade. Neste artigo, os autores deduziram limites e propuseram novas políticas para tráfego leve e intenso, entendidos como intervalo longo e curto de chegada ao sistema respectivamente e múltiplos servidores capacitados (q) ou não. Para o caso dos não capacitados, Bertsimas e Van Ryzin ampliaram os limites inferiores no caso de m veículos.

O limite inferior pode ser interpretado como: O tempo mínimo no sistema é maior ou igual ao tempo de viagem esperado, do servidor mais próximo à localização da demanda, mais o tempo de serviço local.

Os autores, também observaram que se o número de servidores ou a velocidade for aumentada, o limite inferior para o tráfego intenso, é reduzido consideravelmente.

A política SQM de um servidor único não capacitado pode ser estendida para o caso de m servidores, simplesmente localizando cada servidor nas medianas de cada região A, as divisões da área total de atendimento. Quando chegam novas demandas, elas são associadas à região mais próxima e ao servidor correspondente. Após a demanda ter sido atendida, o servidor volta para o seu local da mediana. Os autores demonstram que a política chamada de m-SQM é ótima em tráfego leve, isto é, com intervalos longos entre as chegadas. Os autores descrevem outras políticas para o caso de tráfego intenso.

Designação Aleatória Simples, do original *Simple Random Assignment Policy* (RA μ) na qual o processo de Poisson é dividido em m subprocessos. Cada veículo se associa a um processo e as demandas são atendidas seguindo uma política de tráfego intenso μ. A política RA μ possui a garantia de um fator constante, porém o tempo no sistema aumenta de m (número de servidores).

Versão G/G/m do TSP. Aqui as demandas são agrupadas em conjuntos de tamanho n. Um trajeto ótimo de TSP é obtido, cada vez que um novo grupo n é formado. Os trajetos ótimos são atendidos pelos servidores, de acordo com uma disciplina FCFS. Os autores demonstram que para uma versão modificada desta política TSP o tempo de sistema poderia tornar-se independente de m.

Em uma versão capacitada de múltiplos servidores DTRP, um ponto de estacionamento com uma localização fixa é associada a cada servidor e os servidores

são autorizados a voltar após um serviço, somente para estes pontos. É permitido haver pontos coincidentes. A capacidade de cada servidor é denominada q, e indica quantos clientes, um único veículo, está apto a servir, antes de retornar à garagem. Intuitivamente, observa-se que o tempo no sistema aumenta quando houver uma diminuição dos valores da capacidade q.

Bertsimas e Van Ryzin (1993) propõem ainda três políticas de particionamento da região de atendimento para o caso de servidores com capacidade q. Cada uma delas apresentando diferentes formas de subdivisão da área de atendimento, com servidores seguindo rotas de caminho mínimo.

Também, reconhecem que para muitos casos em uma situação real de DTRP, a função objetivo considera uma combinação tanto de custos de viagem como de tempo de espera.

A análise confirma o dilema (*tradeoff*) entre custos de viagem e o tempo no sistema, na roteirização dinâmica. Um exemplo mostra que se os custos de viagem aumentam, a resultante é um menor tempo dos pedidos no sistema.

2.4.2.3 Uma generalização para tráfego leve e intenso

Em um artigo mais recente, Papastavrou (1996), referindo-se ao Problema Dinâmico do Reparador Viajante, apresenta uma nova política que demonstrou em suas análises ótimo desempenho em tráfego leve e muito bom desempenho em tráfego intenso. Chamada de Política de Geração consiste em posicionar o servidor na mediana da região de serviço. O Servidor se desloca para o local de serviço, voltando após o término para a mediana. Se durante a execução de um serviço surgirem vários outros serviços, em diferentes pontos da área, estes são agrupados formando um trajeto ótimo baseado do Problema do Caixeiro Viajante. O servidor quando disponível atende os serviços deste trajeto ótimo e volta para a mediana.

O autor enfatiza a importância desta política que possibilita o atendimento de serviços em ambas as situações de tráfego, o que em outras políticas pode ser difícil de administrar.

2.4.2.4 Coletas e entregas

Swihart e Papastavrou (1999) tratam o DTRP dentro do contexto do problema da Coleta e Entrega. O problema recebe a denominação de Problema Dinâmico de um único Veículo para Coleta e Entrega, do inglês *single-vehicle Dynamic Pick-Up and Delivery Problem* (DPDP).

O objetivo desta solução é minimizar o tempo esperado de sistema para as demandas. São consideradas capacidades unitárias e múltiplas, e considera-se como capacidade múltipla aquele veículo com capacidade infinita, ou seja, o veículo pode carregar um número infinito de demandas.

Os autores obtêm um limite inferior de desempenho tanto para capacidade unitária como múltipla em casos de tráfego leve ou intenso. Para capacidade unitária, os autores examinaram três políticas:

- Política de Setorização – a região de serviço é dividida em Setores.
- Política da Empilhadeira (*Stacker Crane*) – as demandas são agrupadas em conjuntos contínuos à medida que chegam e um trajeto ótimo é construído logo que um novo conjunto é montado.
- Política do Vizinho Mais Próximo.

Neste caso, por meio de testes empíricos, se constatou que a política do Vizinho Mais Próximo é superior às demais enquanto a da Empilhadeira é superior a de Setorização.

Para o caso de capacidade múltipla, as seguintes políticas foram propostas:

- A política Dual TSP, na qual as demandas são agrupadas em conjuntos de n demandas. Um trajeto ótimo é formado com base nas coletas para cada conjunto. Em seguida para este mesmo conjunto é formado um trajeto ótimo com as entregas.

- A política de Vizinho Mais Próximo, na qual o veículo se desloca para a coleta ou entrega válida mais próxima. Entende-se por entrega válida aquela cuja correspondente coleta tenha sido realizada.

Os autores demonstram que a política do Vizinho Mais Próximo com Múltipla Capacidade tem desempenho melhor que do Dual TSP.

2.4.2.5 Estratégias de espera para coleta e entrega com janela de tempo

Mitrovic-Minic e Laporte (2004) definiram e compararam um conjunto de estratégias de espera do veículo, através de um estudo empírico, para um Problema com Janela de Tempo para Coleta e Entrega de cartas e pequenos pacotes, normalmente utilizado em empresas de *courier*.

Uma vez que existem horários determinados para Coleta e Entrega, durante a execução da rota, pode surgir a necessidade de esperar para iniciar o serviço em um cliente, tempo este chamado de tempo disponível para espera.

Segundo o estudo, a distribuição adequada deste tempo disponível de espera, pode afetar a qualidade da solução do problema, em termos de número de veículos e distância percorrida.

O estudo também demonstra que, se todo o tempo disponível de espera for usado no início do trajeto, a distância percorrida será diminuída, porém com a necessidade de maior número de veículos para atender todas as solicitações. No caso do tempo disponível ser usado em espera no final do trajeto, será necessário um número menor de veículos, porém com uma distância percorrida maior.

Portanto, a proposta deste trabalho foi combinar ambas as estratégias, onde o trajeto total está particionado em zonas de serviço e o tempo total de espera foi distribuído proporcionalmente, de acordo com o tempo de serviço necessário em cada zona. Com esta heurística de espera, os autores demonstraram uma diminuição do trajeto e do número de veículos simultaneamente.

Um segundo trabalho de Mitrovic-Minic e Laporte, juntamente com Krishnamurti (2004) demonstrou que as estratégias de espera, alcançam objetivos de

redução de distância e de quantidade de frota diferentes, no atendimento em curto (2 horas) e longo prazo (o restante da jornada) em uma ambiente de roteirização e programação dinâmicos.

Um outro trabalho empírico de autoria de Branke et al. (2005), por meio de um estudo de probabilidade geométrica explorou a possibilidade da entrada de um novo cliente em um sistema dinâmico quando a estratégia de espera é adotada. No cenário para dois veículos em uma mesma área total ou parcialmente coincidente não restrita em circulação, o artigo demonstrou que o nível de serviço melhorou (diminuindo o custo de inserção de clientes e aumentando a possibilidade de atendimento) e reduziu-se a distância percorrida. Este mesmo trabalho demonstrou que a estratégia de espera não demonstrou o mesmo resultado mencionado, quando foi utilizado um único veículo.

Em Dynamic Vehicle Routing Based on Online Traffic Information, Fleischmann, Gnutzmann e Sandvoss (2004) detalharam uma modelagem de sistema dinâmico para pedidos únicos de coleta e entrega com janela de tempo alimentado por um Centro de Gerenciamento de Tráfego.

Por meio da monitoração de trajetos, o tempo real necessário para as viagens pôde fazer parte da montagem das rotas dinâmicas. Utilizando-se de técnicas de inserção baseadas em Solomon (1987) e em Solomon, Baker e Schaffer (1988), e de forma alternativa, regras e algorítmos de designação, os autores aplicaram os modelos em uma empresa de serviço *courier* com uma frota de 50 veículos para atender 981 pedidos, sendo 481 recebidos dinamicamente.

Os resultados apresentaram uma grande vantagem na utilização de técnicas de designação flexível (com as rotas modificadas a cada evento), em lugar das de inserção (que consideravam todo o horizonte da jornada de trabalho), tanto no tempo de processamento como nas violações de janela de tempo (atrasos) e custos de espera e de movimentação.

2.4.3 O Problema Dinâmico do Disque para Viajar

O Problema Disque para Viajar, do inglês *Dial-A-Ride Problem* (DARP), conforme Bodin et al. (1983), consiste no processo de coletar e entregar um conjunto de pessoas com origens e destinos diferentes em horários pré-estabelecidos. Se as pessoas demandam tal serviço de forma imediata cuja roteirização e programação tenha de ser realizada em tempo real, o problema é considerado dinâmico ou em tempo real, do inglês *Dynamic Dial-A-Ride Problem* (DDARP). O DARP convencional pode ser dividido em três grandes categorias:

- Muitos-para-um (*Many-to-One*, MTO): Onde ocorrem várias coletas tendo um único destino. Como exemplo, podemos mencionar um Microônibus coletando pessoas com destino a um terminal ou shopping.
- Muitos-para-poucos (*Many-to-Few*, MTF): A mesma modalidade acima, porém com entregas em poucos locais.
- Muitos-para-muitos (*Many-to-Many*, MTM): Muitas coletas, em um ou vários locais diferentes e de forma análoga para os destinos.

Normalmente, tal problema envolve tanto a dimensão geográfica, no papel do processo da roteirização, como o papel temporal no caso dos tempos de coleta e de entrega que podem ser particularizados para cada pessoa. A função objetivo clássica para este tipo de problema consiste em encontrar uma rota ótima que utilize o menor número de veículos e mantenha certo nível de serviço, por meio do atendimento das preferências dos passageiros. As restrições comuns são a jornada de trabalho, as janelas de tempo para coleta e entrega dos passageiros e o número máximo de veículos disponíveis.

Jaw et al. (1986) propuseram para solução do problema dinâmico com janelas de tempo através de heurísticas que procuravam balancear o custo de realização do atendimento com as preferências dos passageiros em um modelo multi-veículos.

Dial (1995), em seu artigo *Autonomous Dial-A-Ride Transit* (ADART), apresentou uma versão modernizada do DARP. O sistema apresentado possui um processo completamente automatizado para despacho e gerenciamento dos veículos, servindo tanto assinantes do serviço ADART, como solicitações on-line para atendimento. Dial argumenta em seu artigo que o sistema apresentado é um passo para o futuro, na direção das soluções de transporte nas cidades ou regiões com baixa densidade populacional.

Ainda nos casos de baixa demanda, faz sentido reposicionar o veículo para locais estrategicamente localizados, lembrando o problema de localização de instalações que Psaraftis (1988) sugere ser estudado juntamente com o de roteirização.

2.5 Problemas Relacionados

Du, Li e Chou (2005), no artigo *Dynamic Vehicle Routing for Online B2C Delivery*, investigam vários algorítmos adequados para resolução de problemas de Roteirização Dinâmica de Veículos para um ambiente B2C.

O ambiente B2C é caracterizado por pedidos registrados através de um site de compras na internet e enviados para processamento de forma contínua. Estes pedidos representam pequenos volumes, quase sempre para clientes aleatórios, pesquisadores de preço baixo, sem lealdade e frequência de compra indefinida, porém exigentes na precisão e rapidez na entrega.

O artigo mencionado apresenta a estrutura de um modelo computacional bastante elucidativo de uma situação operacional. Abordagens combinadas de algorítmos utilizados para soluções de roteirização e programação estáticas são aplicadas para um caso dinâmico ou parcialmente dinâmico.

Os autores adotam a abordagem de três fases mencionadas em Bodin (1983):

(1) Formação Inicial de Rotas;

(2) Melhoramentos Inter-Rotas; e

(3) Melhoramentos Intra-Rotas, além de diversos indicadores de desempenho, como: tempo total para atendimento de todos os pedidos, distância percorrida pelos veículos, tempo médio de atendimento, tempo médio de atraso etc.

Após a realização de diversas simulações, com o devido cuidado estatístico, recomendam a utilização das estratégias de *First-Fit-Nearest* ou *Best-Fit-Nearest* para formação inicial de rotas e outras combinações de estratégias de melhoramentos, inter e intra rotas.

Os autores enfatizam a necessidade de soluções de processamento rápido que resultem na diminuição do tempo médio de atendimento do pedido (tempo de espera mais trajeto).

Slater (2002) apresenta uma aplicação de Roteirização e Programação Dinâmicas de Veículos (*Dynamic Routing and Scheduling Vehicles*) aplicados a um cenário de comércio eletrônico, onde inicialmente são montados pedidos e rotas "fantasmas". Estes pedidos e rotas "fantasmas" são obtidos por meio de informações históricas de demanda, locais de atendimento e correspondentes janelas de tempos por dia da semana.

Por meio destas informações são previstas as necessidades de veículos e a otimização das rotas. A partir do site de vendas, após a escolha do produto, os clientes apresentam sua preferência de dia e horário de entrega em uma agenda. Com as informações da agenda são trocados os pedidos "fantasma" por pedidos reais, compondo gradativamente as rotas de entrega e procedendo seu despacho.

Em seu artigo, Slater (2002) apresenta uma metodologia para modelar uma solução de Roteirização e Programação Dinâmicas, além de recomendar a utilização de um sistema de suporte à decisão com intervenções manuais em alguns casos durante o processo operacional. O autor menciona a utilização de heurísticas de inserção para formação e atualização das rotas e estratégias de intercâmbio para melhoramento das mesmas.

O autor enfatiza que o processo mencionado deve ser muito rápido. Também fundamenta todo este sistema na utilização de equipamentos de

comunicação e de rastreamento nos veículos. A Figura 2.1 apresenta a agenda onde o cliente escolhe sua conveniência para a entrega.

Zone 44 Time Now 1038 hrs	**Sunday Today**	**Monday 10-Jan**	**Tuesday 11-Jan**	**Wednesday 12-Jan**	**Thursday 13-Jan**	**Friday 14-Jan**	**Saturday 15-Jan**	**Sunday 16-Jan**
Anytime 0700am to 22pm	X							
Morning 0700am to 1200pm	X							
0700am to 0730am	X	X	X	X	X	X	X	X
0730am to 0800am	X	X	X	X	X	X	X	X
0800am to 0830am	X	X	X	X	X		X	X
0830am to 0900am	X		X				X	X
0900am to 0930am	X							
0930am to 1000am	X							
1 000am to 1030am	X							
1030am to 1 100am	X							
1100am to 1130am	X	X	X				X	X
1130am to 1200pm	X	X	X				X	X
Afternoon 1200pm to 1700pm								
1200pmto 1230pm	X	X	X	X	X	X	X	X
1230pm to 1300pm		X					X	X
1300pm to 1330pm								
1330pm to 1400pm								
1400pm to 1430pm								
1430pm to 1500pm								
1500pm to 1530pm								
1530pm to 1600pm								
1600pm to 1630pm			X	X	X	X		
1630pm to 1700pm	X	X	X	X	X	X	X	X
Evening 1700pm to 2200pm								
1700pm to 1730pm	X	X	X	X	X	X	X	X
1730pm to 1800pm		X	X				X	X
1800pm to 1830pm		X						
1830pm to 1900pm								
1900pm to 1930pm								
1930pm to 2000pm								
2000pm to 2030pm	X							
2030pm to 2100pm	X							
2100pm to 2130pm	X	X	X	X	X	X		
2130pm to 2200pm								

Figura 2.1 – Agenda de conveniência de entrega.

Ichoua, Gendreau e Potvin (2000) exploram o benefício de permitir o desvio de um veículo, enquanto em um trajeto para atender um determinado cliente para um outro que acabou de entrar no sistema. Testes empíricos demonstraram que a adoção deste procedimento resulta na redução no número de clientes não atendidos, além da diminuição na distância total percorrida e no atraso total. Este último quando houver janela de tempo.

O mesmo fenômeno é investigado por Regan, Mahmassani e Jaillet (1998) no contexto dinâmico de um único veículo de capacidade única para coleta e entrega. Usando simulação, eles concluíram que a estratégia de desvio pode reduzir a distância total percorrida, porém até certo limite de desvios, quando se estiver perto do final da jornada de trabalho.

Os mesmos autores estendem os estudos para múltiplos veículos em 1995. Também estudam em (1996) o efeito de redesignar os clientes que já estavam programados, porém ainda não servidos.

Spivey e Powell (2004) estudam o Problema da Designação Dinâmica, exemplificando com o caso de motoristas sendo associados a cargas ou passageiros. Mencionam: a Designação Puramente Míope cuja decisão ocorre somente com as informações disponíveis no momento e não considera as situações que podem ocorrer no futuro e formulam o Valor da Informação Antecipada.

Também exploram a contribuição para a função objetivo, quando ocorre a atribuição do recurso à tarefa (carga ou passageiro) considerando os seus atributos obtidos no horizonte de tempo. Os autores propõem um conjunto de modelos gerais de resolução através de programação dinâmica e de programação linear de múltiplos estágios.

Os autores desenvolvem um conjunto de Modelos chamados de Adaptativos, que consideram atributos estocásticos e informações ligadas às entidades associadas (cargas e recursos) no tempo.

Vale ressaltar que, por meio de estudos experimentais, os autores concluíram que com informação antecipada suficiente (medida em tempo de antecipação) os Modelos Míopes ultrapassam em desempenho de otimização (medida em aproximação do ótimo) os modelos adaptativos definidos pelos autores.

2.6 O Nível de Dinamismo

Em sua tese, Allan Larsen (2000) apresenta o conceito de Nível de Dinamismo em um problema de roteirização. Segundo o autor, a medida de desempenho de um sistema de roteirização dinâmica não é tarefa trivial.

Em contraste com a roteirização estática, a roteirização dinâmica depende não só do número de clientes, sua disposição geográfica, como também do número de eventos e o momento em que estes aconteçam.

Por esta razão, uma medida simples para descrever o dinamismo de um sistema, seria valiosa apenas quando se deseja examinar o desempenho de algum algorítmo específico em determinadas circunstâncias.

Portanto, medidas de descrição de desempenho de um sistema podem ser inadequadas para medição de desempenho em outros sistemas. Este trabalho buscou apresentar uma estrutura para medição e análise do desempenho de um sistema de roteirização dinâmica por meio de seu nível de dinamismo para os casos com ou sem janela de tempo.

2.6.1 Dinamismo sem Considerar a Incidência de Pedidos no Tempo

Em um sistema sem janela de tempo, somente três parâmetros são relevantes: o número de clientes estáticos, o número de clientes dinâmicos e o momento de chegada dos pedidos dos clientes dinâmicos. Segundo Lund et al. (1996) apud Larsen (2000) a definição do Nível de Dinamismo é: ND = Pedidos Dinâmicos / Pedidos Totais.

Esta fórmula não considera o momento de chegada dos pedidos dinâmicos, o que para efeito de minimizar a distância percorrida é importante.

2.6.2 Dinamismo Considerando a Incidência de Pedidos no Tempo

Em casos onde houver uma maior incidência de pedidos logo ao início da jornada de trabalho do servidor, o algorítmo de otimização terá maiores opções de escolha do caminho mínimo. Já não é o caso, quando os pedidos dinâmicos estiverem distribuídos no período da jornada ou tiverem se acumulado no final da jornada de trabalho do servidor. Um pedido recebido próximo ao final da jornada de trabalho estaria muito próximo de um pedido anteriormente atendido no início desta mesma jornada, por exemplo.

Pelas razões acima que surge a fórmula do Nível Efetivo de Dinamismo:

$$NED = \frac{\sum_{i=1}^{n_{im}} (\frac{t_i}{T})}{n_{tot}}$$

onde :

. t_i é o instante de tempo em que o pedido i é recebido, T é o tempo final da jornada de trabalho.

. $n_{tot} = n_{ant} + n_{im}$, sendo n_{ant} o nº de pedidos antecipados enquanto n_{im} representa o nº de pedidos que são recebidos após a saída do servidor.

No caso de haver janelas de tempo nos pedidos:

$$NED_{tw} = \frac{1}{n_{tot}} \sum_{i=1}^{n_{tot}} (1 - \frac{r_i}{T})$$

onde :

$r_i = l_i - t_i$, sendo l_i o tempo limite na janela de tempo do pedido i e r_i o tempo de reação.

O Nível Efetivo de Dinamismo se encontra entre 0 e 1, sendo que se igual a zero representa um sistema puramente estático, enquanto que se aproximar de 1, puramente dinâmico.

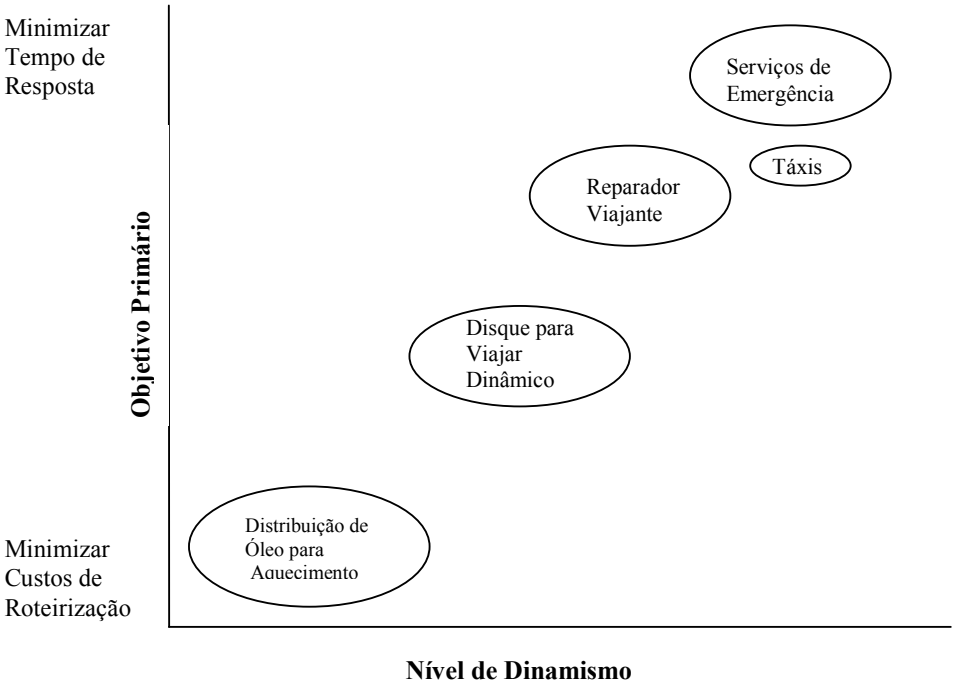


Figura 2.2 – Objetivos primários e nível de dinamismo em diversas aplicações.
Fonte: Larsen (2000).

