

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO**

**ROTEAMENTO DINÂMICO DE VEÍCULOS: ANÁLISE DO
IMPACTO EM ATIVIDADES DE PRESTAÇÃO DE SERVIÇO**

Daniel França Lazarin

**São Carlos
2008**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO

ROTEAMENTO DINÂMICO DE VEÍCULOS: ANÁLISE DO
IMPACTO EM ATIVIDADES DE PRESTAÇÃO DE SERVIÇO

Daniel França Lazarin

Dissertação apresentada ao
Departamento de Engenharia de Produção
da Universidade Federal de São Carlos,
como parte dos requisitos para a obtenção do
título de Mestre em Engenharia de Produção

Orientador(a): Prof(a). Dr(a). Vitória Pureza

Agências Financiadoras: CAPES e FAPESP

São Carlos

2008

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

L431rd

Lazarin, Daniel França.

Roteamento dinâmico de veículos : análise do impacto em atividades de prestação de serviço / Daniel França Lazarin. - São Carlos : UFSCar, 2009.

66 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2008.

1. Problema de roteirização de veículos. 2. Otimização combinatória. 3. Heurística. 4. Logística. I. Título.

CDD: 658.5 (20^a)



FOLHA DE APROVAÇÃO

Aluno(a): Daniel França Lazarin

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DEFENDIDA E APROVADA EM 15/12/2008 PELA
COMISSÃO JULGADORA:

Profª Drª Vitória Maria Miranda Pureza
Orientador(a) PPGE/UFSCar

Profª Drª Franklina Maria Bragion de Toledo
ICMC/EESC/USP

Profª Drª Maristela Oliveira dos Santos
ICMC/USP

Prof. Dr. Mário Otávio Batalha
Coordenador do PPGE/UFSCar

DEDICATÓRIA

À Deus e à minha família: Mãe,
Pai, Tutu, Léo, vó Luzia e Suzi.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a meus pais que me deram apoio necessário para a realização deste trabalho.

À professora Vitória Pureza, pela paciente orientação deste trabalho.

Às professoras Franklina e Maristela, membros da banca examinadora.

A todos os meus amigos do laboratório de Modelagem do departamento de Engenharia de Produção da Ufscar.

Aos amigos Sven, Beto, José Eduardo e Vanessa, pela amizade e alegria proporcionados.

À Companhia de Bebidas Ipiranga que me possibilitou a elaboração desta dissertação.

Às amigas Karina e Magda, funcionárias da Companhia de Bebidas Ipiranga, pelas informações e conhecimentos transmitidos.

A todos os funcionários do Departamento de Engenharia de Produção da Ufscar, que possibilitam o desenvolvimento de nossas atividades.

À Fapesp, pelo apoio financeiro.

RESUMO

Nos últimos anos, um crescente número de estudos científicos vem revisando modelos estáticos de distribuição adotados por empresas a fim de incorporar o dinamismo intrínseco às operações envolvidas. Esta tendência se deve principalmente aos avanços tecnológicos na área de geo-referenciamento, os quais permitem que rotas elaboradas no início do horizonte de planejamento sejam alteradas em tempo real a fim de atender novas requisições de clientes, evitar congestionamentos de tráfego, ou ainda, encontrar alternativas na ocorrência de veículos atrasados ou quebrados. Desta forma, espera-se obter soluções realistas de maior qualidade tanto do ponto de vista da empresa (menores custos) como dos clientes (melhor nível de serviço).

Este trabalho tem como objetivo principal analisar o impacto decorrente da incorporação de métodos de roteamento dinâmico de veículos em ambientes de prestação de serviço onde o prazo de atendimento é o objetivo prioritário. Especificamente, é tratado o Problema de Roteamento de Veículos Dinâmico, onde planos de rotas são elaborados ao longo de um horizonte de planejamento. Inicialmente, a definição e características de problemas dinâmicos são apresentadas, juntamente com uma revisão de algumas das principais contribuições da literatura. É proposta, então, uma heurística baseada no algoritmo de Pureza e Laporte (2008) para elaboração de rotas em tempo real. O impacto da aplicação da heurística é analisado frente a outros métodos, utilizando-se um conjunto de instâncias geradas a partir de dados fornecidos por uma empresa do setor de bebidas do interior do estado de São Paulo.

Palavras Chaves: Roteamento de Veículos Dinâmico, Otimização Combinatória, Métodos heurísticos.

ABSTRACT

In recent years, several studies have been revising static distribution models used by companies in order to incorporate intrinsic dynamic features of transport operations. Thanks to new technologies such as global positioning systems and wireless communications, vehicle routes elaborated in the beginning of the planning horizon can be altered in real time in order to serve new requests, avoid traffic jams, or find alternatives when some of the fleet vehicles are late or broke. In this way, realistic solutions of better quality are expected to be obtained from the company's point of view (smaller costs) as well as from the customers' (better service level).

The main objective of this work is to analyze the impacts resulting from the incorporation of dynamic vehicle routing and scheduling in service production systems where the due dates for service is a priority issue. Specifically, we tackled the Dynamic Vehicle Routing Problem, where route plans are elaborated in a planning horizon. Initially, the definition and characteristics of dynamic problems are presented along with a review of some of the main contributions in the literature. We propose a heuristic based on Pureza and Laporte's algorithm (2008) in order to obtain routes in real time. The relative impact of the heuristic application to other methods is analyzed by means of a set of generated instances from the data supplied by a drink company in São Paulo State.

Key Words: Dynamic Vehicle Routing, Combinatorial Optimization, Heuristics.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1: Um Módulo do Despacho Dinâmico de Veículos.....	21
FIGURA 2.2: Planejamento dinâmico de rotas: (a) Rotas planejadas em T=8:00, (b) Chegada de uma nova requisição ao sistema em T=8:40, e (c) Replanejamento de rotas com inclusão da nova requisição.....	22
FIGURA 4.1: Exemplo do documento <i>E-com</i>.....	35
FIGURA 4.2: Relatório de Assistência Técnica gerado pelo SAP (dados identificadores do cliente foram omitidos).....	36
FIGURA 4.3: Divisão da região em 4 áreas de atendimento (produto geladeira).....	37
FIGURA 4.4: Ações no processo de prestação de serviços de manutenção de equipamentos.....	38
FIGURA 5.1: Exemplo de implicação de tempos de viagem aleatórios: partindo-se de i em $t=0$ chega-se a j em $t=20$ via trecho $i-j$ (viagem direta), e em $t=15$ via trecho $i-k-j$.....	41
FIGURA 5.2: Estratégia WE_FP - (a) Chegada em j via viagem direta $i-j$ em $t=e_j$ (início da janela de tempo de j), e (b) uso do tempo extra do caminho mais rápido $i-k-j$ para extensão do tempo de espera em i; (c) chegada em j via viagem direta $i-j$ depois de $t=e_j$, e (d) uso do tempo extra do caminho mais rápido $i-k-j$ para antecipação da chegada em j em $t=e_j$, e extensão do tempo de espera em i.....	42
FIGURA 5.3: Passos do algoritmo WEF - módulo de despacho.....	43
FIGURA 5.4: Passos da heurística de inserção no algoritmo WEF.....	45
FIGURA 5.5: Desempenho relativo dos algoritmos com conjunto RCD1:(a) cenário FI, (b) cenário FL.....	54
FIGURA 5.6: Desempenho relativo dos algoritmos com conjunto RCD2:(a) cenário FI, (b) cenário FL.....	55