O gráfico apresentado na tese de Larsen, Figura 2.2, mostra o relacionamento entre grupos de aplicações, Nível de Dinamismo e objetivos primários. Em aplicações tipo serviços de emergência como uma ambulância em que o grau de dinamismo é perto de 1 o objetivo primário é minimizar o tempo de resposta ou seja minimizar a espera mais o tempo de trajeto.

No caso de distribuição de óleo para aquecimento, grande parte dos pedidos já estava agendada, portanto com Nível de Dinamismo se aproximando de 0, temos o objetivo primário na minimização dos custos (provavelmente de trajeto).

O autor, desta forma, divide as aplicações em sistemas fracamente dinâmicos, moderadamente dinâmicos ou fortemente dinâmicos, associando as características da atividade ao Nível de Dinamismo e este às variações na Função Objetivo.

2.7 O Problema Parcialmente Dinâmico do Reparador Viajante

Ainda, na tese de Larsen (2000), é apresentado o Problema Parcialmente Dinâmico do Reparador Viajante (*Partially Dynamic Repairman Problem*, PDTRP), uma versão adaptada de Bertsimas e Van Ryzin (1991), envolvendo tanto solicitações imediatas como antecipadas que não foram consideradas no artigo original. O autor define o PDTRP como segue:

- O reparador (o veículo/servidor) viaja a uma velocidade constante em uma região limitada A da área A.
- Um subconjunto de demandas é dinâmico. Elas chegam no tempo, de acordo com um processo de Poisson com taxa de chegada igual a λ. Os locais das demandas estão distribuídos em A de forma uniforme e independente.
- Cada demanda exige uma quantidade de tempo de serviço no local distribuído de forma independente e uniforme. Quantidade esta, conhecida apenas quando finalizado o serviço.
- A rota é atualizada somente no local do cliente. Ou seja, o servidor não pode mudar seu destino enquanto viajando.
- O objetivo é minimizar o custo, em relação à distância percorrida.

No artigo as diferenças entre o DTRP e o PDTRP envolvem dois aspectos:

- O primeiro são as localizações geográficas dos clientes com as solicitações antecipadas sendo conhecidas antes do despacho do veículo, apesar de seus respectivos tempos de serviço continuarem desconhecidos.
- O segundo é quanto à função objetivo: enquanto o PDTRP procura minimizar a distância de viagem do reparador, o DTRP se preocupa em minimizar o tempo total no sistema de todas as solicitações.

Este cenário do PDTRP engloba os serviços de manutenção residencial e de coleta de malotes quando não houver uma exigência de janela de tempo. Como

exemplo, o autor comenta o caso em que as solicitações antecipadas são atendidas na parte da manhã e as solicitações imediatas à tarde de um mesmo dia.

Embora as políticas do PDTRP seguissem as mesmas linhas básicas do DTRP, elas sofreram adaptações para considerar o caso da solicitação antecipada e para isto foram implementadas estratégias de montagem de rotas antes do despacho.

No caso da política do Primeiro que Chega é o Primeiro a ser Atendido (FCFS) e de Particionamento (PART) as solicitações antecipadas são atendidas através de uma regra do Vizinho Mais Próximo (NN) para formação da rota. As solicitações imediatas são acrescentadas ao final da rota à medida que chegam.

Considerando-se que este caso foi inserido na tese do Larsen (2000), principalmente para relacionar o Nível de Dinamismo com o desempenho das várias políticas de um sistema dinâmico, mencionam-se abaixo algumas das principais conclusões da tese:

Quando o Nível de Dinamismo se torna mais forte (maior número de solicitações imediatas), o comportamento do sistema na regra do Vizinho Mais Próximo lembra a do Primeiro que Chega é o Primeiro a ser Atendido. Isto, devido à existência de um grande número de solicitações imediatas, surgindo no sistema, sem necessariamente serem mais próximas do último servido. Neste momento ocorre uma transição do aspecto geográfico (NN) para o temporal (FCFS).

Também se observa uma relação linear entre o nível de dinamismo e a distância percorrida, traduzida em custo da viagem em um ambiente de muitas solicitações.

2.8 Conclusões do Capítulo

Neste capítulo foram resumidos textos relativos à roteirização em geral e em específico à vertente dinâmica do problema, com ênfase para sua aplicação a serviços de campo.

Também foram apresentados resumos sobre os fundamentos do problema do caixeiro viajante e de roteirização clássica de veículos, denominados de modalidades estáticas, devido ao aspecto estático das variáveis envolvidas.

As teorias clássicas da roteirização e as conseqüentes soluções contribuíram e em muitos casos foram adaptadas para resolver os problemas dinâmicos; observa-se isto nos vários artigos apresentados.

Neste estudo observou-se que, apesar do artigo que estabelece as bases teóricas da roteirização dinâmica, de autoria de Psaraftis datar de 1988, a evolução desta técnica não seguiu o mesmo caminho da roteirização estática, atualmente com muitas variações, artigos e aplicações práticas.

Isto talvez possa ser explicado pelo fato de somente há pouco tempo terem sido disponibilizadas tecnologias práticas, confiáveis e econômicas que permitem o estabelecimento de redes móveis de informações, proporcionando a comunicação instantânea entre os veículos, suas centrais de controle e clientes.

E, seguindo esta tendência, já se observa o recente surgimento de inúmeros artigos sobre a roteirização dinâmica, afirmando sua vocação de estado da arte no tema geral da roteirização.

3 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

3.1 Os Serviços de Atendimento e Manutenção em Campo

São considerados serviços de atendimento e manutenção em campo, aqueles derivados do Problema do Caixeiro Viajante (TSP), tanto em sua forma estática como dinâmica, de acordo com Psaraftis (1988) e do Problema Dinâmico do Reparador Viajante (DTRP), introduzido por Bertsimas e Van Ryzin (1991).

Encontra-se na vida real o serviço de inspeção e manutenção de equipamentos e instalações como: elevadores, caixas eletrônicos bancários, estações de rádio base para telefonia celular, torres de distribuição ou transmissão de energia elétrica, redes elétricas, sinalização de trânsito, telefonia, etc.

Outra modalidade de serviços é o atendimento às ocorrências que envolvem pessoas e comunidades, como: reclamações sobre barulho, manifestações, eventos, acidentes, atentado ao patrimônio ou à vida, etc.

Os serviços em campo exigem o deslocamento de técnicos, agentes, policiais, bombeiros, paramédicos ou especialistas até o local da ocorrência onde o serviço se faz necessário. Este deslocamento é realizado por meio de vários tipos de veículos ou mesmo por meio de caminhada, como fazem os carteiros.

Quando determinada demanda de atendimento possuir um atributo relacionado com o suporte à vida, o tempo de mobilização e de deslocamento de uma ambulância, por exemplo, definido como intervalo de tempo de resposta à demanda, ou ocorrência, é o fator crítico. Isto porque os primeiros socorros fazem a diferença entre a vida, morte ou o surgimento de seqüelas irreversíveis em uma pessoa, no caso de um acidente. O mesmo vale para eventos de segurança pública onde houver um atentado contra a vida de pessoas.

Nos casos em que não se tratar de vidas humanas, porém cuja demanda represente a ocorrência de uma interrupção no fornecimento de um serviço ou bem, o custo desta interrupção é comparado ao custo do atendimento. Onde o custo do atendimento for inferior ao custo da interrupção, os intervalos de tempo de resposta e

de finalização do serviço serão fundamentais para o restabelecimento da normalidade. Define-se o custo de atendimento como a soma dos custos de mobilização, de deslocamento até o local da demanda e do serviço de reparo ou de restauração da normalidade.

Nos demais casos, onde os custos de interrupção e de atendimento forem equivalentes ou o custo de atendimento for maior, adota-se maior flexibilidade para o intervalo de tempo de resposta ou de finalização do serviço e priorizam-se os custos para as decisões sobre a forma de atendimento.

Um caso de exceção acontece quando a demanda tiver um atributo de nível de serviço, um atendimento preferencial cujo tempo de resposta pode ser encurtado devido a fatores de competitividade no mercado de atuação da empresa ou cujos custos sejam cobertos por uma remuneração adequada.

Portanto, nos casos onde houver maior flexibilidade para a realização do serviço, as ocorrências ou pedidos de serviços são agrupados e programados para atendimento em um período de tempo conveniente, em geral no dia seguinte, buscando reduzir os custos envolvidos, principalmente os de deslocamento. Nos casos urgentes ou prioritários a mobilização é imediata, uma vez que o intervalo de tempo de resposta é um fator relevante.

Considerando que as urgências ou prioridades de atendimento no universo dos serviços, em geral comportam-se como exceção, na maioria das instituições e empresas existe uma combinação de atendimento a Pedidos de Serviços Antecipados ou flexíveis com Pedidos Imediatos ou urgentes, de forma tal que os veículos seguem uma rota programada inicialmente e realizam desvios para atendimento prioritário ou emergencial.

A Figura 3.1 apresenta em um plano Euclideano um caso em que pedidos antecipados foram agrupados previamente em uma rota cujo veículo associado sofre vários desvios devido ao surgimento de pedidos imediatos em diferentes instantes. Ao final da jornada de trabalho o veículo volta para a garagem de onde saiu no ponto (0,0).

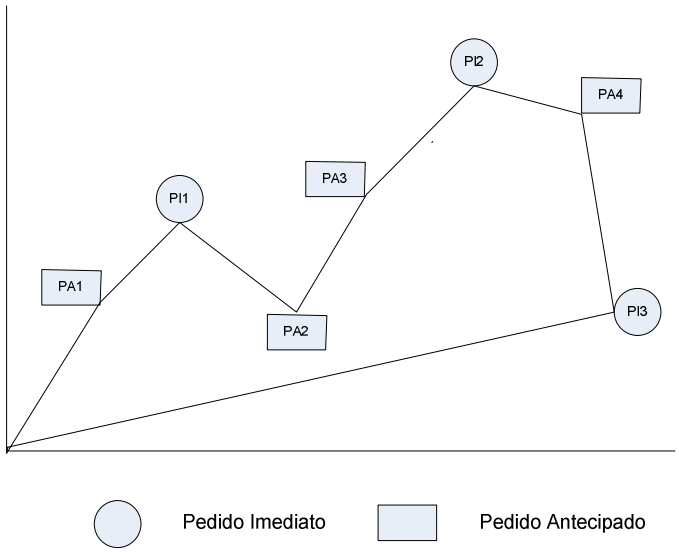


Figura 3.1 Exemplo de atendimento de Pedidos Antecipados(PA) e Imediatos (PI)em um plano Euclideano.

3.2 O Sistema de Atendimento de Serviços em Campo

Um Sistema de Atendimento de Serviços de Campo é o nome que se dá ao conjunto de recursos e processos que interagem no sentido de atingir o objetivo de executar os serviços nos locais onde ocorre uma demanda.

São vários os componentes organizacionais de um sistema de atendimento de serviços em campo que, embora apresentem variações nos diferentes ramos de negócios e instituições, mantêm uma estrutura comum, enumerada a seguir :

- Central de Recebimento de Pedidos – compreende o recebimento dos pedidos antecipados, seu agrupamento e envio para uma ou várias bases. Esta central pode não existir quando estiver integrada com a Central de Operações ou distribuída pelas bases.
- Bases ou Garagens locais– onde ficam estacionados os veículos, técnicos, agentes ou policiais condutores e onde ocorre o despacho inicial ou todos os despachos dos mesmos. Em muitos casos, quando o processo não é centralizado, são nestas bases que, de posse dos pedidos, ocorre a programação das rotas, uma vez que possuem a informação de qual o veículo que se encontra disponível no período da operação.

- Central de Operações – um conceito mais moderno, visando a dinamizar todo o processo, que concentra em um mesmo local todo o planejamento, monitoramento e execução das operações.

3.2.1 Os Processos típicos de uma Central de Operações

Em alguns casos a Central de Operações trata todos os processos de um sistema de atendimento, desde o recebimento de pedidos, programação de rotas, e todo o seu despacho. Em outros casos se concentra no recebimento de pedidos imediatos, identificação de veículos mais próximos e despacho destes para atendimento dos pedidos. A Figura 3.1 ilustra os recursos envolvidos em uma Central de Operações. A seguir são descritas os principais processos de uma Central de Operações:

As demandas, representadas pelas solicitações de serviço, ou ocorrências são recebidas de diversas maneiras, dependendo do grau de informatização do sistema de atendimento: (1) via Internet, (2) via telefone para uma central de atendimento, (3) via e-mail, e (4) via outra central de atendimento integrada.

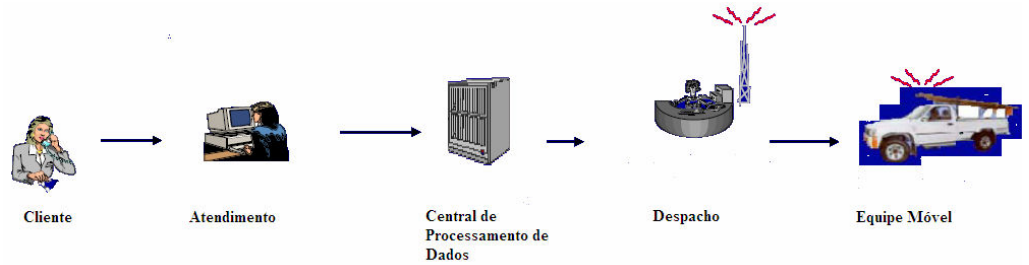


Figura 3.2 – Processos de um sistema de atendimento.

Uma vez recebidas, as solicitações são qualificadas, formatadas e separadas por prioridade. Em seguida, são enviadas para uma central de despachos que, de posse das informações sobre a localização, e o andamento dos serviços, escolhe o veículo e técnico de campo que será mobilizado para atender a solicitação (processo

chamado de despacho). Esta modalidade de despacho é denominada despacho monitorado. Normalmente o técnico, ao chegar ao local da solicitação, avisa o despachador de sua localização, e faz o mesmo ao finalizar o serviço no local. Havendo pedidos antecipados, o técnico já possui uma programação de serviço, que vai seguindo até que seja solicitado um desvio enviado pelo despachante, em casos de emergência. Em outros casos, o próximo serviço vai sendo enviado caso a caso, até o final da jornada de trabalho.

3.3 Sistemas de Atendimento em Instituições e Empresas na Cidade de São Paulo

Com o objetivo de conhecer as aplicações reais que estão relacionadas com a roteirização dinâmica ou parcialmente dinâmica, foram visitadas ou contatadas por telefone algumas instituições e empresas na cidade de São Paulo, que realizam atendimento em campo a ocorrências críticas que necessitam de rápido tempo de resposta. As empresas e instituições contatadas foram as seguintes:

- Polícia Militar do Estado de São Paulo – Comando da Capital.
- Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo – Comando da Capital.
- CET – Companhia de Engenharia de Tráfego de São Paulo.
- Central de Táxi Vermelho e Branco.
- Brinks – Operação de Manutenção de Caixas Eletrônicos.
- Empresas de Manutenção na rede Telefônica, na rede Elétrica de Baixa Tensão, Manutenção em Elevadores e Instalações Prediais.
- Empresas de Coleta de Malotes e Documentos (UPS, FEDEX etc.).

Neste capítulo resumem-se as principais características relativas aos problemas de designação e roteirização que foram encontrados durante a realização das visitas.

3.3.1 O Sistema de Atendimento

Todas as Instituições e Empresas contatadas possuem um sistema de atendimento com uma Central de Operações, que se compõe de atendentes e despachantes e quando o volume de demandas urgentes não for significativo, uma mesma pessoa desempenha ambos os papéis. Quando as ocorrências puderem ser postergadas, em geral existe a Figura do Programador que as acumula em roteiros por veículo para atendimento no dia seguinte.

3.3.2 Localização da Demanda

No processo de qualificação e formatação da solicitação, associa-se o local da mesma por meio de coordenadas geográficas, o que permite cálculos de distâncias e tempos.

Observa-se que, no caso da Polícia Militar de São Paulo, CET e Bombeiros, cada ocorrência é geocodificada através de seu endereço, resultando em coordenadas de latitude e longitude, exceto no caso dos Bombeiros, que utiliza o Sistema UTM representado por coordenadas inteiras x e y.

Na Central de Táxi, os atendentes localizam o endereço em um Guia de Ruas, que possui uma codificação do Setor da Chamada.

Nos demais casos, a geocodificação fica no Cadastro de Clientes e seus Equipamentos, como é o caso do endereço dos caixas eletrônicos, estações de distribuição de energia elétrica, etc.

3.3.3 Localização do Veículo

Os veículos possuem diversas formas de posicionamento inicial: partem de sua residência, de um local determinado ou de uma ou mais garagens. Também informam o momento de retorno à sua base e quando desviam da rota para atender alguma emergência.

O seu posicionamento é informado, na grande maioria dos casos, por meio de rádio ou telefone celular. Foram poucos os casos de veículos rastreados.

Da mesma forma que a solicitação, a localização do veículo também é convertida em coordenadas geográficas.

3.3.4 Formas de Despacho

Foram encontradas diversas formas de despacho, considerando que, nas empresas e instituições pesquisadas, este nome significa o processo de associação do veículo a uma Solicitação de Serviço, e também o momento de expedição ou mobilização do veículo para atendimento.

O aproveitamento dos veículos e técnicos, exceto nos casos de operações de suporte à vida (ambulâncias, resgate etc.), se dá por meio de uma programação de serviços (rotas), com base em solicitações recebidas no dia anterior. Estes serviços possuem uma certa margem de flexibilidade no tempo para execução. Com o surgimento de casos de alta prioridade, a programação é desviada para atendimento destes casos, e retomada posteriormente, se possível.

As Estratégias de Despacho de maior utilização são as de atendimento da ocorrência mais antiga, que se pode associar com a do Primeiro que Entra é o Primeiro a ser Atendido (do inglês *First Come First Served*-FCFS), ou a mais próxima do Veículo que estiver disponível, Vizinho Mais Próximo (*Nearest Neighbor* -NN), sempre considerando também as ocorrências de maior prioridade. Nos casos em que o processo é automatizado, a escolha do veículo mais próximo se

dá pela localização deste em um setor dentro ou próximo do setor do pedido ou ocorrência, considerando-se os setores como subdivisões da área de atendimento.

Na maioria dos casos, a experiência do despachador é que prevalece na decisão sobre a proximidade. O veículo mobilizado para atendimento no caso FCFS é o disponível há mais tempo, onde pode-se citar o exemplo dos táxis que permanecem em fila no ponto aguardando seu despacho. No caso da Polícia, a escolha da ocorrência mais antiga na fila, que pode ser entendida pela que entrou primeiro (FCFS) para atendimento, coincide com a escolha do veículo mais próximo para atendê-la. Este procedimento faz surgir uma modalidade que combina a estratégia FCFS, valendo para a ocorrência, e a estratégia NN, valendo para a escolha do veículo em relação à ocorrência. Esta estratégia combinada minimiza o tempo de espera da ocorrência.

3.3.5 Particionamento da Área de Atendimento

Em todos os casos levantados existe uma divisão da área de atendimento. Cada despachante em uma central de atendimento se responsabiliza por uma ou mais áreas. São vários os casos em que um ou mais veículos ficam dedicados a uma área de atendimento. Este é o caso típico dos Bombeiros, com seus postos distribuídos pela cidade. Em situações onde a demanda se modificar temporariamente, os veículos são deslocados, acompanhando um maior volume previsto de solicitações.

Observa-se, na maior parte dos casos pesquisados, que o particionamento da área de atendimento se dá obedecendo a barreiras que impossibilitam a mobilidade do veículo, como: linhas férreas, rios, grandes avenidas, marginais etc. Estas barreiras interferem muito no cálculo da distância linear adotada pela maioria das empresas e instituições. Isto é percebido quando os locais das ocorrências e dos veículos se encontram em lados opostos de uma barreira.

3.3.6 Outras Características

Percebe-se que, no caso da Polícia Militar e CET, as viaturas e agentes, com nível de especialização geral, familiarizam-se com o território e fatores que podem gerar eventos responsáveis por ocorrências. Desta forma, são importantes vetores de informações para acionar medidas preventivas, como sinalização, presença ostensiva, etc. Na maior parte dos casos, embora existam recursos especializados estacionados em pontos estratégicos, o primeiro atendimento em emergências é realizado por pessoal de inspeção ou patrulhamento de rotina, como forma de minimizar o tempo de resposta até que chegue uma equipe mais especializada. Pode-se citar como exemplos:

- Polícia Militar – o atendimento inicial realizado por uma viatura da Ronda Escolar, seguido por uma viatura da Força Tática, no caso de um assalto.

- CET – o atendimento inicial por agente de trânsito a pé que se encontrava na fiscalização, seguido por um guincho, necessário para a remoção de um veículo.

Foram observados casos em que o veículo e o técnico obedecem a uma programação prevista para até parte do dia de trabalho, e após certo momento aguardam novos serviços enviados em tempo real pelo despachante correspondente. Nestes casos existe foco no prazo de atendimento. A comunicação é realizada na maior parte dos casos por rádio; ainda são poucos os casos da utilização de computadores de bordo ou portáteis. Não se soube de nenhum caso de despacho silencioso (*Silent Dispatching*), onde um sistema informatizado toma as decisões e monitora automaticamente as equipes de campo.

3.4 O Problema do Cálculo das Distâncias

Como observado nos levantamentos realizados, o processo dinâmico de escolha do servidor para atender a determinado pedido de serviço se dá principalmente através do critério de proximidade entre eles, o que faz com que a metodologia de cálculo de distância entre pontos desempenhe um papel de grande importância na roteirização dinâmica. Esta seção descreve e comenta as peculiaridades deste cálculo, iniciando com os conceitos de rede de transporte, nós, arcos e distâncias lineares e reais.

3.4.1 Rede de Transporte, Nós, Arcos e Distâncias

O transporte se realiza através de Vias ou Rotas interligadas, formando uma Rede de Transporte. Quando o deslocamento acontece dentro das cidades, por meio de suas ruas e avenidas, define-se a rede como de artérias urbanas, ou simplesmente de Rede Urbana. No caso de longo percurso, quando se percorrem rodovias, denomina-se a rede de Rodoviária. Os pontos de interesse, chamados de notáveis, dentro da rede, como clientes, depósitos, garagens, etc., são denominados nós da rede. As ligações entre os nós, que são cobertas pelo sistema de transporte, são denominados arcos da rede. Em algumas situações de planejamento, certos detalhes da rede de transporte podem ser desconsiderados, bastando para os casos de medição de distância considerar a linha reta entre os nós, denominada Distância Linear. Em outros casos, principalmente no planejamento operacional, deve-se considerar a Distância Real, ou uma aproximação ajustada a partir da Distância Linear.