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1: Aplicações de PGCEs dinâmicos e estáticos.....	23
TABELA 4.1: Número de técnicos por tipo de equipamento e serviço.....	34
TABELA 5.1: Distribuição de pedidos por faixa de tempo de serviço.....	50
TABELA 5.2: Matriz de velocidades de categorias de arcos.....	51
TABELA 5.3: Resultados agregados para instâncias RCD1– cenário FL.....	52
TABELA 5.4: Resultados agregados para instâncias	
RCD1– cenário FL (nº de veículos=4).....	52
TABELA 5.5: Resultados agregados para instâncias RCD2– cenário FL.....	53
TABELA 5.6: Resultados agregados para instâncias	
RCD2– cenário FL (nº de veículos=4).....	53

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Motivação.....	13
1.2 Objetivo e metodologia.....	14
CAPÍTULO 2. PROBLEMAS DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS	
DINÂMICOS.....	16
2.1 O Problema Geral de Coleta e Entrega e seus Casos Particulares.....	17
2.1.1 Modelagem matemática do PRV clássico.....	18
2.2 O Problema Geral de Coleta e Entrega Dinâmico e Estocástico.....	20
2.3. Características de Problemas de Roteamento Dinâmico.....	23
2.3.1 Estratégias de Espera de Veículos.....	25
2.4 Classificação de abordagens de resolução para problemas de roteamento estocásticos e dinâmicos.....	26
2.4 (a) <i>A priori</i>	27
2.4 (b) Otimização em tempo real.....	27
CAPÍTULO 3. ABORDAGENS DE RESOLUÇÃO PARA ROTEAMENTO	
DINÂMICO.....	29
CAPÍTULO 4. A EMPRESA ESTUDADA.....	33
4.1 O Departamento de Equipamentos de Mercado.....	33
CAPÍTULO 5. UMA ADAPTAÇÃO DO ALGORITMO WEF PARA O PRV	
DINÂMICO	40
5.1 O algoritmo WEF de Pureza e Laporte (2008).....	40
5.1.1 A heurística de inserção em WEF	44
5.2 Adequação do algoritmo WEF para resolução do problema da empresa.....	46
5.2.1 Adequação da heurística de inserção.....	46
5.3 Algoritmos estáticos.....	47
5.3 (a) ESTÁTICO_NN.....	47
5.3 (b) ESTÁTICO_SOL.....	48
5.3 (c) rESTÁTICO.....	48
5.4 Experimentos Computacionais.....	48
5.5 Resultados.....	51
CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE PESQUISA.....	57

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59
GLOSSÁRIO.....	64

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

Dentre os diversos componentes de sistemas logísticos citados pelo Conselho de Profissionais da Administração da Cadeia de Suprimentos (*CSCMP – Council of Supply Chain Management Professionals*), as atividades pertinentes ao transporte e distribuição apresentam especial relevância. Como os custos de transporte representam atualmente uma parcela significativa do preço praticado, a distribuição eficiente de bens ou serviços é um nicho a ser explorado por empresas competitivas.

A eficiência em atividades de transporte e distribuição é obtida, dentre outros fatores, por meio de um adequado dimensionamento e planejamento de rotas para frotas de veículos. Tal motivação levou ao surgimento e consolidação de uma importante classe de problemas chamada de *Problemas de Roteamento de Veículos*.

Em problemas de roteamento de veículos busca-se construir um conjunto de rotas de atendimento de pontos de demandas com vistas à otimização de um determinado objetivo. Existe uma vasta literatura sobre o assunto, endereçando situações com diferentes características operacionais. Dentre estas se destacam: número de localidades de partida e retorno dos veículos (depósitos), tipo de distribuição (coleta e/ou entrega), natureza do serviço (distribuição de produtos/pessoas ou prestação de serviços), restrições de horário para visita aos clientes, limitações de capacidade dos veículos, heterogeneidade da frota, duração máxima dos roteiros (tempo/distância), restrições de tipos de veículos que podem atender determinados clientes, entre outras. Revisões sobre problemas de roteamento de veículos podem ser encontrados em Laporte *et al.* (2000), Assad (1988), Bodin *et al.* (1983), Ronen (1988), e Hall e Partyka (1997).