3.4.2 A Distância Linear

Este trabalho segue a mesma linha de diversos artigos anteriores que utilizaram o plano Euclideano para localizar os pontos e calcular as distâncias entre eles. Sendo assim, o cálculo das distâncias entre os pontos origem (x_o, y_o) e destino (x_d, y_d) é realizado por meio do Teorema de Pitágoras, de acordo com a fórmula:

$$dl_{od} = \sqrt{(x_d - x_o)^2 + (y_d - y_o)^2}$$

Esta distância chamada de linear apresenta, na prática, certa imprecisão, porém para efeito relativo de comparação de estratégias ou de desempenho de algorítmos, este fato não prejudica a análise. Nos itens seguintes serão apresentadas formas de obter distâncias com menor imprecisão, ou mesmo obter a distância real, o que é necessário em algumas aplicações.

3.4.3 Grandes Distâncias

Quando trabalhando em grandes distâncias, por exemplo, entre cidades distantes, há de se levar em conta o efeito da curvatura da terra. Neste caso, utiliza-se a fórmula da Distância do Grande Círculo baseada em Trigonometria Esférica. Foi retirada de Ballou (2004) a fórmula apresentada abaixo:

$$dl_{od} = 3965(\arccos(sen(LAT_o).sen(LAT_d) + \cos(LAT_o).\cos(LAT_d).\cos(LONG_d - LONG_o)))$$

Sendo LAT e LONG representados consecutivamente por Latitude e Longitude, em radianos, dos pontos de origem (o) e destino (d).

3.4.4 A Distância Real

A distância real é aquela associada ao percurso real de um ponto a outro, através da rede de artérias urbanas, ou da rede de rodovias. A distância linear, embora simples de calcular, apresenta um certo desvio em relação à distância real, devido a um conjunto de fatores, como: curvatura da terra, topografia, mão de direção, barreiras, cruzamentos etc.

Como exemplo, a Figura 3.2 apresenta uma linha reta entre um ponto de origem, situado na Av. Álvaro Ramos, e seu destino na Rua Silva Jardim, dois locais próximos. Também é apresentado um trajeto considerado de menor distância real entre estes mesmos pontos, percorrendo a Rua Prof. Rodolfo São Tiago, Rua Dr. Clementino, Rua Erval e Rua Belarmino Matos, para finalmente chegar à Rua Silva Jardim. Tudo isto, porque a Rua Júlio de Castilhos e a Av. Álvaro Ramos são de mão única, e o único fluxo possível foi o apresentado.

Observe-se que a Distância Linear foi calculada como sendo de 508 metros enquanto a Distância Real percorrida foi de 1.150 metros.

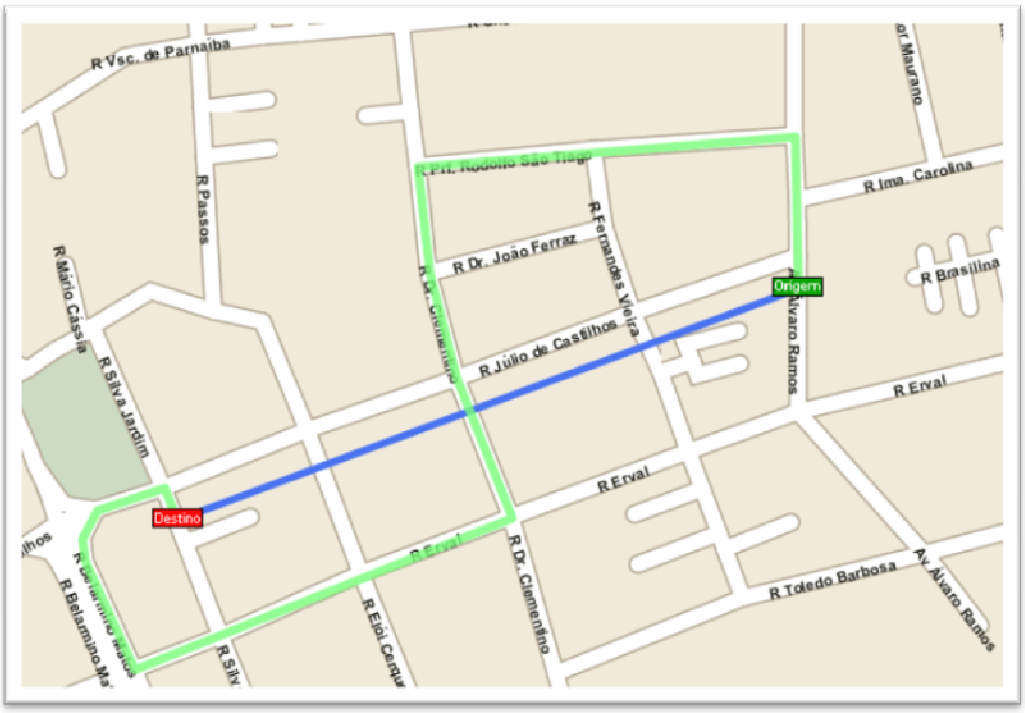


Figura 3.3 – Distância linear versus distância real.

Uma forma de se obter a distância real é por meio do uso de um software de Geoprocessamento. Este tipo de software, a partir de endereços de pontos origem-destino fornecidos, busca o menor caminho entre os pontos, fazendo uso de informações de um banco de dados. Este banco de dados, além das imagens dos mapas, também possui os vetores da malha viária, com suas distâncias reais e considera os fatores que influenciam o fluxo de passagem pela rede.

3.4.5 A Relação Linear de Ajuste da Distância Linear para a Distância Real

Quando não se dispõe de um software de Geoprocessamento ou seu uso não se justifica, em distâncias curtas é possível utilizar uma Relação de Ajuste Linear, que é obtida através da regressão linear simples entre as distâncias linear e real.

Desta forma pode-se relacionar os dois tipos de distâncias através de uma simples equação:

$$dr_{od} = a + b.dl_{od}$$

Sendo dl_{od} a distância linear da origem-destino, dr_{od} a distância real destes mesmos nós e a e b os coeficientes linear e angular da reta que correlaciona os pontos.

Desta forma, pode-se ajustar uma distância obtida em linha reta para uma distância real. Novaes (2001) comenta que b, dentro de uma faixa de 1,35 a 1,40, é aceitável em aplicações urbanas, sendo o coeficiente *a* igual a zero.

4 ESTRATÉGIA DE SOLUÇÃO

No capítulo anterior foram apresentadas várias empresas e instituições que aplicam processos de montagem de roteiros para pedidos ou ocorrências conhecidas antes da saída dos veículos e designação destes mesmos veículos para atendimento de pedidos que surgem gradativamente durante sua jornada de trabalho. Embora tais processos, em seus objetivos, possam guardar certa semelhança com a roteirização dinâmica ou parcialmente dinâmica, eles carecem de técnicas que proporcionem a otimização dos recursos envolvidos.

Este capítulo apresenta o conjunto de elementos que caracteriza a solução e o modelo computacional que implementa a roteirização parcialmente dinâmica baseada nos conceitos de otimização.

4.1 Visão Geral da Solução

Uma visão macro da solução permite identificar os três principais processos funcionais :

- Roteirização Estática – de posse dos pedidos antecipados, que são conhecidos antes da saída dos veículos, constroem-se Rotas Estáticas e designa-se para cada uma delas, um veículo. A rota estática apresenta a sequência programada dos locais onde devem ser realizados os serviços correspondentes aos pedidos antecipados. As variáveis utilizadas para a formação das rotas estáticas não variam no decorrer do processo, razão do nome estática.

- Designação Dinâmica – À medida que surgem pedidos imediatos no decorrer da jornada de trabalho dos veículos, devido à sua natureza prioritária, eles devem ser encaixados nas sequências existentes nas rotas estáticas, antes dos pedidos antecipados ainda não atendidos. A decisão decorrente deste processo envolve determinar qual servidor e correspondente rota deve

atender o pedido imediato, de forma a que este seja atendido o mais rápido possível. Havendo vários servidores e vários pedidos imediatos, a decisão deve resultar na combinação que produza o menor tempo total de atendimento dos pedidos imediatos. Como este processo caracteriza um problema de designação, acontecendo por exemplo na entrada de um novo pedido imediato, ele recebe a denominação de Designação Dinâmica.

- Roteirização Dinâmica - Uma vez determinado qual servidor irá atender qual pedido imediato, este servidor, quando disponível, vai se desviar de sua rota estática para atender o pedido imediato, podendo retornar a ela se não for designado para outro pedido imediato. Ao final deste processo de desvio pode ocorrer que o restante da rota estática já não mantenha as características de menor caminho resultante do processo de roteirização estática original. Neste caso, caberá um novo processo de roteirização estática a partir do último ponto atendido (pedido imediato), passando por todos os pedidos antecipados remanescentes na rota estática e finalizando na base. Por seu caráter dinâmico no tempo, denomina-se este processo de Roteirização Dinâmica. Também Psaraftis (1988), juntamente com Spivey e Powel (2004), mencionam, a respeito de roteirização ou designação dinâmicas, a necessidade de se refazerem as sequências em uma rota previamente estabelecida quando do surgimento de fatores que comprometam sua otimização.

A Figura 4.1 apresenta o relacionamento entre os principais processos da solução e a central de operações. Na figura, as rotas estáticas são programadas antes do despacho dos veículos e utilizadas no despacho inicial e enquanto não surgem pedidos imediatos. Após o despacho dos veículos, à medida que surgem pedidos imediatos, estes são tratados em processos dinâmicos de designação e roteirização.

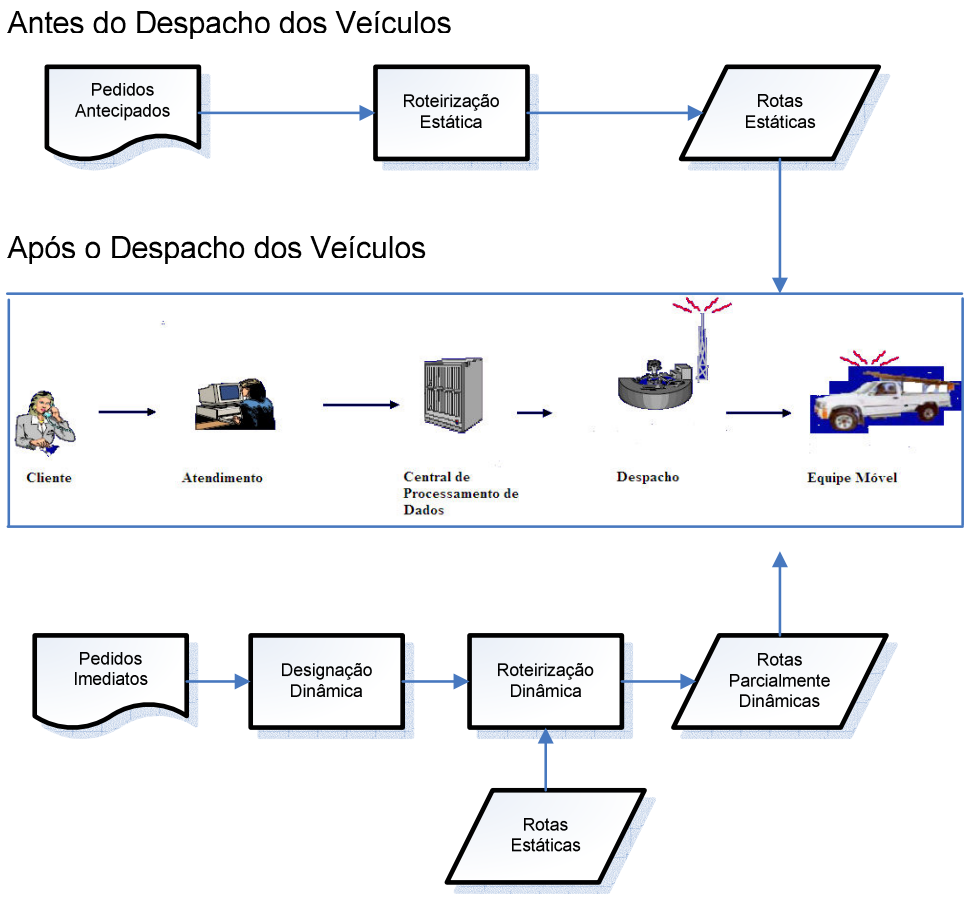


Figura 4.1 – Os principais processos funcionais envolvidos na solução

4.2 Roteirização Estática

Para aplicar a roteirização estática serão considerados os seguintes parâmetros operacionais :

- Frota homogênea - Cada veículo possui a mesma capacidade.
- Capacidade do veículo baseada em tempo - A capacidade limite do veículo (Servidor) compreende o tempo máximo de serviço permitido para atender um certo número de pedidos antecipados, adicionado ao tempo médio das viagens correspondentes.

- Distâncias calculadas em linha reta – não serão consideradas distâncias reais, mas sim distâncias em linhas retas, calculadas através da raiz quadrada das diferenças de coordenadas x e y dos pontos considerados, tendo como base o Teorema de Pitágoras no plano Euclideano.
- Velocidade média fixa em todos os arcos – a velocidade média independente das vias a serem percorridas foi considerada fixa.
- Jornada de trabalho flexível – embora o turno dos técnicos seja considerado em 8 horas díarias de trabalho, pode ocorrer uma extensão deste período implicando custo adicional para a empresa com horas extras, refeições, etc.
- Janela de tempo - igual ao horário comercial do local do serviço, com flexibilidade de antecipações ou atrasos na chegada do servidor.
- Base única - O princípio de operação do sistema estabelece que todos os servidores saiam de uma garagem e voltem para a mesma, após a jornada de trabalho.

Será adotado o processo de roteirização em duas fases :

- Construção Paralela de Rotas - baseada na Heurística clássica de Clarke e Wright (1964), utilizando os parâmetros mencionados.
- Refinamento das Rotas – utilizando o Método 2-opt de Lin e Kernighan (1973), exemplificado no Apêndice B. Considerando que uma rota é constituída de vários nós que representam os pontos a serem visitados, o Método 2-opt modifica a sequência destes nós, buscando diminuir a distância total da rota.

4.3 Designação Dinâmica

A designação dinâmica é um processo de decisão que ocorre a cada entrada de um novo pedido imediato e que consiste na escolha de qual servidor será despachado para atender cada pedido imediato aguardando (na fila de) atendimento.

O critério de escolha dos pares pedido-imediato/servidor se baseia naqueles que apresentem o menor tempo de espera resultante desta combinação. Portanto, a Estratégia de Despacho adotada é a do vizinho mais próximo, do inglês Nearest Neighbor (NN), cujo conceito será explicado juntamente com a estratégia de espera no decorrer das próximas seções. Também será abordada, na sequência, a solução do problema de designação decorrente pelo Método Húngaro (Kuhn, 1955).

4.3.1 Estratégia NN – Vizinho mais próximo

A estratégia NN busca, para cada pedido, aquele servidor que estiver mais próximo em distância ou tempo. Neste trabalho será considerada a proximidade por tempo. Portanto, além de calcular as distâncias no plano Euclideano entre cada alternativa de servidor e pedido, estas várias distâncias encontradas serão divididas pela velocidade média padrão informada , obtendo o tempo necessário para percorrer cada alternativa. Este tempo é considerado o Tempo de Trajeto.

Na Figura 4.2, que ilustra um cenário dinâmico, pode-se verificar que em um primeiro momento surgem quatro pedidos, atendidos pelos quatro servidores disponíveis. O segundo momento mostra o surgimento de outros pedidos, a finalização de alguns e o atendimento de outros. A escolha do servidor que atende os correspondentes pedidos se baseia na posição de proximidade do servidor disponível.

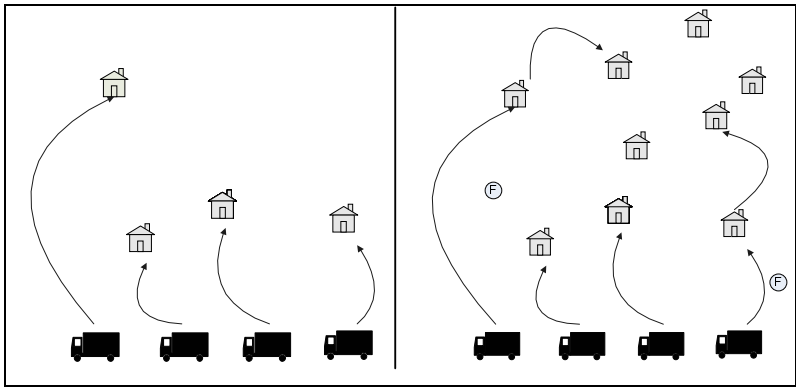


Figura 4.2 – Os veículos são designados por proximidade (NN).

No entanto, no decorrer deste trabalho observou-se que podem ocorrer casos de longos desvios quando se utiliza o critério do servidor mais próximo disponível. Na Figura 4.3, um servidor atendendo uma rota estática de 4 pontos, ao final desta rota, se desvia para atender 2 pedidos imediatos distantes, devido à sua condição de disponibilidade acontecer no mesmo instante destes pedidos.

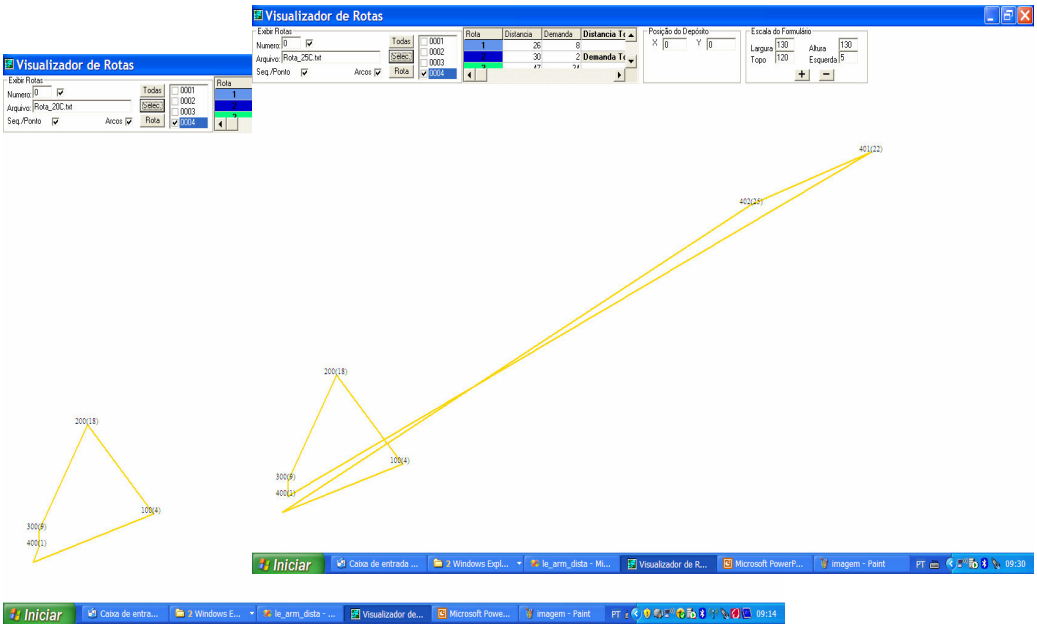


Figura 4.3 O desvio do servidor de uma rota estática para atender Pedidos Imediatos.

Na Figura 4.4 foi ilustrado um caso hipotético, onde os mesmos pedidos imediatos da Figura 4.3 poderiam ser atendidos por outro servidor (o de número 2) que apresenta maior proximidade destes e, portanto, menor tempo de espera, mesmo aguardando 4 unidades de tempo até que o mesmo se torne disponível. A partir dessa constatação decidiu-se adotar, neste trabalho, a Estratégia de Despacho NN combinada com uma Estratégia de Espera da disponibilidade do servidor.

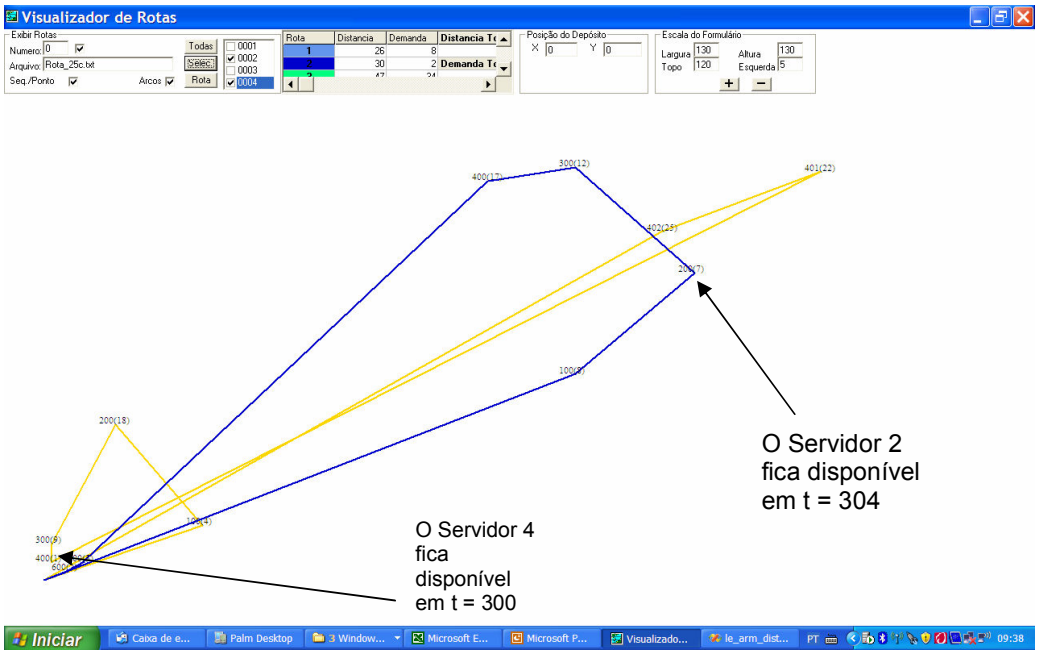


Figura 4.4 Condição mais adequada para atender os pedidos imediatos através de uma Estratégia de Espera.

4.3.2 Estratégia NN com Espera

Pela possibilidade de obtenção de resultados melhores, tanto na distância percorrida, como no tempo de espera dos pedidos imediatos, foi adotada, neste trabalho a estratégia NN com espera. Nesta estratégia, para obtenção dos servidores mais próximos dos pedidos imediatos pendentes de atendimento, consideram-se, no momento da decisão (entrada de um novo pedido imediato), todos os servidores em operação, independentemente se estes estiverem disponíveis ou não. Para cada combinação servidor-pedido calcula-se a distância euclideana entre eles e divide-se o resultado pela velocidade média esperada, como mencionado anteriormente, obtendo-se o Tempo de Trajeto. Ao Tempo de Trajeto adiciona-se o Tempo previsto de Espera para finalização do serviço quando o servidor ainda estiver ocupado, obtendo-se o Tempo de Espera total.

Portanto, $T_e = T_t + T_{es}$, sendo T_{es} o tempo de espera decorrido do momento da decisão até a finalização prevista do serviço, T_t o tempo de trajeto, e T_e o tempo total de espera. Os pares servidor-pedido com os menores tempos de espera serão considerados para despacho quando o servidor correspondente estiver disponível.