Nos chamados problemas de roteamento estáticos, todos os dados relativos aos clientes, tais como sua localização, demanda e horários para visita são conhecidos antes das rotas serem construídas, de forma que a solução é elaborada no início do horizonte de planejamento, antes dos veículos partirem de seus pontos de origem (Ghiani *et al.*, 2003). Mais recentemente, o desenvolvimento de tecnologias de informação e comunicação (ICT – *Information and Communications Technologies*) vem levando as empresas a uma ampla revisão de seus modelos de distribuição, de forma a permitir seu alinhamento às novas necessidades e as mudanças globais. Avanços tecnológicos como a Troca Eletrônica de Dados (EDI – *Electronic Data Interchange*), Sistemas de Posicionamento Global (GPS – *Global Positioning Systems*), Sistemas de Informação Geográfica (GIS – *Geographic Information*

Systems) e Sistemas de Transporte Inteligente (IVHS – *Intelligent Vehicle – Highway Systems*) (Psaraftis, 1995) permitem explorar informações obtidas ao longo da operação dos veículos.

Esta nova realidade levou ao estudo de uma classe de problemas conhecida como Problemas de Roteamento de Veículos Dinâmicos, que comparada aos problemas estáticos, é muito pouco explorada (Dror e Powell, 1993; Psaraftis, 1995). Em problemas dinâmicos, as rotas podem ser alteradas durante a operação dos veículos mediante surgimento de novas informações. Uma frota de veículos com capacidade limitada pode sofrer uma reprogramação em tempo real para atender um novo conjunto de clientes de tal modo que o custo seja o menor possível. Deve-se ressaltar que parte das requisições dos clientes pode ser conhecida previamente (pedidos estáticos), ou seja, antes da saída dos veículos de seus pontos de partida (Psaraftis, 1988).

Problemas de roteamento dinâmicos encontram aplicações em diferentes campos, tais como, na entrega de produtos de petróleo (Bell *et al.*, 1983), serviços de emergência (Gendreau *et al.*, 1997), serviços intermodais (Crainic *et al.*, 1991), serviços do tipo coleta e entrega combinados (Min, 1989) e serviços de transporte de passageiros sob demanda (*dial-a-ride*) (Psaraftis, 1980).

1.1 Motivação

Conforme mencionado anteriormente, a principal motivação prática para o estudo de problemas de roteamento são os custos elevados envolvidos, os quais têm tendência a crescimento. Pesquisas sugerem que de 10% a 15% do valor final das mercadorias comercializadas no mundo correspondem ao custo de seu transporte (Fisher *et al.*, 1997). O custo de distribuição nos Estados Unidos em 1980 foi estimado em 400 bilhões de dólares (Bodin *et al.*, 1983). Segundo Castro (1993), no Brasil o valor dispendido no transporte de cargas é de 10,8% do Produto Interno Bruto (PIB). Adicionalmente, existem os fatores de poluição e ruído que ultimamente têm se tornado críticos, principalmente nas grandes cidades. Uma parcela destes custos e inconvenientes poderia ser reduzida com um tratamento mais eficiente dos problemas de roteamento.

Enquanto o custo real incorrido para atingir objetivos operacionais é o reflexo mais direto do desempenho logístico, o serviço ao cliente é a maneira mais eficaz para manutenção

de um diferencial competitivo duradouro. O serviço ao cliente agrega valor ao produto, assumindo, portanto, um papel relevante na definição da estratégia competitiva de empresas (Bowersox e Closs, 1996). Esta medida de desempenho logístico é particularmente crucial quando o serviço é o próprio produto. Atendimentos mais frequentes e com horários ampliados, menores tempos de espera, e cumprimento de prazos são alguns dos atributos mais valorizados pelos clientes (Bowersox e Cooper, 1992; Christopher, 1992). Sob esta perspectiva, a busca por rotas eficientes de atendimento é justificada.

Adicionalmente, a grande maioria dos problemas de roteamento tem natureza combinatória, e é considerada de difícil resolução, o que explica os contínuos esforços de pesquisa e de desenvolvimento de métodos para o seu tratamento. Ainda assim, problemas de roteamento tratados na literatura têm muitas vezes se limitado a modelos menos complexos do que aqueles encontrados no mundo real. A principal simplificação recai sobre o fator tempo. Problemas do mundo real apresentam aspectos sujeitos a alterações ao longo do tempo, tais como: um veículo que quebra ou está muito atrasado, uma nova requisição de um cliente que chegou e deve ser atendida, o cancelamento de pedidos colocados, a alteração nos tempos e custos de trajetos, entre outros. Torna-se importante, portanto, considerar o dinamismo destes sistemas no processo de resolução.

Por meio da utilização de técnicas da Pesquisa Operacional é possível a elaboração de modelos mais realistas e o desenvolvimento de algoritmos capazes de tratar problemas de grande porte. O resultado deste esforço é altamente vantajoso; diversas aplicações reais nos Estados Unidos e Europa mostram que o uso de ferramentas computacionais leva a uma redução de 5% a 20% do custo total de transporte (Toth e Vigo, 2002).

1.2 Objetivo e metodologia

O objetivo deste trabalho é analisar o impacto decorrente da incorporação de métodos de roteamento e programação dinâmicos de veículos em ambientes produtivos de prestação de serviço onde o aumento do nível de serviço fornecido a clientes é o objetivo prioritário. No presente contexto, o nível de serviço é medido pelo tempo decorrido entre a colocação do pedido e o início de seu atendimento.

Com este objetivo, é proposta uma variante do algoritmo WEF de Pureza e Laporte (2008), originalmente elaborado para problemas dinâmicos com atividades de coleta e de

entrega de bens. O algoritmo foi modificado a fim de tratar o problema de roteamento de veículos dinâmico não capacitado, onde as decisões são tomadas sequencialmente a cada dia de um horizonte de planejamento. As vantagens do tratamento dinâmico do problema estudado são observadas por meio de experimentos computacionais contemplando um conjunto de instâncias geradas com base em dados fornecidos pelo departamento de manutenção de equipamentos de uma empresa do setor de bebidas do interior do estado de São Paulo.

CAPÍTULO 2. PROBLEMAS DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS DINÂMICOS

Dantzig e Ramser foram os primeiros a formular em 1959, um modelo de programação matemática para roteamento de veículos, a partir de uma aplicação real de distribuição de gasolina para estações de venda de combustíveis. Deste então, tem surgido um grande número de variações deste problema.

De forma geral, a resolução de problemas de roteamento de veículos implica em fornecer, para cada veículo, um *roteamento* e uma *programação* dos horários de suas atividades. O roteamento especifica a sequência dos pontos de demanda a serem visitados, enquanto a programação identifica o horário de ocorrência das atividades nesses locais. Em algumas situações, define-se também o dimensionamento da frota.

Sua grande variedade e relevância prática e teórica resultou na classificação destes problemas sob diferentes perspectivas. Em relação à certeza dos dados de entrada, eles podem ser divididos em *determinísticos* ou *estocásticos*. Nos problemas determinísticos admite-se que todas as informações são conhecidas com certeza ao se projetar as rotas. Caso contrário, o problema é estocástico. A incerteza pode afetar dados, tais como, os tipos de pedidos de serviço presentes, a localização geográfica e a demanda dos clientes.

Em relação à dependência temporal dos dados de entrada, problemas de roteamento de veículos podem ser divididos em *estáticos* e *dinâmicos* (Psaraftis, 1988). Nos problemas estáticos, todas as informações independem do tempo. Caso contrário, o problema é dinâmico. O dinamismo pode afetar, por exemplo, informações relativas ao próprio sistema, tais como os tempos de viagem entre quaisquer dois pontos de visita.