A Figura 4.5 ilustra o caso da análise de um único pedido imediato (PI no. 1) em relação a 4 Servidores em operação. Se esta situação ocorrer no instante igual a 100 da operação, conclui-se que é melhor aguardar a disponibilidade do servidor 3, que ocorrerá no instante igual a 102 (2 Unidades de Tempo depois), porque este é o que resulta em menor tempo de espera para o pedido 1 (7 UT). Os demais servidores podem ser despachados para outros pedidos, enquanto o servidor 3 ficará reservado para atender o pedido 1.

Registro dos Servidores

Identif.	Disponib.
1	N
2	S
3	N
4	S

Pedido

Servidores	1		
	Tt	Tes	Te
1	5	5	10
2	15	0	15
3	5	2	7
4	10	0	10

Tes-Tempo espera término serviço

Tt -Tempo de trajeto

Te -Tempo espera

Figura 4.5 Instante de decisão na Estratégia NN com espera.

A Figura 4.6 apresenta uma condição em que existem 4 pedidos e 4 servidores, obrigando a formação de uma Matriz de Decisão com os respectivos tempos para cada combinação.

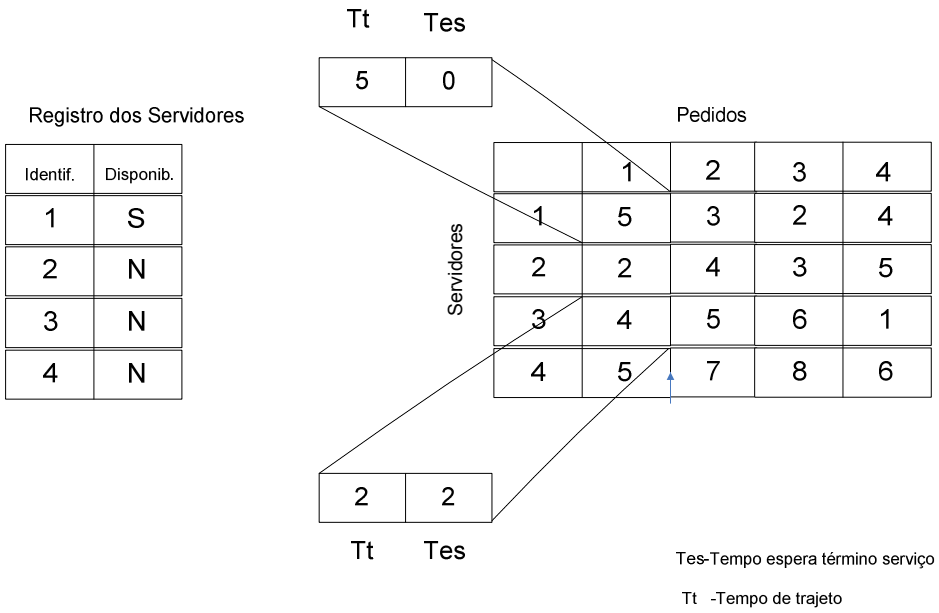


Figura 4.6 Formação da Matriz de Decisão para novos pedidos imediatos.

O primeiro caso apresentado forma um vetor de decisão que pode facilmente ser resolvido por enumeração, resultando no par servidor-pedido que apresentar menor tempo de espera para o respectivo pedido. Porém, no segundo caso configura-se um problema de designação clássico, que pode ser resolvido através da programação linear, modelo de transporte, etc. Conforme demonstrado no Apêndice A, um problema com estas características tem sua solução simplificada através do Método Húngaro (Kuhn, 1955), que possui tempo de processamento aceitável, como será visto no capítulo seguinte. O resultado final será o conjunto de pares servidor-pedido que resultarem no menor tempo de espera total para os pedidos imediatos.

4.3.3 A Solução da Matriz de Decisão pelo Método Húngaro

A montagem da Matriz de Decisão para ser resolvida pelo Método Húngaro (Kuhn, 1955) deve estar equilibrada, isto é, o número de linhas deve ser igual ao número de colunas. Desta forma, devem-se criar servidores ou pedidos fictícios, com tempos de espera Máximos (M). A Figura 4.7 apresenta o caso em que existem 4 pedidos imediatos pendentes, com 3 servidores em operação. Em função

disto, foram criados tempos de espera M para as células correspondentes a um servidor fictício 4.

Pode ocorrer, nas Estratégias NN, o caso de pedidos que, devido à distância maior que a dos demais e, em consequência, com tempo maior, entrarem no estado de prorrogação infinita, conforme Psaraftis (1995). Para casos como este, após certo número fixo de prorrogações, pode-se atribuir a estes pedidos um valor mínimo, o que faria com que estes fossem selecionados pelos servidores e fossem atendidos.

Nas instâncias analisadas, não houve nenhum caso de uma matriz que inviabilizasse seu uso por excesso de tempo de processamento do Modelo Computacional. Os problemas de atribuição são resolvidos em tempo polinomial (AHUJA; MAGNANTI, 1993), e sua complexidade computacional é $O(N^3)$, sendo N igual ao número de nós (KNUTH, 1998). Neste problema, os nós são representados pelos servidores ou pedidos, o que for em maior número, na matriz de solução.

Registro dos Servidores

Identif.	Dispon.
1	S
2	N
3	N

Pedidos

Servidores

	1	2	3	4
1	5	3	2	4
2	2	4	3	5
3	4	5	6	1
4	M	M	M	M

Figura 4.7 Matriz quadrada de Decisão para possibilitar a resolução pelo Método Húngaro.

4.4 Roteirização Dinâmica

No retorno do servidor para sua rota original pode haver necessidade de rearranjar a sequência de atendimento dos pedidos antecipados remanescentes, como ilustrado na Figura 4.8.

O processo de obtenção do menor caminho é realizado através da Heuristica de Clarke e Wright Modificada, utilizando como origem o local do último pedido imediato atendido pelo servidor e tendo como destino a base, passando pelos pontos correspondentes aos pedidos antecipados da rota correspondente. Após a aplicação desta heurística procede-se ao refinamento 2-opt. A Figura 4.9 ilustra a fórmula utilizada para a Heurística de Clarke e Wright Modificada, onde o ponto p representa o último pedido imediato, enquanto i e j representam pedidos antecipados remanescentes na rota estática e o ponto b é a base para onde o servidor se destina ao final da jornada.

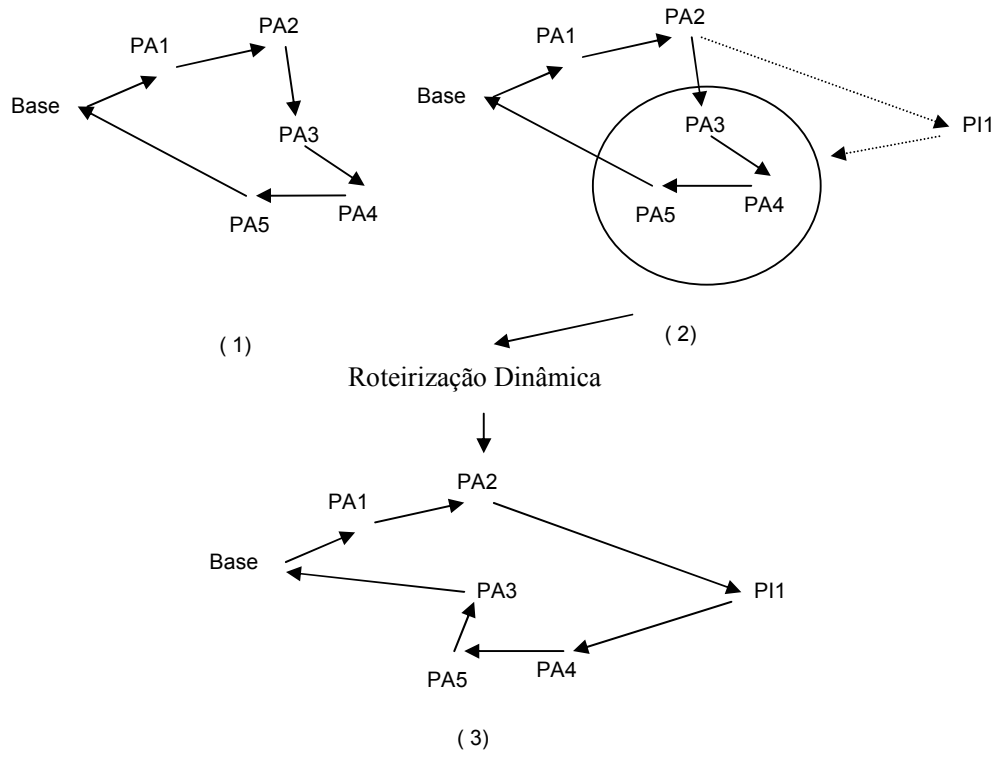
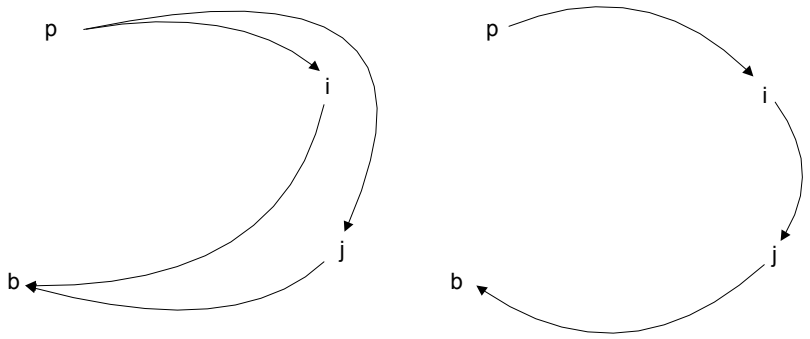


Figura 4.8 O processo de Roteirização Dinâmica



$$d_{pi} + d_{ib} + d_{pj} + d_{jb} - (d_{pi} + d_{ij} + d_{jb}) = d_{ib} + d_{pj} - d_{ij}$$

Figura 4.9 A Heurística de Clarke e Wright Modificada

4.5 O Modelo Computacional

A necessidade de representar as técnicas de solução propostas neste trabalho e, com isto, realizar testes práticos de sua aplicabilidade, justificaram o desenvolvimento de um software denominado de Modelo Computacional, que será descrito nesta seção. Este software foi desenvolvido em Visual studio 2003 na linguagem C++, utilizando basicamente recursos de processamento em memória, à exceção dos arquivos de entrada e de controle em formato txt.

4.5.1 Visão Geral e Principais Componentes

O Modelo Computacional, em sua visão geral, possui os seguintes componentes funcionais :

- Demanda - Um arquivo que possui os pedidos de serviço, tanto antecipados como imediatos, com suas coordenadas, tempos de serviço, tempo de entrada no sistema e identificação.
- Servidores - A entidade que representa os veículos e técnicos e sua capacidade de atendimento.

- Variáveis Externas - Dados que configuram o modelo para o processamento.
- Modelo Parcialmente Dinâmico de Serviços em Campo - É o componente principal, e representa o relacionamento lógico e matemático entre todas as variáveis, tanto externas como internas ou dependentes no problema.
- Indicadores - Números que representam o desempenho do cenário estudado e são fornecidos ao final do processamento do modelo computacional.

A Figura 4.10 apresenta um fluxo geral dos componentes funcionais.

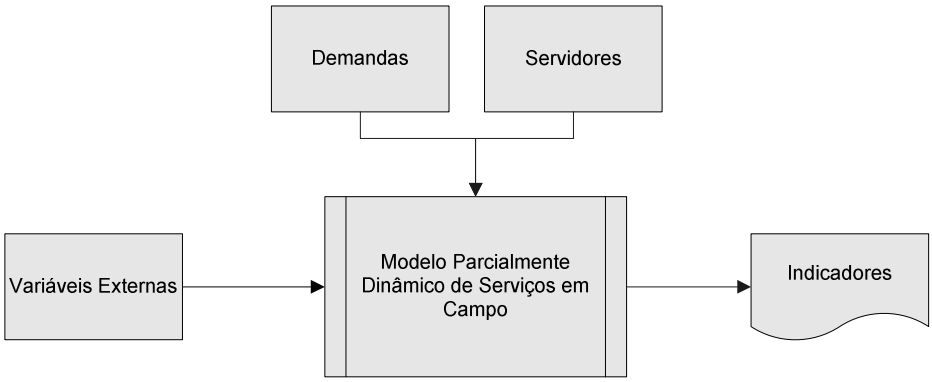


Figura 4.10 – Componentes gerais do modelo computacional.

4.5.2 Fluxograma das rotinas de processamento

O fluxograma de processamento do modelo computacional apresenta um grau maior de detalhes antes de se recorrer ao código fonte, principalmente em relação ao fluxo de decisões, conforme descrito e ilustrado na Figura 4.11.

O início do processamento trata da entrada em lote dos pedidos antecipados e seu registro após processamento da Rotina de Roteirização Estática em um arquivo em memória denominado Rota Parcialmente Dinâmica, que contém, neste estágio, todas as rotas estáticas formadas. Este arquivo é consultado e atualizado várias vezes, conforme demonstram as linhas pontilhadas do fluxograma.

A seguir são registrados os pedidos imediatos, que são armazenados em uma fila de atendimento. Havendo registros na fila dá-se o processamento da Rotina de Designação Dinâmica. A Rotina de Designação Dinâmica consulta os registros dos servidores para conhecer sua posição de disponibilidade e, no plano euclideano, fatores fundamentais para a decisão sobre o atendimento dos pedidos imediatos e o despacho dos servidores.

Na sequência do processamento seguem condições de atendimento do pedido imediato ou do pedido antecipado. Havendo pedido imediato a atender, o processo de despacho do servidor acontece se este último estiver disponível, do contrário o pedido imediato aguarda o final do serviço em andamento pelo servidor.

Se o atendimento se dá para o pedido antecipado, antes há que se verificar a necessidade de executar a rotina de Roteirização Dinâmica, se restar mais de 1 pedido antecipado remanescente na rota parcialmente dinâmica.

O processamento finaliza quando não ocorrerem mais entradas de pedidos imediatos e processamento de pedidos antecipados pendentes.

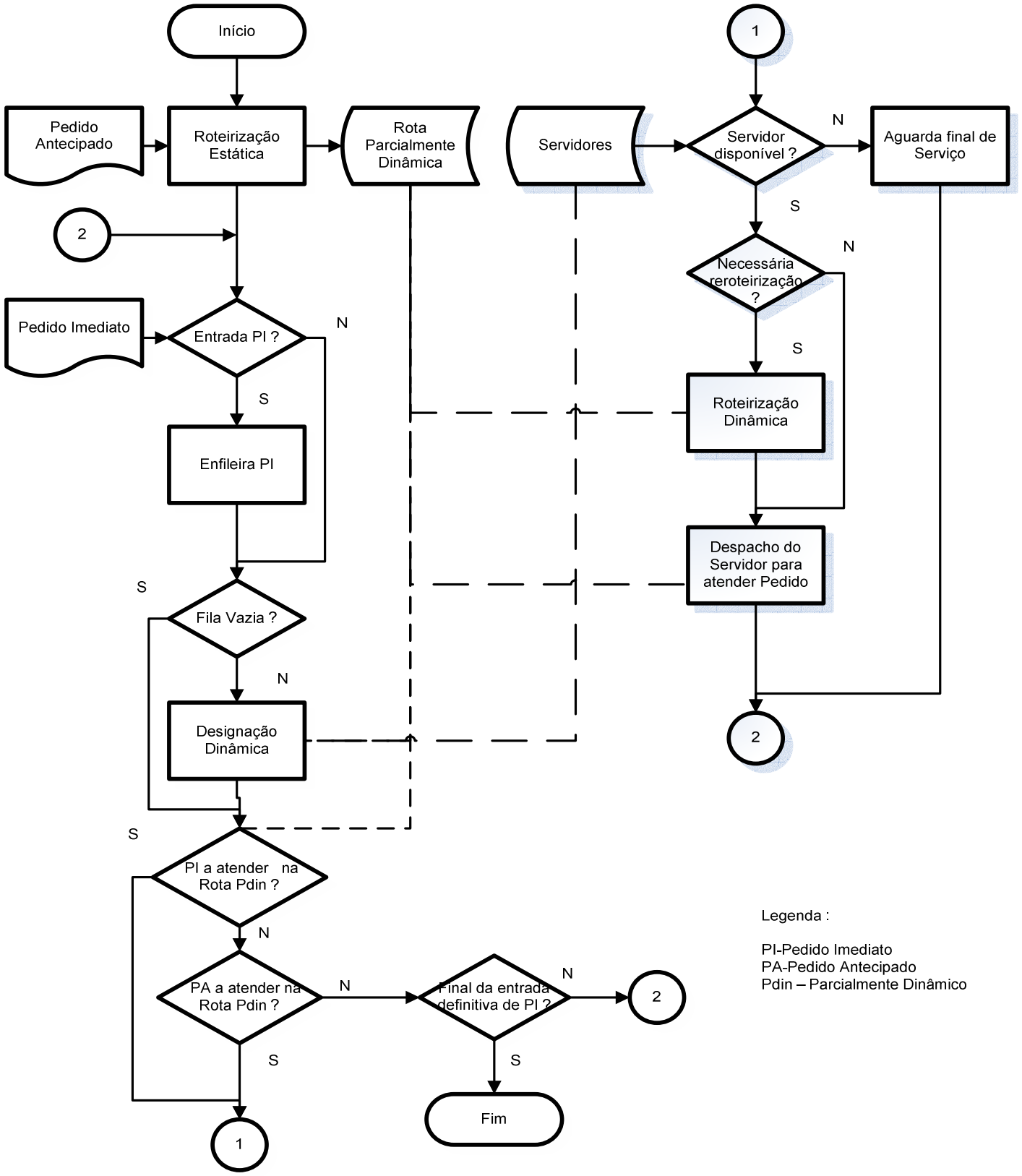

Início
Pedido Antecipado
Roteirização Estática
Rota Parcialmente Dinâmica
Servidores
1
Servidor disponível ?
N
Aguarda final de Serviço
S
2
Necessária reroteirização ?
N
S
Pedido Imediato
Entrada PI ?
N
S
Roteirização Dinâmica
Enfileira PI
Despacho do Servidor para atender Pedido
S
Fila Vazia ?
N
Designação Dinâmica
2
S
PI a atender na Rota Pdin ?
N
PA a atender na Rota Pdin ?
N
Final da entrada definitiva de PI ?
N
2
S
S
Fim
1
Legenda :
PI-Pedido Imediato
PA-Pedido Antecipado
Pdin – Parcialmente Dinâmico

Figura 4.11 Fluxograma das rotinas de processamento do modelo computacional

4.5.3 Indicadores de Desempenho

Ao final do processamento são apresentados vários indicadores, que medem o desempenho do cenário estudado. São eles :

- Tempo Total de Processamento – mede o tempo necessário para atender todos os Pedidos.
- Tempo Médio de Espera dos Pedidos – média das esperas individuais de cada pedido para ser atendido (iniciar o serviço solicitado).
- Tempo Médio de Espera dos Servidores – média das esperas individuais dos servidores aguardando pedidos a serem atendidos.
- Tempo Médio dos Pedidos no Sistema – média dos tempos individuais que cada Pedido demorou para ser atendido. Este tempo é igual à diferença entre o instante da entrada do pedido no sistema (Fila real de atendimento) e o instante de finalização do serviço correspondente.
- Distância Total Percorrida – a somatória das distâncias percorridas pelos servidores para atendimento de todos os pedidos, mais a distância de volta à garagem.

Outros Indicadores:

- Porcentagem de Pedidos Antecipados e Imediatos.
- Pedidos Atendidos por Tipo e por cada Servidor.
- Tempo de Utilização de cada Servidor e Total.
- Tempo de Viagem e Tempo de Serviço de cada Servidor e Total.
- Relação entre Tempo de Viagem e Tempo de Serviço.

4.6 Infraestrutura de Comunicações e de Informática

A aplicação da solução proposta neste trabalho na realidade das empresas exige um conjunto de adaptações no modelo computacional proposto, bem como a adoção de dispositivos de comunicação e de informática que permitam a troca de mensagens entre os veículos e a central de atendimento. Embora a solução proposta viabilize a utilização de dispositivos básicos, como rádio comunicadores ou telefones celulares e computadores tradicionais, a utilização de dispositivos mais sofisticados, como smart fones, computadores de bordo, sistemas de rastreamento (*automatic vehicle localization*), etc, fornecem um grau maior de automatização dos processos envolvidos com consequente maior rapidez e eficiência nas ações. Seguem comentários sobre as modificações exigidas no modelo computacional, bem como os processos e dispositivos necessários para sua aplicação prática.

Modelo Computacional – o modelo computacional deste trabalho foi estruturado como um modelo que representa a realidade estudada, possuindo sequenciadores de tempo, filas etc. Na prática, embora as heurísticas e métodos permaneçam como um módulo de processamento principal, suas entradas devem ser executadas por softwares especializados, como entrada de pedidos em lote, receptores de entrada de pedidos imediatos, emissores de mensagens para as equipes de campo etc. Também para permitir a disponibilidade e segurança nas informações, terá que ser adotado um sistema gerenciador de banco de dados. O processamento de informações geográficas, como a transformação de um endereço em coordenadas de posicionamento deve fazer uso de mapas ou referências obtidas a partir dos mesmos. As distâncias entre os pontos podem ser calculadas utilizando-se a distância linear com ajuste, ou através de um software que permita o cálculo e navegação através da malha urbana. Este último caso pode permitir ao técnico conhecer o percurso a ser utlizado.

Dispositivos de comunicação básico – telefones celulares ou radio comunicadores instalados na Central de Operações e de posse dos técnicos em campo que permitam o envio de dados sobre os pedidos imediatos e sua localização bem como a recepção de mensagem de finalização de serviço. Embora mais difícil,

através da comunicação por voz, faz-se necessário o envio de informações sobre o resequenciamento da rota quando da roteirização dinâmica.

Dispositivos de comunicação e de informática mais avançados – a adoção de rastreamento permite que a central de atendimento saiba em tempo real a localização dos veículos e possa alimentar automaticamente o módulo de processamento de designação e roteirização dinâmica. A adoção de computadores de bordo ou *smart fones* permite que se transmita ou envie informações de forma digital, possibilitando a ligação direta com o sistema computacional, sem interferência humana e, portanto, com menos erros. Até mesmo a utilização de navegadores permite a adoção de roteirizadores no próprio veículo, com interação constante com a central de operação.

Observa-se, no entanto, que não se esgotam as tecnologias para suportar e aprimorar o processo de roteirização dinâmica e parcialmente dinâmica, porém suas heurísticas e métodos de otimização continuarão sendo os fundamentos dos processos de decisão associados.

5. AVALIAÇÃO DA ESTRATÉGIA DE SOLUÇÃO ATRAVÉS DE EXPERIMENTOS PRÁTICOS

Neste capítulo são apresentadas as características da aplicação prática, a metodologia para preparação e utilização de dados reais no modelo computacional e os resultados obtidos da comparação do método manual de determinação das rotas e designação dos servidores com o método resultante do modelo computacional.

5.1 Aplicação a um caso prático

Como mencionado anteriormente, existe uma grande variedade de casos onde se podem utilizar técnicas de roteirização parcialmente dinâmica. Foi escolhida, para aplicação prática, uma empresa de manutenção de elevadores de pequeno porte, que realiza a manutenção preventiva e corretiva em elevadores de edifícios residenciais e comerciais localizados em diversos bairros da cidade de São Paulo.

Apesar de uma empresa de manutenção de elevadores também atuar no projeto e instalação de elevadores, a maior parte do seu serviço diário está ligado à garantia do funcionamento de equipamentos já instalados. Isto acontece através de três modalidades de manutenção :

- Manutenção preventiva, onde ocorre uma parada programada do equipamento para verificação, que pode ou não ser acompanhada de serviços adicionais e troca de peças;
- Manutenção corretiva programada, que se aplica quando ocorre uma pane no equipamento, interrompendo seu funcionamento, e não há urgência na realização do serviço, podendo o edifício ser atendido de forma programada em outro dia;
- Manutenção corretiva emergencial, semelhante ao caso anterior, porém exigindo um atendimento imediato, devido ao edifício em questão estar em situação crítica de seus elevadores, ou uma pessoa estiver presa no mesmo.

Havendo alguém preso no elevador, está previsto em lei um tempo máximo de 15 minutos para fornecimento de algum tipo de atendimento pela empresa de manutenção.

Para a realização das manutenções, a empresa possui uma frota de veículos com técnicos que visitam todos os edifícios sob contrato pelo menos uma vez por mês. Portanto, para cada dia do mês, certo número fixo de edifícios é visitado por um técnico encarregado, que executa manutenções preventivas e corretivas programadas, com tempo de serviço variando muito pouco em relação ao previsto (tempo padrão).

De acordo com o histórico de serviços obtido, ocorrem cerca de 10% de manutenções corretivas emergenciais por dia. A comunicação para a central de atendimento e operações da empresa, de uma ocorrência que seja considerada uma manutenção emergencial, desencadeia uma mensagem via rádio para os técnicos que estejam finalizando um serviço, ou já estejam disponíveis, para que se coloquem a caminho do local desta manutenção. Para evitar conflito entre os diversos técnicos, aquele que responder à chamada primeiro é designado para o serviço, fato que é comunicado a todos os demais pela central. Este técnico, após realizar a manutenção emergencial, se novamente convocado, ou ainda não tiver atingido o limite de sua jornada de trabalho, retorna para as visitas de sua rota originalmente programada.

5.2 Obtenção e Preparação dos Dados

Com o objetivo de possibilitar a análise comparativa dos dados reais de forma simples e didática, porém sem prejuízo da qualidade da solução, decidiu-se coletar os dados referentes a um grupo de 5 veículos e seus técnicos que realizaram todos os tipos de serviços de manutenção, no decorrer de uma semana de 5 dias, em um conjunto específico de edifícios.

5.2.1 O Plano Euclideano

O conjunto de edifícios foi escolhido por permitir sua representação em um plano euclideano, com escalas variando de 0 a 100 em cada um dos eixos e cujo ponto extremo inferior de coordenadas (0,0) pertence à origem e destino final das viagens (base). O plano euclideano foi escolhido por facilitar a identificação, visualização e cálculo das distâncias entre os pontos. Considerando que esta região abrange dois eixos perpendiculares de 25 km cada um, foi estabelecida a correspondência de 1 km para 4 Unidades de Distância (UD) em cada um dos eixos no plano euclideano.

Desta maneira, transforma-se a latitude e longitude da localização de cada um dos edifícios do estudo de caso em coordenadas x e y no plano euclideano. Para a montagem dos dados a serem submetidos ao modelo computacional os pontos foram divididos em planos euclideanos por dia de visita, como ilustrado na Figura 5.1, que apresenta todos os edifícios visitados no primeiro dia da faixa de dias considerados.

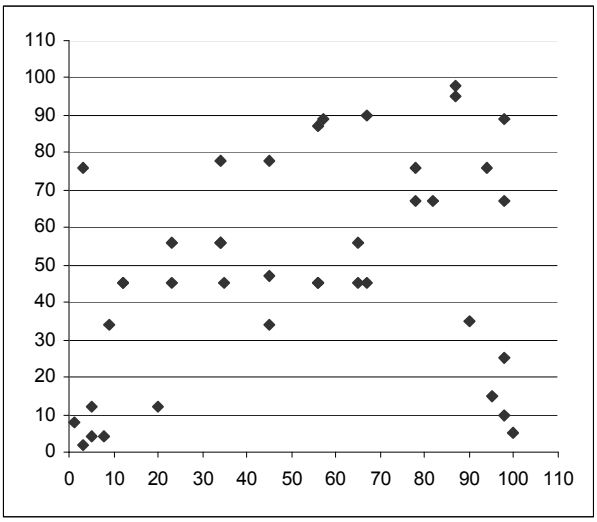


Figura 5.1 – Pontos que representam os edifícios que sofreram manutenção no dia 1 da aplicação a um caso prático.

5.2.2 A Determinação das Rotas Manuais

De acordo com os relatórios de bordo dos veículos utilizados, em cada um dos dias identificando o edifício, a manutenção realizada e o tempo gasto em cada um deles, foi possível calcular a distância prevista para as manutenções previstas e programadas, consideradas como pedidos antecipados que constituem a rota estática além de seus tempos. Com a inclusão das manutenções emergenciais, consideradas neste trabalho como pedidos imediatos, foi possível calcular a distância dos desvios, além dos tempos de espera para atendimento de cada um. Todos estes cálculos e planilhas se encontram no Apêndice C deste trabalho.

5.3 Aplicação do Modelo Computacional

O modelo computacional foi configurado para considerar os seguintes parâmetros de entrada :

- Velocidade Média – igual a de 30 km/h, que é o equivalente no plano euclideano a 2 UD/1UT, considerando que neste plano foi considerada 4 Unidades de Distância (UD) por cada km. A Unidade de Tempo (UT) equivale a 1 minuto;

- Capacidade do Servidor – Sendo o tempo médio para realização de um serviço de 35 UT e seu deslocamento igual à média de 30 UT, considera-se que cada serviço ocupe 65 UT. A partir de uma média histórica de 5 pedidos antecipados por veículo, mais o tempo de volta para a base, resulta em uma capacidade do servidor de 350 UT. Esta capacidade considera ainda uma reserva para atender um pedido imediato para cada veículo, além do tempo para refeição, uma vez que a jornada de trabalho equivale a 480 UT.

Para a comparação dos dois métodos de determinação das rotas e pedidos imediatos foram escolhidos 3 indicadores, a saber :

- Distância percorrida – a distância percorrida total realizada pelos servidores desde a saída da base, passando pelos pedidos e voltando para a base;
- Tempo para atendimento de todos os pedidos – o tempo decorrido desde a saída dos servidores até a volta do último deles para a base;
- Tempo de espera do pedido imediato – o tempo decorrido desde a entrada do pedido imediato no sistema (de atendimento) até a chegada do servidor neste local.

O indicador de distância percorrida está ligado ao custo envolvido na operação, uma vez que, além dos custos fixos, existe também o custo variável, que é função da distância percorrida. O tempo de atendimento de todos os pedidos mostra, em sua média comparada com a jornada de trabalho, se pode ocorrer custo com hora extra na operação. Quanto maior este tempo maior o custo com horas extras na operação. O tempo de espera do pedido imediato permite calcular o nível de serviço quando ocorre uma emergência. Geralmente, o indicador de tempo de espera do pedido imediato é um dos mais considerados na avaliação de uma empresa estabelecida no negócio de manutenção de equipamentos críticos, como elevadores.

5.4 Comparativos

5.4.1 Distâncias e Tempo de Atendimento dos Pedidos

O Quadro 5.1 permite comparar a distância percorrida e o tempo total utilizado para o atendimento de todos os pedidos, através dos métodos manual existente e do modelo computacional. As informações apresentadas são: o dia do teste, o número de pedidos antecipados e imediatos e o total, as distâncias percorridas em UD e o tempo de atendimento de todos os pedidos do dia em UT. A classificação "Sem desvios" significa e apresenta as distâncias e os tempos considerando apenas a rota estática, ou seja os pedidos antecipados. A classificação "Com desvios"

considera as distâncias totais, os desvios para atender os pedidos imediatos e o mesmo para os tempos.

Observa-se, através do Quadro 5.1 e da Figura 5.2, que não ocorreram grandes economias na distância percorrida com desvios entre os dois métodos (5,58%), ou seja, de 5327 UD para o modelo computacional e de 5642 UD para o método manual. Analisando o fato, concluiu-se que as rotas estáticas no método manual são quase fixas durante meses, e foram sendo aprimoradas durante este tempo em função da estabilidade dos contratos e da experiência dos técnicos em suas rotas. Este fato se comprova quando se comparam as distâncias sem desvios com as rotas obtidas pelo modelo computacional, onde estas últimas apresentam maiores distâncias.

Se fossem utilizadas as rotas fixas no modelo computacional, os ganhos na distância percorrida com os desvios seriam maiores. Porém, quanto se analisa o efeito dos desvios em cada um dos dois métodos, observa-se que o método do modelo computacional apresenta uma variação de 14,88%, ou seja, de 4.637 UD para a distância percorrida sem desvio contra 5.327 UD com desvio, enquanto no método manual chega a 24,66 %, ou seja, de 4.526 UD para a distância percorrida sem desvio contra 5.642 UD com desvio. Esta diferença entre os métodos permite concluir que o método do modelo computacional diminui o impacto dos desvios para atendimento dos pedidos imediatos. O fato revela a eficiência da estratégia NN com espera do modelo computacional na escolha do instante e do pedido imediato a atender e consequente redução da distância percorrida, pelo menos no caso analisado.

Em relação ao tempo total para atendimento de todos os pedidos observa-se no Quadro 5.1 e na Figura 5.3 poucas variações entre os métodos. Porém, na média dos tempos, observa-se que o método do modelo computacional apresenta uma economia de tempo da ordem de 9,40 %, ou seja, de 501,20 UT no modelo computacional contra 553,20 UT no método manual, em função do tempo de trajeto menor, como mencionado anteriormente.

Quadro 5.1 – Comparativo de tempo para atendimento de todos os pedidos e distâncias percorridas nos métodos manual e através do modelo computacional.

Métodos :					Manual				Modelo Computacional			
					Sem desvios		Com desvios		Sem desvios		Com desvios	
	Pedidos				Dist.	Tempo	Dist.	Tempo	Dist.	Tempo	Dist.	Tempo
Dia	Ant.	Imed.	Tot.	Rotas	Percorrida	atendim. Pedidos	Percorrida	atendim. Pedidos	Percorrida	atendim. Pedidos	Percorrida	atendim. Pedidos
1	36	4	40	5	1031	458	1218	540	1043	402	1215	476
2	32	8	40	4	922	510	1296	669	929	386	1213	584
3	27	3	30	4	693	421	927	496	752	386	841	500
4	32	3	35	4	816	525	967	525	888	376	946	509
5	36	4	40	5	1064	504	1234	536	1025	394	1112	437
			Totais		4526		5642		4637		5327	
			Médias			483,60		553,20		388,80		501,20

Tempo em UT e Distâncias em UD

Tempo atendim. Pedidos = tempo máximo decorrido entre a saída dos veículos da base e sua volta.

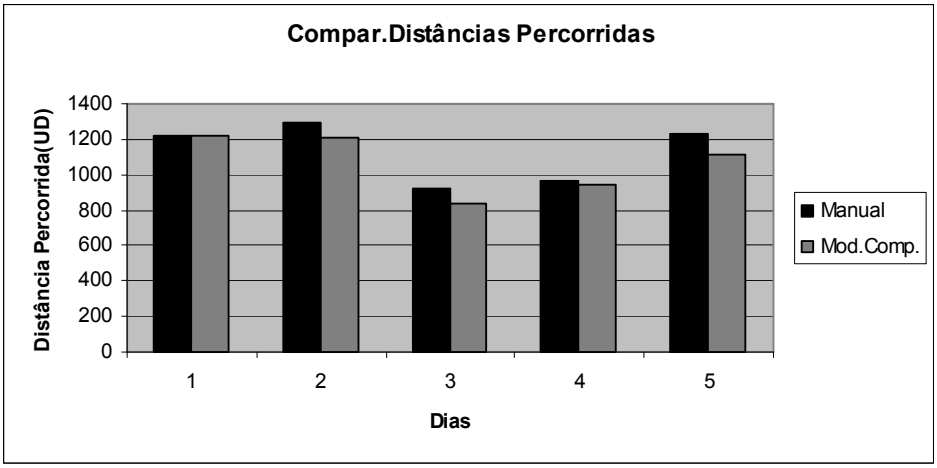


Figura 5.2 – Comparativo das Distâncias Percorridas entre os dois Métodos

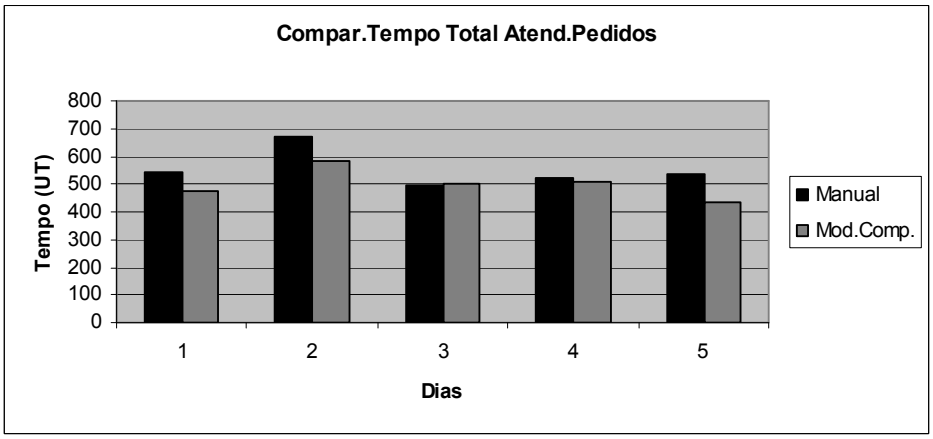


Figura 5.3 – Comparativo do Tempo Total de Atendimento dos Pedidos entre os dois Métodos.

5.4.2 Tempo de Espera

O tempo de espera ou tempo de resposta é o indicador principal quando consideram-se pedidos emergenciais. O Quadro 5.2, detalha por dia o tempo de espera, para os métodos manual (M) e modelo computacional (MC) para cada pedido imediato (PI). Apresenta também uma relação percentual entre o tempo de espera do MC em relação ao M, mostrando economias na aplicação do modelo computacional.

Quadro 5.2 – Tempos de Resposta (Espera Média) por dia.

		Tempo de Resposta(UT)		
Dia	PI	Man.(M)	Mod. Comp.(MC)	MC/M
1	1	40	29	72,50%
	2	42	38	90,48%
	3	38	18	47,37%
	4	65	10	15,38%
		46	24	
2	1	15	7	46,67%
	2	31	30	96,77%
	3	30	29	96,67%
	4	44	41	93,18%
	5	37	35	94,59%
	6	29	10	34,48%
	7	15	14	93,33%
	8	24	19	79,17%
		28	23	
3	1	51	33	64,71%
	2	29	15	51,72%
	3	48	31	64,58%
		43	26	
4	1	36	31	86,11%
	2	27	22	81,48%
	3	45	24	53,33%
		36	26	
5	1	45	41	91,11%
	2	13	11	84,62%
	3	11	7	63,64%
	4	36	14	38,89%
		26	18	

O Quadro 5.3 e a Figura 5.4 apresentam, por dia, um comparativo entre os tempos médios de espera para cada método, observando-se neles as economias obtidas através do modelo computacional. Observa-se que para todos os dias o método do modelo computacional apresenta resultados melhores. Quando se observa através das médias, nota-se uma redução de 35 % no tempo de espera (resposta) quando se aplica o modelo computacional.

Quadro 5.3 – Quadro comparativo do tempo de resposta médio entre os métodos

Dia	Tempo de Resposta Médio		
	Man.	Mod.Comp.	MC/M
1	46	24	51,35%
2	28	23	82,22%
3	43	26	61,72%
4	36	26	71,30%
5	26	18	69,52%
Médias	36	23	
Diferença		-12	
		-35%	

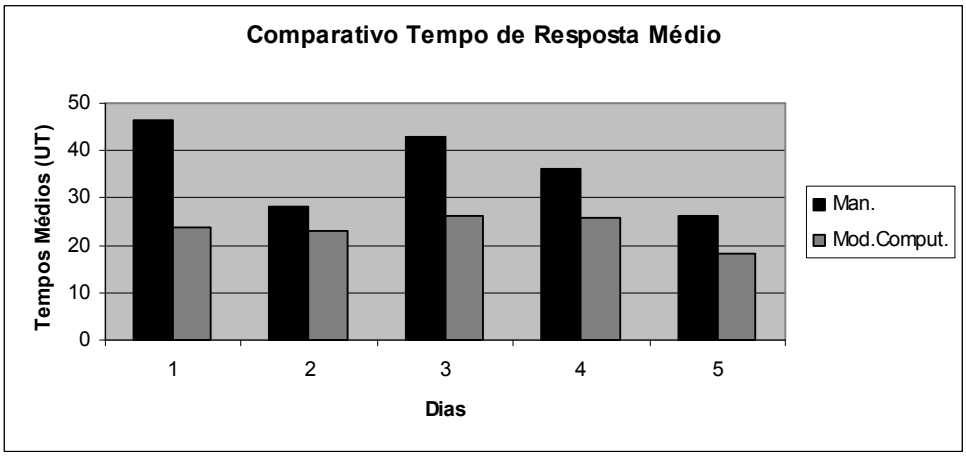


Figura 5.4 – Comparativo do tempo de resposta médio entre os métodos

5.4.3 Tempos de Processamento

O Quadro 5.4 apresenta os tempos de processamento obtidos durante o processamento do estudo de caso. Foi utilizado, para processamento, um microcomputador pc com 1,5 Megabytes de memória RAM, com processador Intel Centrino Duo de 1.6 ghz.

Quadro 5.4 – Tempo de processamento do modelo computacional

Dias	Segundos	Total Pedidos	Pedidos Antecipados	Pedidos Imediatos	Num. Rotas
1	4,5	40	36	4	5
2	5,3	40	32	8	4
3	4,5	30	27	3	4
4	2,7	35	32	3	4
5	4,0	40	36	4	5

Com o objetivo de avaliar o tempo de resposta do Modelo Computacional frente a cenários com maior número de pedidos e servidores foram processadas matrizes de decisão com diferentes ordens e cujos resultados se encontram no Quadro 5.5. Conclui-se que o Modelo Computacional possui tempo de resposta aceitável até mesmo no caso da existência de 100 pedidos imediatos em uma unidade de tempo, o que na prática não existe até mesmo nos maiores casos práticos observados.

Quadro 5.5 – Tempo de processamento do Método Húngaro para resolução de diversas ordens da matriz de decisão do modelo computacional

Ordem da Matriz	Tempo de Processamento (segundos)
10	0,10
100	12,00
1000	105,00

5.5 Conclusão do Capítulo

Neste capítulo foram comparados os resultados obtidos pelo Modelo Computacional em relação à prática vigente na empresa do estudo de caso. Constatou-se que, apesar do volume de pedidos imediatos representar uma percentagem pequena, que chega a 10 % do total de pedidos, de acordo com os dados históricos, o método proposto neste trabalho resultou em economias de distância percorrida (aprox. 6%), no tempo total de atendimento dos pedidos (aproximadamente 9%) e do tempo de espera dos pedidos emergenciais (35%).

Em outros ramos de negócio, dentro da área de manutenção em campo, existem casos onde os pedidos antecipados mudam diariamente, o que faz com que a otimização das rotas estáticas adquira uma importância maior do que no caso estudado.

Da mesma forma, existem casos em que a relação no número de pedidos imediatos é maior do que a de pedidos antecipados, podendo também revelar maior economia do que o apresentado, uma vez que torna-se difícil, manualmente, designar de forma eficiente muitos pedidos imediatos.

Em relação ao tempo de processamento, demonstrou-se que ele é aceitável, fornecendo em tempo real, ao despachante da Central de Operações, a resposta necessária no momento da designação do servidor ao pedido imediato.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Conclusões

O objetivo geral deste trabalho foi desenvolver uma estratégia de solução para o problema da roteirização parcialmente dinâmica aplicada a serviços de campo. No decorrer da pesquisa observou-se que, desde as primeiras definições de Psaraftis em 1988 e outras poucas que surgiram depois, apenas recentemente os assuntos relacionados a métodos dinâmicos nos processos de roteirização ou designação vêem sido divulgados com maior frequência. A justificativa do fato é que embora as teorias sobre o assunto estivessem disponíveis na época, outras tecnologias como geoprocessamento, localização automática de veículos, rastreamento, comunicação por voz ou digital ainda não apresentavam o nível de amadurecimento e custos acessíveis para utilização massiva. Também, o tema da roteirização em geral tem se relacionado na maioria das vezes com mercadorias, muito pouco com transporte de pessoas e raríssimas vezes nos serviços de reparação ou manutenção em campo.

Nas visitas realizadas, com o objetivo de conhecer a realidade do tema nas empresas e instituições na cidade de São Paulo, observou-se que as tecnologias ainda estavam sendo aplicadas de forma incipiente, porém o conhecimento adquirido nestas visitas foi determinante no desenvolvimento do trabalho.

A solução do problema em questão envolveu a concepção de um modelo para minimizar a distância percorrida pelos servidores no caso de pedidos antecipados e minimizar os tempos de espera para atendimento dos pedidos imediatos. Para tanto, se fez uso de heurísticas tradicionais como Clarke e Wright (1964) para a roteirização estática e a mesma heuristica modificada para roteirização dinâmica. O Método Húngaro (Kuhn, 1955) foi utilizado para solucionar o problema de Designação Dinâmica de pedidos imediatos que surgem durante a jornada de trabalho dos veículos em serviço de campo. A dificuldade de obtenção de dados para o estudo de caso, principalmente aqueles ligados ao aspecto dinâmico da operação, foi compensado pela constatação de que os resultados da solução proposta puderam ser aplicados na vida real com o atingimento dos objetivos propostos de redução da distância percorrida e do tempo de espera.

6.2 Sugestões para pesquisa futura

Seguem abaixo várias sugestões para ampliação do modelo existente ou desenvolvimento de novos modelos sobre o tema da roteirização parcialmente dinâmica:

- Ampliação deste modelo para considerar, em sua modalidade estática, restrições de janela de tempo para os locais visitados;
- No modelo proposto, no processo de roteirização dinâmica, os pedidos remanescentes de cada servidor são resequenciados, formando nova rota para este mesmo servidor. Uma evolução deste processo seria montar novas rotas a partir de todos os pontos remanescentes, redistribuindo-as de forma otimizada, para os mesmos ou para outros servidores;
- Considerar várias bases e distribuição dos servidores por área de atendimento;
- O modelo proposto é míope em relação ao seu aspecto dinâmico; a adoção de métodos estatísticos ou estocásticos poderia minimizar esta limitação;
- Desenvolvimento do modelo parcialmente dinâmico para coletas e entregas de materiais com janela de tempo e perecibilidade.

REFERÊNCIAS

AHUJA, R.K.; MAGNANTI, T.L.; ORLIN, J.B. **Network flows**: theory, algorithms and applications. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1993. 793p.

BALLOU, R. **Gerenciamento da cadeia de suprimentos/logística empresarial**. Porto Alegre: Editora Bookman, 2004. 496p.

BERTSIMAS, D.J. **Probabilistic combinatorial optimization problems**. 1988. Thesis (Ph.D.) – Massachusetts Institute of Technology, Cambridge. Massachusetts, 1988.

BERTSIMAS, D.J.; JAILLET, P.; ODONI, A.R. *A priori* optimization. **Operations Research**, v.38, n.6, p.1019-1033, 1990.

BERTSIMAS, D.J.; VAN RYZIN, G. A stochastic and dynamic vehicle routing problem in the Euclidean plane. **Operations Research**, n.39, p.601-615, 1991.

____. A stochastic and dynamic vehicle routing problem in the Euclidean plane with multiple capacitated vehicles. **Operations Research,** v. 41, n.1, p. 60-76, 1993.

BODIN, L.D. et al. Routing and scheduling of vehicles and crews: the state of the art. **Computers & Operations Research**, v.10, n.2, p.63-211, 1983.

BRANKE, J. et al. Waiting strategies for dynamic vehicle routing. **Transportation Science**, v.39, n.3, p.298-312, 2005.

CLARK, G.; WRIGHT, J.W. Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points, **Operations Research**, v. 12, p. 568-581, 1964.

CORDEAU, J.F.; LAPORTE, G.; SAVELSBERG, M.W.P. Vehicle routing. In: Canada Research Chair in Distribution Management, Montreal, 2005. **Relatório**. Montreal: HEC, 2005. p.45-52.

DIAL, R.B. Autonomous dial-a-ride transit: introductory overview. **Transportation Research Part C**: Emerging Technologies, v.3, n.5, p.261-275, 1995.

DU, T.C.; LI, Y.E; CHOU, D. Dynamic vehicle routing for online B2C delivery. **Omega – The International Journal of Management Science**, v.33, n.1, p. 33-45, 2005.

FLEISCHMANN, B.; GNUTZMANN, S; SANDVOSS, E. Dynamic vehicle routing based on online traffic information. **Transportation Science,** v.38, n.4, 2004.

FISHER, M.L.; JAIKUMAR, R. A generalized assignment heuristic for vehicle routing. **Networks**, v.11, n.2, p.109-124, 1981.

ICHOUA, S.; GENDREAU, M.; POTVIN, J.Y. Diversion issues in real time vehicle dispatching. **Transportation Science**, v.34, n.4 , p.426-438, 2000.

JAILLET, P. *A priori* solution of a traveling salesman problem in which a random subset of the customers are visited. **Operations Research**, v.36, n.6, p.929—936, 1988.

JAILLET, P.; ODONI, A.R. The probabilistic vehicle routing problem. In: GOLDEN, B.L.; ASSAD, A.A. (Ed.). **Vehicle routing**: methods and studies. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1988. p. 293-318

JAW, J. et al. A heuristic algorithm for the multivehicle advance request dial-a-ride problem with time windows. **Transportation Research B**, n.3, p.243-257, 1986.

KUHN, H.W. Variants of the Hungarian method for assignment problems. **Naval Research Logistic Quarterly**, v.2, p. 83-97, 1955.

KNUTH, D.E. **The art of computer programming**: Seminumerical Algorithms. 2.ed. Massachusetts: Addison-Wesley, 1998. v.2.

LARSEN, A. **The dynamic routing problem**. 2000. Tese (Doutorado) – Departamento de Modelagem Matemática, Universidade de Tecnologia da Dinamarca. Dinamarca, 2000.

LIN, S.; KERNIGHAN, B.W. An effective heuristic algorithm for the travelling salesman problem. **Operations Research**, v.21, n.2, p.498-516, 1973.

MITROVIC-MINIC, S.; LAPORTE, G. Waiting strategies for the dynamic pickup and delivery problem with time windows. **Transportation Research Part B: Methodological**, v.38, n.7, p.635-655, 2004.

MITROVIC-MINIC, S.; LAPORTE, G.; KRISHNAMURTI, R. Double horizon based heuristics for the dynamic pickup and delivery problem with time windows. **Transportation Research Part B: Methodological**, v.38, n.8, p.669-685, 2004.

NOVAES, A.G. **Sistemas logísticos**: transporte, armazenagem e distribuição física de produtos. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1989. p.20-54.

____. **Logística e gerenciamento da cadeia de distribuição**. Rio de Janeiro: Editora Campus, 2001. p.169-175.

OLIVEIRA, S.L. **Tratado de metodologia científica**: projetos de pesquisa, TGI, TCC, monografias, dissertações e teses. São Paulo: Editora Pioneira, 1977.

PAPASTAVROU, J.D. A stochastic and dynamic routing policy using branching processes with state dependent immigration. **European Journal of Operational Research**, v.95, n.1, p.167-177, 1996.

PSARAFTIS, H.N. Dynamic vehicle routing problems. In: GOLDEN, B.L.; ASSAD, A.A. (Ed.). **Vehicle routing**: methods and studies. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1988. p.223-248.

____. Dynamic vehicle routing: status and prospects. **Ann. of Oper. Research**, v.61, n.1, p.143-164, 1995.

REGAN, A.C; MAHMASSANI, H.S.; JAILLET, P. Improving efficiency of commercial vehicle operations using real-time information: potential uses and assignment strategies. **Transportation Research Record**, v.1493, p.188-198, 1995.

____. Dynamic decision making for commercial fleet operations using real-time information. **Transportation Research Record**, v.1537, p.91-97, 1996.

____. Evaluation of dynamic fleet management systems: simulation framework. **Transportation Research Record**, v.1645, p.176-184, 1998.

SLATER, A. Specification for a dynamic vehicle routing and scheduling system. **International Journal of Transport Management**, v.1, n.1, p.29-40, 2002.

SOLOMON, M. M. Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. **Operations Research**, v. 35, n. 2, p.254-265, 1987.

SOLOMON, M. M.; BAKER, E.K.; SCHAFFER, J.R. Vehicle routing and scheduling problems with time window constraints: efficient implementation of solution improvements procedures. In: GOLDEN, B.L.; ASSAD, A.A. (Ed.). **Vehicle routing**: methods and studies. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1988. p. 85-105.

SPIVEY, M.Z.; POWELL, W.B. The dynamic assignment problem. **Transportation Science**, v.38, n.4, p.399-419, 2004.

SWIHART, M.R.; PAPASTAVROU, J.D. A stochastic and dynamic model for the single-vehicle pick-up and delivery problem. **European Journal of Operational Research**, v.144, n.3, p.447-464, 1999.

TOTH, P.; VIGO, D. An overview of vehicle routing problems. In: TOTH, P.; VIGO, D. (Ed.). **The vehicle routing problem**. Philadelphia, Pennsylvania: Society for Industrial & Applied Mathematics (SIAM), 2001. p.02-26. (Monographs on Discrete Mathematics and Applications).

TRUJILLO, F.A. **Metodologia de pesquisa científica**. São Paulo: MacGraw Hill, 1982.

ZNAMENSKY, A. **Um modelo para a roteirização e programação do transporte de deficientes**. 2000. 144p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

APÊNDICES

A - O Método Húngaro para Designação

Neste Apêndice, o Método Húngaro (Kuhn, 1955) é apresentado como sendo uma forma de resolução de problemas de designação. Para exemplificar, são apresentadas e discutidas outras formas de resolução deste mesmo problema.

1 Problema da Designação de Recursos

Dado um conjunto de Servidores e Pedidos de Serviço, e distâncias entre cada combinação de pares destes elementos, como demonstrado no Quadro abaixo:

Quadro 1 – Distâncias de servidores até pedidos.

	Pedidos de Serviço		
Servidores	1	2	3
1	6	3	2
2	9	5	4
3	5	4	3

Deseja-se encontrar a melhor relação Servidores *versus* Pedidos de Serviço que resulte na menor distância percorrida total, ou menor tempo de chegada no local do pedido. Realizando uma enumeração completa das diversas combinações, resulta no Quadro 2.

Quadro 2 – Enumeração completa das combinações.

Combinação	Pedido 1	Pedido 2	Pedido 3	Distância Total Percorrida
1	Servidor 1	Servidor 2	Servidor 3	14
2	Servidor 1	Servidor 3	Servidor 2	14
3	Servidor 2	Servidor 1	Servidor 3	15
4	Servidor 2	Servidor 3	Servidor 1	15
5	Servidor 3	Servidor 1	Servidor 2	12
6	Servidor 3	Servidor 2	Servidor 1	12

Desta enumeração completa, concluí-se que as melhores combinações são as de números 5 e 6, pois resultam em uma distância percorrida de 12. Este problema simples resultou em um número de combinações equivalente a 3! = 6. Em casos, como, por exemplo, para uma matriz de 10 Servidores para 10 Pedidos, ter-se-ia 10! = 3.628.800, o que tornaria a enumeração completa inviável.

2 O Problema de Designação da Programação Linear

Problemas típicos do exemplo dos Servidores e Pedidos de Serviço podem ser resolvidos por meio do Problema de Designação da Programação Linear, cuja formulação é descrita abaixo:

Para A sendo o conjunto de todas as designações possíveis entre i e j e c_{ij} o custo de designação entre i e j.

<u>Minimizar</u>: $$\sum_{(i,j)\text{ em } A} c_{ij} . x_{ij}$$

<u>Sujeito a</u>:

$$\sum_{j:(i,j)\text{ em } A} x_{ij} = 1, \quad \text{para qualquer } i$$

$$\sum_{i:(i,j)\text{ em } A} x_{ij} = 1, \quad \text{para qualquer } j$$

Sendo:

$x_{ij} = 0,1$ para qualquer (i, j) em A

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se i for atribuido a j} \\ 0 & \text{não atribuido} \end{cases}$$

Desenvolvendo o problema dos Servidores e Pedidos por meio desta formulação, temos:

$$\text{Min } f(X) = 6x_{11} + 3x_{12} + 2x_{13} + 9x_{21} + 5x_{22} + 4x_{23} + 5x_{31} + 4x_{32} + 3x_{33}$$

Sujeito a:

$$\begin{aligned} x_{11} + x_{12} + x_{13} &= 1 \\ x_{21} + x_{22} + x_{23} &= 1 \\ x_{31} + x_{32} + x_{33} &= 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_{11} + x_{21} + x_{31} &= 1 \\ x_{12} + x_{22} + x_{32} &= 1 \\ x_{13} + x_{23} + x_{33} &= 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_{ij} &= \{0,1\} \\ i &= \{1,2,3\} \\ j &= \{1,2,3\} \end{aligned}$$

Trata-se de um problema de Programação Linear Inteira Binária, onde o aumento do número de variáveis se traduz em um aumento significativo do tempo de cálculo. Também, aplicando o Método Simplex, a base possui 2n variáveis básicas, n

com valor 1 e as demais n com valor zero, produzindo soluções fortemente degeneradas, reforçando que a solução Simplex não deve ser adotada.

Neste caso, onde as disponibilidades são unitárias, pode-se aplicar o Modelo de Transporte, que permite uma forma mais simples de solução.

3 O Modelo de Transporte

No Modelo de Transporte, a Matriz é representada pelo quadro que representa o produto cartesiano de Servidores e Pedidos, utilizando nosso exemplo temos:

Quadro 3 – Servidores, pedidos e disponibilidade.

	Pedidos			**Disponibilidade**
Servidores	1	2	3	
1	6	3	2	1
2	9	5	4	1
3	5	4	3	1
Necessidade	1	1	1	3 = 3

Como o modelo é equilibrado, tem-se 2n-1 = 5 variáveis básicas. As soluções pelos métodos tradicionais do Modelo de Transporte produzem soluções fortemente degeneradas, que embora possam ser contornadas, ainda resultam em um processo ineficiente de solução.

4 O Método Húngaro

O Método ou Algorítmo Húngaro (Kuhn, 1955), assim chamado devido sua formalização matemática ter sido realizada por dois matemáticos húngaros, Dénes König e Jenó Egerváry, apresenta uma forma simples e rápida de resolver o problema apresentado.

A base da formulação é o seguinte Teorema: "Se na matriz de encargos só existirem elementos não negativos e nela for possível definir uma solução viável com valor nulo, a solução é ótima". Dada a Matriz de Encargos do exemplo (Quadro 4) :

Quadro 4 – Matriz de encargos para método Húngaro.

	Pedidos de Serviço		
Servidores	1	2	3
1	6	3	2
2	9	5	4
3	5	4	3

Onde associa-se a seguinte função objetivo:

$$\text{Min } f(X) = 6x_{11} + 3x_{12} + 2x_{13} + 9x_{21} + 5x_{22} + 4x_{23} + 5x_{31} + 4x_{32} + 3x_{33}$$

Se na linha de cada um dos Servidores na Matriz de Encargos, forem subtraídas uma constante p_i e uma constante q_i, nas colunas desta mesma Matriz, sendo i =1,2,3, tem-se :

Quadro 5 – Matriz de encargos subtraindo constantes.

	Pedidos de Serviço		
Servidores	1	2	3
1	$6-p_1-q_1$	$3-p_1-q_2$	$2-p_1-q_3$
2	$9-p_2-q_1$	$5-p_2-q_2$	$4-p_2-q_3$
3	$5-p_3-q_1$	$4-p_3-q_2$	$3-p_3-q_3$

A equação de função desta Matriz fica:

$$w(X) = (6 - p_1 - q_1)x_{11} + (3 - p_1 - q_2)x_{12} + (2 - p_1 - q_3)x_{13} +$$
$$(9 - p_2 - q_1)x_{21} + (5 - p_2 - q_2)x_{22} + (4 - p_2 - q_3)x_{23} +$$
$$(5 - p_3 - q_1)x_{31} + (4 - p_3 - q_2)x_{32} + (3 - p_3 - q_3)x_{33}$$

Desenvolvendo a equação:

$$w(X) = 6x_{11} + 3x_{12} + 2x_{13} + 9x_{21} + 5x_{22} + 4x_{23} + 5x_{31} + 4x_{32} + 3x_{33}$$
$$-p1(x_{11} + x_{12} + x_{13}) - p2(x_{21} + x_{22} + x_{23}) - p3(x_{31} + x_{32} + x_{33})$$
$$-q1(x_{11} + x_{12} + x_{13}) - q2(x_{21} + x_{22} + x_{23}) - q3(x_{31} + x_{32} + x_{33})$$

Sendo:

$$x_{11} + x_{12} + x_{13} = x_{21} + x_{22} + x_{23} = x_{31} + x_{32} + x_{33} = 1$$

Chega-se a uma relação entre as funções w(X) e f(X):

$$w(X) = f(X) - (p_1 + p_2 + p_3 + q_1 + q_2 + q_3)$$

Criando um parâmetro $K = (p_1 + p_2 + p_3 + q_1 + q_2 + q_3)$ e utilizando-o na relação entre funções:

Min w(X) = Min f(X)-K ou Min f(X) = w(X)+K

Como se sabe, para efeito de solução ótima, esta constante K tem efeito somente no valor da função, e que o ponto de mínimo é o mesmo nas duas funções, chega-se ao teorema mencionado anteriormente, de autoria de König.

4.1 Aplicação

A aplicação do Método Húngaro (Kuhn, 1955) obedece a uma sequência de passos explicados a seguir por meio de diversos Quadros.

- ✓ Preparação – Dada a Matriz de Custos (a) quadrada de ordem 4 no Quadro 6 (a).

Passo 1 – Redução da Matriz: Subtrair de cada linha o menor dos encargos. Portanto, cada uma das linhas terá pelo menos um elemento nulo. Subtrair de cada coluna, o menor dos encargos, item anterior. Chega-se à Matriz reduzida, como observa-se no Quadro 6 (b).

Quadro 6 – Matrizes reduzidas.

	P1	P2	P3	P4
S1	5	6	8	7
S2	2	12	5	5
S3	7	8	3	9
S4	2	4	6	10

(a)

	P1	P2	P3	P4
S1	0	1	3	2
S2	0	10	3	3
S3	4	5	0	6
S4	0	2	4	8

(b)

Passo 2 – Traçar um número Mínimo de Retas que "cubram os zeros" da Matriz: Se o número de retas for igual à ordem da Matriz (neste caso 4) chega-se à solução. Do contrário, seguir para o Passo 3.

Quadro 5.7 – Subtração dos elementos não cobertos.

	P1	P2	P3	P4
S1	0	1	3	2
S2	0	10	3	3
S3	4	5	0	6
S4	0	2	4	8

(c)

Passo 3 – Redução da Matriz pelas Filas (Linhas ou Colunas) não cobertas: Subtrair dos elementos não cobertos por uma reta, no Quadro 7 (c) aquilo que estiver diferente de cinza, o menor elemento encontrado nesta área (neste caso o 1). O resultado é apresentado no Quadro 8 (d). Voltar ao Passo 2, que executado irá resultar no Quadro (d) abaixo, coberto por 3 linhas.

Quadro 8 – Cobertura dos elementos através de 3 retas (colunas).

	P1	P2	P3	P4
S1	0	0	2	1
S2	0	9	2	2
S3	5	5	0	6
S4	0	1	3	7

(d)

Neste exemplo, o Passo 3 e Passo 2 são repetidos mais uma vez, resultando no Quadro 9 (e), ainda coberto com 3 linhas.

Quadro 9 – Cobertura por 3 retas.

	P1	P2	P3	P4
S1	0	0	2	0
S2	0	9	3	1
S3	4	5	0	5
S4	0	1	3	6

(e)

Novamente o Passo 3, e como resultou em 4 retas no Quadro 10 (f), que é igual à ordem da Matriz, encerra-se o processo de encontrar o número de zeros necessários à solução.

Quadro 10 – Cobertura por 4 retas.

	P1	P2	P3	P4
S1	1	0	2	0
S2	0	8	2	0
S3	5	5	0	5
S4	0	0	2	5

(f)

Passo 4 – Encontrar as Atribuições: O conjunto solução será representado por cada zero que possa ser o único em sua respectiva linha e coluna, como se percebe no Quadro 11 (g).

Quadro 11 – Solução são os zeros na matriz resultante.

	P1	P2	P3	P4
S1	1	0	2	0
S2	0	8	2	1
S3	5	5	0	5
S4	0	0	2	5

(g)

Algumas considerações são necessárias para aplicação deste Método:

1. A matriz deve possuir mesmo número de linhas e colunas (Matriz Equilibrada).
2. Quando não for o caso, criar linhas ou colunas fictícias com encargo M (Máximo).
3. Quando a solução for indeterminada, deve ser escolhido apenas 1 conjunto solução.

Deve-se trabalhar com números inteiros na célula, o que exige a adoção de algum critério de arredondamento.

B - O Processo de Refinamento 2-opt de Lin e Kernighan

O processo de Refinamento de Rotas neste trabalho adota o Método 2-opt de Lin e Kernighan (1973), cuja aplicação é apresentada de forma resumida neste apêndice.

Considerando que uma Rota é constituída de vários nós que representam os pontos a serem visitados, o Método 2-opt modifica a sequência destes nós, buscando diminuir a distância total da Rota. Descreve-se abaixo os passos exigidos pelo Método 2-opt.

1. Calcular o número de Iterações:

   I = número inteiro sem arredondamento ((Número de Nós + 1) / 3).

2. Realizar os passos seguintes I vezes, iniciando com i=0:

   2.1. Liga o Nó i ao Nó i+2.

   2.2. Inverte o sentido do arco correspondente aos Nós i+1 e i+2.

   2.3. Liga o Nó i+1 ao Nó i+2.

   2.4 Avalia se o resultado desta modificação na Rota Original resulta em uma distância menor.

   2.4.1. Se afirmativo, adota-se esta modificação e volta ao passo 2.

   2.4.2. Do contrário, mantém os Nós avaliados na mesma posição original e realiza o mesmo teste a partir do próximo conjunto de 4 Nós.

   Faz i = 4 e volta ao passo 2.1.

Apresenta-se, em seguida, um exemplo de aplicação do Método 2-opt exemplificado na Figura 1, que representa vários locais de Pedidos de Serviço. O local 0 (zero), primeiro e último da sequência, representa, a garagem origem e destino dos Servidores ao final de uma jornada de trabalho. Na primeira sequência se realizam as modificações nos nós 1, 2 e 3. Supondo que esta modificação resultou em uma distância menor, adota-se para a próxima iteração a sequência (b) e assim

por diante, considerando que a distância resultante é sempre menor, obtendo-se o resultado final em f. O número de iterações I = ((8 + 1)/3) resulta em 3, que é o número total de iterações. De fato, as iterações ocorreram em (a), (c) e (e). As demais sequências apenas apresentam o resultado das modificações.

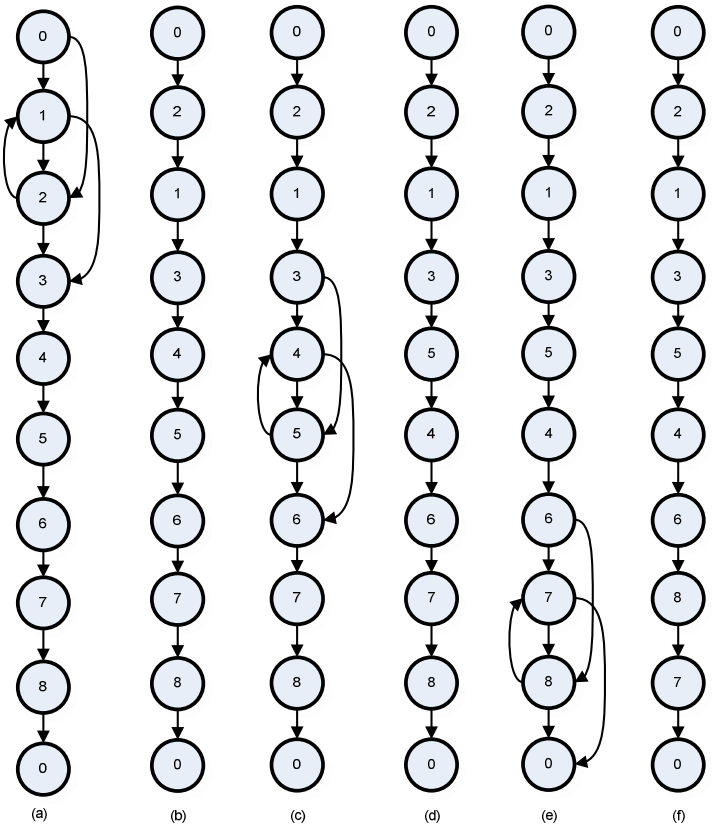


Figura 1 – Iterações do método 2-OPT.

APÊNDICE C – Rotas

Planilha D1 (Dia 1)

	Pontos		Origem		Destino							
	Orig	Dest	x	y	x	y	d	Isaída	Tdesloc	Ichegada	Tserviço	Ifinal
Rota 1	0	2	0	0	3	2	3,61	0,00	1,80	1,80	30,00	31,80
	2	3	3	2	5	4	2,83	31,80	1,41	33,22	20,00	53,22
	3	1	5	4	8	4	3,00	53,22	1,50	54,72	20,00	74,72
	1	4	8	4	20	12	14,42	74,72	7,21	81,93	40,00	121,93
	4	26	20	12	5	12	15,00	121,93	7,50	129,43	68,00	197,43
	26	9	5	12	1	8	5,66	197,43	2,83	200,26	33,00	233,26
	9	0	1	8	0	0	8,06	233,26	4,03	237,29	0,00	237,29
							52,58					

	Pontos		Origem		Destino							
	Orig	Dest	x	y	x	y	d	Isaída	Tdesloc	Ichegada	Tserviço	Ifinal
Rota 2	0	18	0	0	9	34	35,17	0,00	17,59	17,59	33,00	50,59
	18	5	9	34	12	45	11,40	50,59	5,70	56,29	30,00	86,29
	5	35	12	45	23	45	11,00	86,29	5,50	91,79	63,00	154,79
	35	36	23	45	35	45	12,00	154,79	6,00	160,79	69,00	229,79
	36	17	35	45	23	56	16,28	229,79	8,14	237,93	23,00	260,93
	17	20	23	56	3	76	28,28	260,93	14,14	275,07	58,00	333,07
	20	0	3	76	0	0	76,06	333,07	38,03	371,10	0,00	371,10
							190,20		95,10			

Planilha D1 (continuação)

	Pontos		Origem		Destino							
	Orig	Dest	x	y	x	y	d	Isaída	Tdesloc	Ichegada	Tserviço	Ifinal
Rota 3	0	14	0	0	100	5	100,12	0,00	50,06	50,06	33,00	83,06
	14	10	100	5	98	10	5,39	83,06	2,69	85,76	30,00	115,76
	10	11	98	10	95	15	5,83	115,76	2,92	118,67	63,00	181,67
	11	22	95	15	98	25	10,44	181,67	5,22	186,89	69,00	255,89
	22	15	98	25	90	35	12,81	255,89	6,40	262,29	23,00	285,29
	15	8	90	35	67	45	25,08	285,29	12,54	297,83	58,00	355,83
	8	33	67	45	65	45	2,00	355,83	1,00	356,83	0,00	356,83
	33	0	65	45	0	0	79,06	356,83	39,53	396,36	1,00	397,36
							240,72					

	Pontos		Origem		Destino							
	Orig	Dest	x	y	x	y	d	Isaída	Tdesloc	Ichegada	Tserviço	Ifinal
Rota 4	0	29	0	0	34	78	85,09	0,00	42,54	42,54	48,00	90,54
	29	19	34	78	45	78	11,00	90,54	5,50	96,04	23,00	119,04
	19	7	45	78	82	67	38,60	119,04	19,30	138,34	50,00	188,34
	7	23	82	67	78	67	4,00	188,34	2,00	190,34	57,00	247,34
	23	28	78	67	65	56	17,03	247,34	8,51	255,86	67,00	322,86
	28	6	65	56	56	45	14,21	322,86	7,11	329,97	47,00	376,97
	6	0	56	45	0	0	71,84	376,97	35,92	412,89	0,00	412,89
							241,77					

Planilha D1 (continuação)

	Pontos		Origem		Destino							
	Orig	Dest	x	y	x	y	d	Isaída	Tdesloc	Ichegada	Tserviço	Ifinal
Rota 5	0	17	0	0	56	87	103,46	0,00	51,73	51,73	23,00	74,73
	17	12	56	87	67	90	11,40	74,73	5,70	80,43	32,00	112,43
	12	16	67	90	87	98	21,54	112,43	10,77	123,20	41,00	164,20
	16	13	87	98	87	95	3,00	164,20	1,50	165,70	25,00	190,70
	13	24	87	95	98	89	12,53	190,70	6,26	196,97	52,00	248,97
	24	27	98	89	94	76	13,60	248,97	6,80	255,77	48,00	303,77
	27	32	94	76	98	67	9,85	303,77	4,92	308,69	46,00	354,69
	32	25	98	67	78	76	21,93	354,69	10,97	365,66	38,00	403,66
	25	0	78	76	0	0	108,90	403,66	54,45	458,11	0,00	458,11
							306,22					
						Distância total perc.	1031,49					

Com desvio

				Coordenadas									
		Pontos		Origem		Destino							
	Pl	Orig	Dest	x	y	x	y	d	Isaída	Tdesloc	Ichegada	Tserviço	Ifinal
Rota 1		0	2	0	0	3	2	3,61	0,00	1,80	1,80	30,00	31,80
		2	3	3	2	5	4	2,83	31,80	1,41	33,22	20,00	53,22
		3	1	5	4	8	4	3,00	53,22	1,50	54,72	20,00	74,72
	37	1	37	8	4	45	34	47,63	74,72	23,82	98,53	22,00	120,53
		37	4	45	34	20	12	33,30	120,53	16,65	137,18	40,00	177,18
		4	26	20	12	5	12	15,00	177,18	7,50	184,68	68,00	252,68
		26	9	5	12	1	8	5,66	252,68	2,83	255,51	33,00	288,51
		9	0	1	8	0	0	8,06	288,51	4,03	292,54	0,00	292,54
								119,09					

Com Desvio - Planilha D1 (continuação)

		Pontos		Origem		Destino							
		Orig	Dest	x	y	x	y	d	Isaída	Tdesloc	Ichegada	Tserviço	Ifinal
Rota 2		0	18	0	0	9	34	35,17	0,00	17,59	17,59	33,00	50,59
		18	5	9	34	12	45	11,40	50,59	5,70	56,29	30,00	86,29
		5	35	12	45	23	45	11,00	86,29	5,50	91,79	63,00	154,79
	39	35	39	23	45	57	89	55,61	154,79	27,80	182,59	25,00	207,59
	40	39	40	57	89	45	47	43,68	207,59	21,84	229,43	26,00	255,43
		40	36	45	47	35	45	10,20	207,59	5,10	212,69	69,00	281,69
		36	17	35	45	23	56	16,28	281,69	8,14	289,83	23,00	312,83
		17	20	23	56	3	76	28,28	312,83	14,14	326,97	58,00	384,97
		20	0	3	76	0	0	76,06	384,97	38,03	423,00	0,00	423,00
								287,68		143,84			

		Pontos		Origem		Destino							
		Orig	Dest	x	y	x	y	d	Isaída	Tdesloc	Ichegada	Tserviço	Ifinal
Rota 3		0	14	0	0	100	5	100,12	0,00	50,06	50,06	33,00	83,06
		14	10	100	5	98	10	5,39	83,06	2,69	85,76	30,00	115,76
		10	11	98	10	95	15	5,83	115,76	2,92	118,67	63,00	181,67
		11	22	95	15	98	25	10,44	181,67	5,22	186,89	69,00	255,89
		22	15	98	25	90	35	12,81	255,89	6,40	262,29	23,00	285,29
		15	8	90	35	67	45	25,08	285,29	12,54	297,83	58,00	355,83
		8	33	67	45	65	45	2,00	355,83	1,00	356,83	0,00	356,83
		33	0	65	45	0	0	79,06	356,83	39,53	396,36	1,00	397,36
								240,72					

Com desvio - Planilha D1 (continuação)

		Pontos		Origem		Destino							
		Orig	Dest	x	y	x	y	d	Isaída	Tdesloc	Ichegada	Tserviço	Ifinal
Rota 4		0	29	0	0	34	78	85,09	0,00	42,54	42,54	48,00	90,54
		29	19	34	78	45	78	11,00	90,54	5,50	96,04	23,00	119,04
		19	7	45	78	82	67	38,60	119,04	19,30	138,34	50,00	188,34
		7	23	82	67	78	67	4,00	188,34	2,00	190,34	57,00	247,34
		23	28	78	67	65	56	17,03	247,34	8,51	255,86	67,00	322,86
		28	6	65	56	56	45	14,21	322,86	7,11	329,97	47,00	376,97
		6	0	56	45	0	0	71,84	376,97	35,92	412,89	0,00	412,89
								241,77					

		Pontos		Origem		Destino							
		Orig	Dest	x	y	x	y	d	Isaída	Tdesloc	Ichegada	Tserviço	Ifinal
Rota 5		0	17	0	0	56	87	103,46	0,00	51,73	51,73	23,00	74,73
		17	12	56	87	67	90	11,40	74,73	5,70	80,43	32,00	112,43
	38	12	38	67	90	34	56	47,38	112,43	23,69	136,12	35,00	171,12
		38	16	34	56	87	98	67,62	171,12	33,81	204,94	41,00	245,94
		16	13	87	98	87	95	3,00	245,94	1,50	247,44	25,00	272,44
		13	24	87	95	98	89	12,53	272,44	6,26	278,70	52,00	330,70
		24	27	98	89	94	76	13,60	330,70	6,80	337,50	48,00	385,50
		27	32	94	76	98	67	9,85	385,50	4,92	390,43	46,00	436,43
		32	25	98	67	78	76	21,93	436,43	10,97	447,39	38,00	485,39
		25	0	78	76	0	0	108,90	485,39	54,45	539,84	0,00	539,84
								399,69					
							Distância total perc.	1288,95					

Planilha D2

	Pontos		Origem		Destino									
Rota 1	Orig	Dest	x	y	x	y			d	Isaída	Tdesloc	Ichegada	Tserviço	Ifinal
	0	9	0	0	2	7	4	49	7,28	0,00	3,64	3,64	33,00	36,64
	9	2	2	7	4	6	4	1	2,24	36,64	1,12	37,76	30,00	67,76
	2	3	4	6	5	5	1	1	1,41	67,76	0,71	68,47	20,00	88,47
	3	1	5	5	8	6	9	1	3,16	88,47	1,58	90,05	20,00	110,05
	1	26	8	6	16	12	64	36	10,00	110,05	5,00	115,05	68,00	183,05
	26	4	16	12	21	14	25	4	5,39	183,05	2,69	185,74	40,00	225,74
	4	5	21	14	13	40	64	676	27,20	225,74	13,60	239,34	30,00	269,34
	5	18	13	40	9	55	16	225	15,52	269,34	7,76	277,10	33,00	310,10
	18	0	9	55	0	0	81	3025	55,73	310,10	27,87	337,97	0,00	337,97
									127,94					

	Pontos		Origem		Destino									
Rota 2	Orig	Dest	x	y	x	y			d	Isaída	Tdesloc	Ichegada	Tserviço	Ifinal
	0	20	0	0	4	76	16	5776	76,11	0,00	38,05	38,05	58,00	96,05
	20	31	4	76	11	77	49	1	7,07	96,05	3,54	99,59	69,00	168,59
	31	29	11	77	33	90	484	169	25,55	168,59	12,78	181,37	70,00	251,37
	29	19	44	23	40	79	16	3136	56,14	251,37	28,07	279,44	23,00	302,44
	19	17	40	79	56	78	256	1	16,03	302,44	8,02	310,45	23,00	333,45
	17	12	56	78	66	80	100	4	10,20	333,45	5,10	338,55	32,00	370,55
	12	28	66	80	65	77	1	9	3,16	370,55	1,58	372,13	67,00	439,13
	28	0	65	77	0	0	4225	5929	100,77	439,13	50,38	489,52	0,00	489,52
									295,03					

Planilha D2 (continuação)

	Pontos		Origem		Destino									
	Orig	Dest	x	y	x	y			d	Isaída	Tdesloc	Ichegada	Tserviço	Ifinal
	0	11	0	0	68	13	4624	169	69,23	0,00	34,62	34,62	41,00	75,62
	11	14	68	13	89	15	441	4	21,10	75,62	10,55	86,16	42,00	128,16
	14	22	89	15	90	25	1	100	10,05	128,16	5,02	133,19	57,00	190,19
Rota 3	22	10	90	25	90	28	0	9	3,00	190,19	1,50	191,69	21,00	212,69
	10	7	90	28	81	37	81	81	12,73	212,69	6,36	219,05	50,00	269,05
	7	6	81	60	55	40	676	400	32,80	269,05	16,40	285,45	47,00	332,45
	6	21	55	40	50	45	25	25	7,07	332,45	3,54	335,99	42,00	377,99
	21	30	50	45	50	46	0	1	1,00	377,99	0,50	378,49	27,00	405,49
	30	0	50	46	0	0	2500	2116	67,94	405,49	33,97	439,46	0,00	439,46
									224,92					

	Pontos		Origem		Destino									
	Orig	Dest	x	y	x	y			d	Isaída	Tdesloc	Ichegada	Tserviço	Ifinal
	0	8	0	0	63	44	3969	1936	76,84	0,00	38,42	38,42	40,00	78,42
	8	15	63	44	67	53	16	81	9,85	78,42	4,92	83,35	26,00	109,35
	15	32	67	53	78	56	121	9	11,40	109,35	5,70	115,05	46,00	161,05
	32	13	78	56	78	59	0	9	3,00	161,05	1,50	162,55	25,00	187,55
Rota 4	13	25	78	59	88	76	100	289	19,72	187,55	9,86	197,41	38,00	235,41
	25	27	88	76	94	76	36	0	6,00	235,41	3,00	238,41	48,00	286,41
	27	24	94	76	90	89	16	169	13,60	286,41	6,80	293,21	52,00	345,21
	24	16	90	89	76	90	196	1	14,04	345,21	7,02	352,23	41,00	393,23
	16	23	76	90	68	67	64	529	24,35	393,23	12,18	405,40	57,00	462,40
	23	0	68	67	0	0	4624	4489	95,46	462,40	47,73	510,13	0,00	510,13
									274,27					
									922,16					

Planilha D2 - Com desvios:

		Pontos		Origem		Destino									
	Pl	Orig	Dest	x	y	x	y			d	Isaída	Tdesloc	Ichegada	Tserviço	Ifinal
		0	9	0	0	2	7	4	49	7,28	0,00	3,64	3,64	33,00	36,64
		9	2	2	7	4	6	4	1	2,24	36,64	1,12	37,76	30,00	67,76
		2	3	4	6	5	5	1	1	1,41	67,76	0,71	68,47	20,00	88,47
		3	1	5	5	8	6	9	1	3,16	88,47	1,58	90,05	20,00	110,05
Rota 1		1	26	8	6	16	12	64	36	10,00	110,05	5,00	115,05	68,00	183,05
		26	4	16	12	21	14	25	4	5,39	183,05	2,69	185,74	40,00	225,74
		4	5	21	14	13	40	64	676	27,20	225,74	13,60	239,34	30,00	269,34
		5	18	13	40	9	55	16	225	15,52	269,34	7,76	277,10	33,00	310,10
	38	18	38	9	55	23	90	196	1225	37,70	310,10	18,85	328,95	35,00	363,95
	40	38	40	23	90	34	74	121	256	19,42	363,95	9,71	373,66	26,00	399,66
		40	0	34	74	0	0	1156	5476	81,44	399,66	40,72	440,38	0,00	440,38
										210,75					

		Pontos		Origem		Destino									
		Orig	Dest	x	y	x	y			d	Isaída	Tdesloc	Ichegada	Tserviço	Ifinal
		0	20	0	0	4	76	16	5776	76,11	0,00	38,05	38,05	58,00	96,05
		20	31	4	76	11	77	49	1	7,07	96,05	3,54	99,59	69,00	168,59
	34	31	34	11	77	55	87	1936	100	45,12	168,59	22,56	191,15	33,00	224,15
		34	29	55	87	33	90	484	9	22,20	224,15	11,10	235,25	48,00	283,25
Rota 2	37	29	37	33	90	44	23	121	4489	67,90	283,25	33,95	317,20	22,00	339,20
		37	19	44	23	40	79	16	3136	56,14	339,20	28,07	367,27	23,00	390,27
		19	17	40	79	56	78	256	1	16,03	390,27	8,02	398,29	23,00	421,29
		17	12	56	78	66	80	100	4	10,20	421,29	5,10	426,39	32,00	458,39
		12	28	66	80	65	77	1	9	3,16	458,39	1,58	459,97	67,00	526,97
		28	0	65	77	0	0	4225	5929	100,77	526,97	50,38	577,35	0,00	577,35
										404,70					

Planilha D2 – com desvios (continuação)

		Pontos		Origem		Destino									
	Pl	Orig	Dest	x	y	x	y			d	Isaída	Tdesloc	Ichegada	Tserviço	Ifinal
		0	11	0	0	68	13	4624	169	69,23	0,00	34,62	34,62	41,00	75,62
		11	14	68	13	89	15	441	4	21,10	75,62	10,55	86,16	42,00	128,16
		14	22	89	15	90	25	1	100	10,05	128,16	5,02	133,19	57,00	190,19
		22	10	90	25	90	28	0	9	3,00	190,19	1,50	191,69	21,00	212,69
Rota 3		10	7	90	28	81	37	81	81	12,73	212,69	6,36	219,05	50,00	269,05
	36	7	36	81	37	34	56	2209	361	50,70	269,05	25,35	294,40	69,00	363,40
	39	36	39	34	56	34	60	0	16	4,00	363,40	2,00	365,40	25,00	390,40
		39	6	34	60	55	40	441	400	29,00	390,40	14,50	404,90	47,00	451,90
		6	21	55	40	50	45	25	25	7,07	451,90	3,54	455,44	42,00	497,44
		21	30	50	45	50	46	0	1	1,00	497,44	0,50	497,94	27,00	524,94
		30	0	50	46	0	0	2500	2116	67,94	524,94	33,97	558,91	0,00	558,91
										275,81					

Planilha D2 – com desvios (continuação)

		Pontos		Origem		Destino									
	Pl	Orig	Dest	x	y	x	y			d	Isaída	Tdesloc	Ichegada	Tserviço	Ifinal
		0	8	0	0	63	44	3969	1936	76,84	0,00	38,42	38,42	40,00	78,42
		8	15	63	44	67	53	16	81	9,85	78,42	4,92	83,35	26,00	109,35
	33	15	33	67	53	56	55	121	4	11,18	109,35	5,59	114,94	30,00	144,94
		33	32	56	55	78	56	484	1	22,02	144,94	11,01	155,95	46,00	201,95
	35	32	35	78	56	22	55	3136	1	56,01	201,95	28,00	229,95	63,00	292,95
Rota 4		35	13	22	55	78	59	3136	16	56,14	292,95	28,07	321,02	25,00	346,02
		13	25	78	59	88	76	100	289	19,72	346,02	9,86	355,89	38,00	393,89
		25	27	88	76	94	76	36	0	6,00	393,89	3,00	396,89	48,00	444,89
		27	24	94	76	90	89	16	169	13,60	444,89	6,80	451,69	52,00	503,69
		24	16	90	89	76	90	196	1	14,04	503,69	7,02	510,70	41,00	551,70
		16	23	76	90	68	67	64	529	24,35	551,70	12,18	563,88	57,00	620,88
		23	0	68	67	0	0	4624	4489	95,46	620,88	47,73	668,61	0,00	668,61
										405,22					
						Dist. total percorrida				1296,49					

Planilha D3

	Pontos		Origem		Destino									
	Orig	Dest	x	y	x	y			d	Isaída	Tdesloc	Ichegada	Tserviço	Ifinal
	0	27	0	0	49	76	2401	5776	90,43	0,00	45,21	45,21	48,00	93,21
	27	17	49	76	56	87	49	121	13,04	93,21	6,52	99,73	23,00	122,73
	17	16	56	87	69	90	169	9	13,34	122,73	6,67	129,40	41,00	170,40
Rota 1	16	24	69	90	78	89	81	1	9,06	170,40	4,53	174,93	52,00	226,93
	24	12	78	89	60	80	324	81	20,12	226,93	10,06	236,99	32,00	268,99
	12	23	60	80	63	67	9	169	13,34	268,99	6,67	275,66	57,00	332,66
	23	21	63	67	51	45	144	484	25,06	332,66	12,53	345,19	42,00	387,19
	21	0	51	45	0	0	2601	2025	68,01	387,19	34,01	421,20	0,00	421,20
									252,40					

	Pontos		Origem		Destino									
	Orig	Dest	x	y	x	y			d	Isaída	Tdesloc	Ichegada	Tserviço	Ifinal
	0	6	0	0	5	40	25	1600	40,31	0,00	20,16	20,16	47,00	67,16
	6	20	5	40	4	73	1	1089	33,02	67,16	16,51	83,66	58,00	141,66
	20	18	4	73	9	53	25	400	20,62	141,66	10,31	151,97	33,00	184,97
Rota 2	18	5	9	53	23	44	196	81	16,64	184,97	8,32	193,29	30,00	223,29
	5	3	23	44	15	25	64	361	20,62	223,29	10,31	233,60	20,00	253,60
	3	22	15	25	9	25	36	0	6,00	253,60	3,00	256,60	57,00	313,60
	22	14	9	25	9	15	0	100	10,00	313,60	5,00	318,60	42,00	360,60
	14	0	9	15	0	0	81	225	17,49	360,60	8,75	369,35	0,00	369,35
									164,69					

Planilha D3 (continuação)

	Pontos		Origem		Destino									
	Orig	Dest	x	y	x	y			d	Isaída	Tdesloc	Ichegada	Tserviço	Ifinal
Rota 3	0	8	0	0	3	4	9	16	5,00	0,00	2,50	2,50	40,00	42,50
	8	9	3	4	3	7	0	9	3,00	42,50	1,50	44,00	33,00	77,00
	9	2	3	7	6	8	9	1	3,16	77,00	1,58	78,58	30,00	108,58
	2	7	6	8	8	7	4	1	2,24	108,58	1,12	109,70	50,00	159,70
	7	1	8	7	18	16	100	81	13,45	159,70	6,73	166,43	20,00	186,43
	1	4	18	16	22	24	16	64	8,94	186,43	4,47	190,90	40,00	230,90
	4	19	22	24	40	9	324	225	23,43	230,90	11,72	242,61	23,00	265,61
	19	0	40	9	0	0	1600	81	41,00	265,61	20,50	286,11	0,00	286,11
									100,23					

	Pontos		Origem		Destino									
Rota 4	Orig	Dest	x	y	x	y			d	Isaída	Tdesloc	Ichegada	Tserviço	Ifinal
	0	26	0	0	61	12	3721	144	62,17	0,00	31,08	31,08	68,00	99,08
	26	11	61	12	65	13	16	1	4,12	99,08	2,06	101,15	41,00	142,15
	11	13	65	13	70	59	25	2116	46,27	142,15	23,14	165,28	25,00	190,28
	13	25	70	59	88	67	324	64	19,70	190,28	9,85	200,13	38,00	238,13
	25	10	88	67	91	28	9	1521	39,12	238,13	19,56	257,69	21,00	278,69
	10	0	91	28	22	24	0	16	4,00	278,69	2,00	280,69	0,00	280,69
									175,38					
						Distância total			692,70					

Planilha D3 Com desvios

		Pontos		Origem		Destino									
	Pl	Orig	Dest	x	y	x	y			d	Isaída	Tdesloc	Ichegada	Tserviço	Ifinal
Rota 1		0	27	0	0	49	76	2401	5776	90,43	0,00	45,21	45,21	48,00	93,21
		27	17	49	76	56	87	49	121	13,04	93,21	6,52	99,73	23,00	122,73
	29	17	29	56	87	3	90	2809	9	53,08	122,73	26,54	149,28	48,00	197,28
		29	16	56	87	69	90	169	9	13,34	197,28	6,67	203,95	41,00	244,95
		16	24	69	90	78	89	81	1	9,06	244,95	4,53	249,47	52,00	301,47
		24	12	78	89	60	80	324	81	20,12	301,47	10,06	311,54	32,00	343,54
		12	23	60	80	63	67	9	169	13,34	343,54	6,67	350,21	57,00	407,21
		23	21	63	67	51	45	144	484	25,06	407,21	12,53	419,74	42,00	461,74
		21	0	51	45	0	0	2601	2025	68,01	461,74	34,01	495,74	0,00	495,74
										305,49					

		Pontos		Origem		Destino									
	Pl	Orig	Dest	x	y	x	y			d	Isaída	Tdesloc	Ichegada	Tserviço	Ifinal
Rota 2		0	6	0	0	5	40	25	1600	40,31	0,00	20,16	20,16	47,00	67,16
		6	20	5	40	4	73	1	1089	33,02	67,16	16,51	83,66	58,00	141,66
		20	18	4	73	9	53	25	400	20,62	141,66	10,31	151,97	33,00	184,97
		18	5	9	53	23	44	196	81	16,64	184,97	8,32	193,29	30,00	223,29
		5	3	23	44	15	25	64	361	20,62	223,29	10,31	233,60	20,00	253,60
		3	22	15	25	9	25	36	0	6,00	253,60	3,00	256,60	57,00	313,60
		22	14	9	25	9	15	0	100	10,00	313,60	5,00	318,60	42,00	360,60
		14	0	9	15	0	0	81	225	17,49	360,60	8,75	369,35	0,00	369,35
										164,69					

Planilha D3 – Com desvios (continuação)

		Pontos		Origem		Destino									
	PI	Orig	Dest	x	y	x	y			d	Isaída	Tdesloc	Ichegada	Tserviço	Ifinal
Rota 3		0	8	0	0	3	4	9	16	5,00	0,00	2,50	2,50	40,00	42,50
		8	9	3	4	3	7	0	9	3,00	42,50	1,50	44,00	33,00	77,00
		9	2	3	7	6	8	9	1	3,16	77,00	1,58	78,58	30,00	108,58
	28	2	28	6	8	56	77	2500	4761	85,21	108,58	42,61	151,19	67,00	218,19
	30	28	30	56	77	5	45	2601	1024	60,21	218,19	30,10	248,29	27,00	275,29
		30	7	5	45	8	7	9	1444	38,12	275,29	19,06	294,35	50,00	344,35
		7	1	8	7	18	16	100	81	13,45	344,35	6,73	351,08	20,00	371,08
		1	4	18	16	22	24	16	64	8,94	371,08	4,47	375,55	40,00	415,55
		4	19	22	24	40	9	324	225	23,43	415,55	11,72	427,26	23,00	450,26
		19	0	40	9	0	0	1600	81	41,00	450,26	20,50	470,76	0,00	470,76
										281,53					

		Pontos		Origem		Destino									
	PI	Orig	Dest	x	y	x	y			d	Isaída	Tdesloc	Ichegada	Tserviço	Ifinal
Rota 4		0	26	0	0	61	12	3721	144	62,17	0,00	31,08	31,08	68,00	99,08
		26	11	61	12	65	13	16	1	4,12	99,08	2,06	101,15	41,00	142,15
		11	13	65	13	70	59	25	2116	46,27	142,15	23,14	165,28	25,00	190,28
		13	25	70	59	88	67	324	64	19,70	190,28	9,85	200,13	38,00	238,13
		25	10	88	67	91	28	9	1521	39,12	238,13	19,56	257,69	21,00	278,69
		10	0	91	28	22	24	0	16	4,00	278,69	2,00	280,69	0,00	280,69
										175,38					
							Dist. Total desvios			927,09					

Planilha D4

	Pontos		Origem		Destino									
	Orig	Dest	x	y	x	y			d	Isaída	Tdesloc	Ichegada	Tserviço	Ifinal
Rota 1	0	7	0	0	14	7	196	49	15,65	0,00	7,83	7,83	50,00	57,83
	7	2	14	7	16	8	4	1	2,24	57,83	1,12	58,94	30,00	88,94
	2	14	16	8	19	15	9	49	7,62	88,94	3,81	92,75	42,00	134,75
	14	1	19	15	14	16	25	1	5,10	134,75	2,55	137,30	20,00	157,30
	1	4	14	16	11	24	9	64	8,54	157,30	4,27	161,57	40,00	201,57
	4	10	11	24	19	28	64	16	8,94	201,57	4,47	206,05	21,00	227,05
	10	6	19	28	6	40	169	144	17,69	227,05	8,85	235,89	47,00	282,89
	6	3	6	40	6	25	0	225	15,00	282,89	7,50	290,39	20,00	310,39
	3	0	6	25	0	0	36	625	25,71	310,39	12,85	323,25	0,00	323,25
									106,49					

	Pontos		Origem		Destino									
	Orig	Dest	x	y	x	y			d	Isaída	Tdesloc	Ichegada	Tserviço	Ifinal
Rota 2	0	5	0	0	22	44	484	1936	49,19	0,00	24,60	24,60	30,00	54,60
	5	21	22	44	51	45	841	1	29,02	54,60	14,51	69,11	42,00	111,11
	21	23	51	45	46	67	25	484	22,56	111,11	11,28	122,39	57,00	179,39
	23	27	46	67	40	73	36	36	8,49	179,39	4,24	183,63	48,00	231,63
	27	24	40	73	8	89	1024	256	35,78	231,63	17,89	249,52	52,00	301,52
	24	29	8	89	5	90	9	1	3,16	301,52	1,58	303,10	48,00	351,10
	29	12	5	90	6	80	1	100	10,05	351,10	5,02	356,12	32,00	388,12
	12	31	6	80	12	70	36	100	11,66	388,12	5,83	393,95	69,00	462,95
	31	15	12	70	17	53	25	289	17,72	462,95	8,86	471,81	26,00	497,81
	15	0	17	53	0	0	289	2809	55,66	497,81	27,83	525,64	0,00	525,64
									243,29					

Planilha D4 (Continuação)

	Pontos		Origem		Destino									
	Orig	Dest	x	y	x	y			d	Isaída	Tdesloc	Ichegada	Tserviço	Ifinal
Rota 3	0	8	0	0	23	4	529	16	23,35	0,00	11,67	11,67	40,00	51,67
	8	9	23	4	33	7	100	9	10,44	51,67	5,22	56,89	33,00	89,89
	9	19	33	7	40	9	49	4	7,28	89,89	3,64	93,53	23,00	116,53
	19	11	40	9	56	13	256	16	16,49	116,53	8,25	124,78	41,00	165,78
	11	26	56	13	61	12	25	1	5,10	165,78	2,55	168,33	68,00	236,33
	26	32	61	12	78	6	289	36	18,03	236,33	9,01	245,34	46,00	291,34
	32	20	78	6	90	8	144	4	12,17	291,34	6,08	297,43	58,00	355,43
	20	17	90	8	90	10	0	4	2,00	355,43	1,00	356,43	23,00	379,43
	17	18	90	10	45	4	2025	36	45,40	379,43	22,70	402,12	33,00	435,12
	18	0	45	4	0	0	2025	16	45,18	435,12	22,59	457,71	0,00	457,71
									185,43					

	Pontos		Origem		Destino									
	Orig	Dest	x	y	x	y			d	Isaída	Tdesloc	Ichegada	Tserviço	Ifinal
Rota 4	0	22	0	0	90	25	8100	625	93,41	0,00	46,70	46,70	57,00	103,70
	22	30	90	25	90	45	0	400	20,00	103,70	10,00	113,70	27,00	140,70
	30	13	90	45	79	59	121	196	17,80	140,70	8,90	149,61	25,00	174,61
	13	25	79	59	83	66	16	49	8,06	174,61	4,03	178,64	38,00	216,64
	25	16	83	66	66	90	289	576	29,41	216,64	14,71	231,34	41,00	272,34
	16	28	66	90	56	70	100	400	22,36	272,34	11,18	283,52	67,00	350,52
	28	0	56	70	0	0	3136	4900	89,64	350,52	44,82	395,34	0,00	395,34
									280,69					
						Distancia total			815,90					

Planilha D4 Com desvios

		Pontos		Origem		Destino									
	Pl	Orig	Dest	x	y	x	y			d	Isaída	Tdesloc	Ichegada	Tserviço	Ifinal
Rota 1		0	7	0	0	14	7	196	49	15,65	0,00	7,83	7,83	50,00	57,83
		7	2	14	7	16	8	4	1	2,24	57,83	1,12	58,94	30,00	88,94
		2	14	16	8	19	15	9	49	7,62	88,94	3,81	92,75	42,00	134,75
		14	1	19	15	14	16	25	1	5,10	134,75	2,55	137,30	20,00	157,30
	33	1	33	14	16	56	55	1764	1521	57,31	157,30	28,66	185,96	30,00	215,96
	34	33	34	56	55	55	77	1	484	22,02	215,96	11,01	226,97	33,00	259,97
	35	34	35	55	77	11	55	1936	484	49,19	259,97	24,60	284,57	63,00	347,57
		35	4	11	55	11	24	0	961	31,00	347,57	15,50	363,07	40,00	403,07
		4	10	11	24	19	28	64	16	8,94	403,07	4,47	407,54	21,00	428,54
		10	6	19	28	6	40	169	144	17,69	428,54	8,85	437,39	47,00	484,39
		6	3	6	40	6	25	0	225	15,00	484,39	7,50	491,89	20,00	511,89
		3	0	6	25	0	0	36	625	25,71	511,89	12,85	524,74	0,00	524,74
										257,48					

		Pontos		Origem		Destino									
	Pl	Orig	Dest	x	y	x	y			d	Isaída	Tdesloc	Ichegada	Tserviço	Ifinal
Rota 2		0	5	0	0	22	44	484	1936	49,19	0,00	24,60	24,60	30,00	54,60
		5	21	22	44	51	45	841	1	29,02	54,60	14,51	69,11	42,00	111,11
		21	23	51	45	46	67	25	484	22,56	111,11	11,28	122,39	57,00	179,39
		23	27	46	67	40	73	36	36	8,49	179,39	4,24	183,63	48,00	231,63
		27	24	40	73	8	89	1024	256	35,78	231,63	17,89	249,52	52,00	301,52
		24	29	8	89	5	90	9	1	3,16	301,52	1,58	303,10	48,00	351,10
		29	12	5	90	6	80	1	100	10,05	351,10	5,02	356,12	32,00	388,12
		12	31	6	80	12	70	36	100	11,66	388,12	5,83	393,95	69,00	462,95
		31	15	12	70	17	53	25	289	17,72	462,95	8,86	471,81	26,00	497,81
		15	0	17	53	0	0	289	2809	55,66	497,81	27,83	525,64	0,00	525,64
										243,29					

		Pontos		Origem		Destino									
	Pl	Orig	Dest	x	y	x	y			d	Isaída	Tdesloc	Ichegada	Tserviço	Ifinal
Rota 3		0	8	0	0	23	4	529	16	23,35	0,00	11,67	11,67	40,00	51,67
		8	9	23	4	33	7	100	9	10,44	51,67	5,22	56,89	33,00	89,89
		9	19	33	7	40	9	49	4	7,28	89,89	3,64	93,53	23,00	116,53
		19	11	40	9	56	13	256	16	16,49	116,53	8,25	124,78	41,00	165,78
		11	26	56	13	61	12	25	1	5,10	165,78	2,55	168,33	68,00	236,33
		26	32	61	12	78	6	289	36	18,03	236,33	9,01	245,34	46,00	291,34
		32	20	78	6	90	8	144	4	12,17	291,34	6,08	297,43	58,00	355,43
		20	17	90	8	90	10	0	4	2,00	355,43	1,00	356,43	23,00	379,43
		17	18	90	10	45	4	2025	36	45,40	379,43	22,70	402,12	33,00	435,12
		18	0	45	4	0	0	2025	16	45,18	435,12	22,59	457,71	0,00	457,71
										185,43					

		Pontos		Origem		Destino									
	Pl	Orig	Dest	x	y	x	y			d	Isaída	Tdesloc	Ichegada	Tserviço	Ifinal
Rota 4		0	22	0	0	90	25	8100	625	93,41	0,00	46,70	46,70	57,00	103,70
		22	30	90	25	90	45	0	400	20,00	103,70	10,00	113,70	27,00	140,70
		30	13	90	45	79	59	121	196	17,80	140,70	8,90	149,61	25,00	174,61
		13	25	79	59	83	66	16	49	8,06	174,61	4,03	178,64	38,00	216,64
		25	16	83	66	66	90	289	576	29,41	216,64	14,71	231,34	41,00	272,34
		16	28	66	90	56	70	100	400	22,36	272,34	11,18	283,52	67,00	350,52
		28	0	56	70	0	0	3136	4900	89,64	350,52	44,82	395,34	0,00	395,34
										280,69					
						Distancia total com desvio					966,88				

Planilha D5

	Pontos		Origem		Destino									
	Orig	Dest	x	y	x	y			d	Isaída	Tdesloc	Ichegada	Tserviço	Ifinal
Rota 1	0	26	0	0	15	12	225	144	19,21	0,00	9,60	9,60	68,00	77,60
	26	18	15	12	9	34	36	484	22,80	77,60	11,40	89,01	33,00	122,01
	18	28	9	34	6	56	9	484	22,20	122,01	11,10	133,11	67,00	200,11
	28	32	6	56	8	67	4	121	11,18	200,11	5,59	205,70	46,00	251,70
	32	27	8	67	4	76	16	81	9,85	251,70	4,92	256,62	48,00	304,62
	27	29	4	76	31	78	729	4	27,07	304,62	13,54	318,16	48,00	366,16
	29	30	31	78	22	56	81	484	23,77	366,16	11,88	378,04	27,00	405,04
	30	31	22	56	21	45	1	121	11,05	405,04	5,52	410,57	69,00	479,57
	31	0	21	45	0	0	441	2025	49,66	479,57	24,83	504,40	0,00	504,40
									196,79					

	Pontos		Origem		Destino									
	Orig	Dest	x	y	x	y			d	Isaída	Tdesloc	Ichegada	Tserviço	Ifinal
Rota 2	0	8	0	0	45	4	2025	16	45,18	0,00	22,59	22,59	40,00	62,59
	8	9	45	4	44	8	1	16	4,12	62,59	2,06	64,65	33,00	97,65
	9	10	44	8	41	10	9	4	3,61	97,65	1,80	99,45	21,00	120,45
	10	11	41	10	46	15	25	25	7,07	120,45	3,54	123,99	41,00	164,99
	11	4	46	15	57	12	121	9	11,40	164,99	5,70	170,69	40,00	210,69
	4	3	57	12	67	13	100	1	10,05	210,69	5,02	215,71	20,00	235,71
	3	1	67	13	77	4	100	81	13,45	235,71	6,73	242,44	20,00	262,44
	1	2	77	4	75	2	4	4	2,83	262,44	1,41	263,86	30,00	293,86
	2	14	75	2	56	5	361	9	19,24	293,86	9,62	303,47	42,00	345,47
	14	0	56	5	0	0	3136	25	56,22	345,47	28,11	373,58	0,00	373,58
									173,17					

Planilha D5 (continuação)

	Pontos		Origem		Destino									
	Orig	Dest	x	y	x	y			d	Isaída	Tdesloc	Ichegada	Tserviço	Ifinal
Rota 3	0	20	0	0	25	15	625	225	29,15	0,00	14,58	14,58	58,00	72,58
	20	19	25	15	89	17	4096	4	64,03	72,58	32,02	104,59	23,00	127,59
	19	15	89	17	90	22	1	25	5,10	127,59	2,55	130,14	26,00	156,14
	15	22	90	22	87	25	9	9	4,24	156,14	2,12	158,26	57,00	215,26
	22	24	87	25	98	34	121	81	14,21	215,26	7,11	222,37	52,00	274,37
	24	17	98	34	97	15	1	361	19,03	274,37	9,51	283,88	23,00	306,88
	17	0	97	15	0	0	9409	225	98,15	306,88	49,08	355,96	0,00	355,96
									233,92					

	Pontos		Origem		Destino									
	Orig	Dest	x	y	x	y			d	Isaída	Tdesloc	Ichegada	Tserviço	Ifinal
Rota 4	0	36	0	0	35	41	1225	1681	53,91	0,00	26,95	26,95	69,00	95,95
	36	35	35	41	32	45	9	16	5,00	95,95	2,50	98,45	63,00	161,45
	35	34	32	45	43	56	121	121	15,56	161,45	7,78	169,23	33,00	202,23
	34	6	43	56	44	45	1	121	11,05	202,23	5,52	207,75	47,00	254,75
	6	21	44	45	56	45	144	0	12,00	254,75	6,00	260,75	42,00	302,75
	21	0	56	45	98	0	1764	2025	61,55	302,75	30,78	333,53	0,00	333,53
									159,06					

Planilha D5 (continuação)

		Pontos		Origem		Destino									
	PI	Orig	Dest	x	y	x	y			d	Isaída	Tdesloc	Ichegada	Tserviço	Ifinal
rota 5		0	13	0	0	45	95	2025	9025	105,12	0,00	52,56	52,56	25,00	77,56
		13	12	45	95	56	90	121	25	12,08	77,56	6,04	83,60	32,00	115,60
		12	16	56	90	87	98	961	64	32,02	115,60	16,01	131,61	41,00	172,61
		16	25	87	98	78	76	81	484	23,77	172,61	11,88	184,49	38,00	222,49
		25	23	78	76	86	67	64	81	12,04	222,49	6,02	228,51	57,00	285,51
		23	7	86	67	90	67	16	0	4,00	285,51	2,00	287,51	50,00	337,51
		7	0	90	67	0	0	8100	4489	112,20	337,51	56,10	393,61	0,00	393,61
										301,23					
							Distancia percorrida			1064,18					

Com Desvios

		Pontos		Origem		Destino									
	PI	Orig	Dest	x	y	x	y			d	Isaída	Tdesloc	Ichegada	Tserviço	Ifinal
Rota 1		0	26	0	0	15	12	225	144	19,21	0,00	9,60	9,60	68,00	77,60
		26	18	15	12	9	34	36	484	22,80	77,60	11,40	89,01	33,00	122,01
		18	28	9	34	6	56	9	484	22,20	122,01	11,10	133,11	67,00	200,11
		28	32	6	56	8	67	4	121	11,18	200,11	5,59	205,70	46,00	251,70
		32	27	8	67	4	76	16	81	9,85	251,70	4,92	256,62	48,00	304,62
	39	27	39	4	76	7	89	9	169	13,34	304,62	6,67	311,29	25,00	336,29
		39	29	7	89	31	78	576	121	26,40	336,29	13,20	349,49	48,00	397,49
		29	30	31	78	22	56	81	484	23,77	397,49	11,88	409,38	27,00	436,38
		30	31	22	56	21	45	1	121	11,05	436,38	5,52	441,90	69,00	510,90
		31	0	21	45	0	0	441	2025	49,66	510,90	24,83	535,73	0,00	535,73
										209,46					

Planilha D5 – com desvios (continuação)

		Pontos		Origem		Destino									
	Pl	Orig	Dest	x	y	x	y			d	Isaída	Tdesloc	Ichegada	Tserviço	Ifinal
Rota 2		0	8	0	0	45	4	2025	16	45,18	0,00	22,59	22,59	40,00	62,59
		8	9	45	4	44	8	1	16	4,12	62,59	2,06	64,65	33,00	97,65
		9	10	44	8	41	10	9	4	3,61	97,65	1,80	99,45	21,00	120,45
		10	11	41	10	46	15	25	25	7,07	120,45	3,54	123,99	41,00	164,99
		11	4	46	15	57	12	121	9	11,40	164,99	5,70	170,69	40,00	210,69
		4	3	57	12	67	13	100	1	10,05	210,69	5,02	215,71	20,00	235,71
		3	1	67	13	77	4	100	81	13,45	235,71	6,73	242,44	20,00	262,44
		1	2	77	4	75	2	4	4	2,83	262,44	1,41	263,86	30,00	293,86
		2	14	75	2	56	5	361	9	19,24	293,86	9,62	303,47	42,00	345,47
		14	0	56	5	0	0	3136	25	56,22	345,47	28,11	373,58	0,00	373,58
										173,17					

		Pontos		Origem		Destino									
	Pl	Orig	Dest	x	y	x	y			d	Isaída	Tdesloc	Ichegada	Tserviço	Ifinal
Rota 3		0	20	0	0	25	15	625	225	29,15	0,00	14,58	14,58	58,00	72,58
		20	19	25	15	89	17	4096	4	64,03	72,58	32,02	104,59	23,00	127,59
		19	15	89	17	90	22	1	25	5,10	127,59	2,55	130,14	26,00	156,14
		15	22	90	22	87	25	9	9	4,24	156,14	2,12	158,26	57,00	215,26
		22	24	87	25	98	34	121	81	14,21	215,26	7,11	222,37	52,00	274,37
		24	17	98	34	97	15	1	361	19,03	274,37	9,51	283,88	23,00	306,88
		17	0	97	15	0	0	9409	225	98,15	306,88	49,08	355,96	0,00	355,96
										233,92					

Planilha D5 – com desvios (continuação)

		Pontos		Origem		Destino									
	Pl	Orig	Dest	x	y	x	y			d	Isaída	Tdesloc	Ichegada	Tserviço	Ifinal
Rota 4		0	36	0	0	35	41	1225	1681	53,91	0,00	26,95	26,95	69,00	95,95
		36	35	35	41	32	45	9	16	5,00	95,95	2,50	98,45	63,00	161,45
		35	34	32	45	43	56	121	121	15,56	161,45	7,78	169,23	33,00	202,23
		34	6	43	56	44	45	1	121	11,05	202,23	5,52	207,75	47,00	254,75
	38	6	38	44	45	33	56	121	121	15,56	254,75	7,78	262,53	35,00	297,53
		38	21	33	56	56	45	529	121	25,50	297,53	12,75	310,28	42,00	352,28
		21	0	56	45	98	0	1764	2025	61,55	352,28	30,78	383,06	0,00	383,06
										188,12					

		Pontos		Origem		Destino									
	Pl	Orig	Dest	x	y	x	y			d	Isaída	Tdesloc	Ichegada	Tserviço	Ifinal
Rota 5		0	13	0	0	45	95	2025	9025	105,12	0,00	52,56	52,56	25,00	77,56
		13	12	45	95	56	90	121	25	12,08	77,56	6,04	83,60	32,00	115,60
	37	12	37	56	90	40	34	256	3136	58,24	115,60	29,12	144,72	22,00	166,72
		37	16	40	34	87	98	2209	4096	79,40	166,72	39,70	206,42	41,00	247,42
		16	25	87	98	78	76	81	484	23,77	247,42	11,88	259,31	38,00	297,31
		25	23	78	76	86	67	64	81	12,04	297,31	6,02	303,33	57,00	360,33
		23	7	86	67	90	67	16	0	4,00	360,33	2,00	362,33	50,00	412,33
	40	7	40	90	67	5	47	7225	400	87,32	412,33	43,66	455,99	26,00	481,99
		40	0	5	47	0	0	25	2209	47,27	481,99	23,63	505,62	0,00	505,62

429,24

Distância Percorrida 1233,91