Assim sendo, em um problema de roteamento estático e determinístico, todos os dados são conhecidos *a priori* e o tempo não é levado em consideração de forma explícita (o problema tratado por Dantzig e Ramser (1959) é um exemplo desta classe). No problema estático e estocástico, as rotas dos veículos são projetadas no início do horizonte de planejamento antes dos dados incertos se tornarem efetivamente conhecidos. Em abordagens de programação estocástica é desejável a disponibilidade de dados históricos para que informações sobre pedidos futuros possam ser geradas por distribuições de probabilidade e utilizadas durante o planejamento das rotas. A incerteza pode tornar impossível a satisfação das restrições do problema para todas as realizações das variáveis aleatórias. Se a incerteza afeta as restrições, mas a função objetivo é determinística, pode se requerer que as restrições sejam satisfeitas com uma dada probabilidade. Em uma abordagem mais geral, a solução de

uma primeira fase é construída antes dos dados incertos serem disponibilizados, e assim que as realizações das variáveis aleatórias se tornam conhecidas, ações corretivas nas rotas (*recourse*) são tomadas em um segundo estágio. O objetivo a ser minimizado é o custo do primeiro estágio mais os custos de correções esperados (Ghiani *et al.*, 2003).

No problema dinâmico e determinístico, todas as informações são conhecidas inicialmente, entretanto algumas destas informações dependem do tempo. Em problemas dinâmicos e estocásticos (também conhecidos como *problemas de roteamento e despacho em tempo real*), apenas um subconjunto destas informações é conhecido inicialmente; o restante é disponibilizado gradualmente ao longo do horizonte de operação (Ghiani *et al.*, 2003).

2.1 O Problema Geral de Coleta e Entrega e seus Casos Particulares

Uma generalização bem ampla de problemas de roteamento de veículos é o chamado Problema Geral de Coleta e Entrega (PGCE) (*General Pickup and Delivery Problem*), modelado por Savelsbergh e Sol (1995). A função objetivo depende da aplicação, entretanto, as mais comuns são: minimizar o custo total da operação; minimizar o tempo total de transporte; minimizar a distância total percorrida por todas as rotas; minimizar o número de veículos utilizados; minimizar o tempo de espera; e maximizar o serviço ao cliente.

No PGCE, a carga de cada pedido deve ser coletada em uma localidade e entregue em outra. Os veículos não estão necessariamente concentrados em um depósito ou garagem central, mas podem se encontrar em qualquer localidade da região. Cada requisição dos clientes deve ser servida por somente um veículo. A demanda total dos clientes servidos por uma dada rota não deve exceder a capacidade total do veículo a ela designado. O tempo total dispendido em cada rota não deve também exceder um tempo limite pré-estabelecido, e, neste cômputo, inclui-se os tempos de viagem entre os clientes e o tempo de atendimento a cada cliente.

Savelsbergh e Sol (1995) consideram três problemas como casos particulares do PGCE: o Problema de Coleta e Entrega (PCE) (*Pickup and Delivery Problem*), *Dial-a-Ride* (DARP), e o Problema de Roteamento de Veículos (PRV) (*Vehicle Routing Problem*). No PCE, cada pedido possui localidades de coleta e entregas específicas e uma única garagem de onde os veículos partem e devem retornar ao final da rota. Já o DARP, caso especial do PCE, a carga transportada são pessoas, o que geralmente impõe restrições adicionais de

inconveniência do cliente, como limitações no tempo extra em viagem em relação ao tempo do percurso direto entre a coleta e a entrega. Note que uma vez que tanto o PCE como o DARP respondem a demandas de clientes específicos, *janelas de tempo* especificando o período no qual o serviço deve ser iniciado em uma ou ambas as localidades estão quase sempre presentes (Pureza e Laporte, 2008). No PRV, tema central deste trabalho, todos os pontos de coleta (ou de entrega) dos pedidos são idênticos e correspondem ao depósito central. Este problema é muitas vezes referenciado na literatura como *PRV clássico*, uma vez que a inclusão de outras restrições – por exemplo, janelas de tempo nas localidades de demanda – resulta em variações do problema. O termo *clássico* também somente se aplica à versão estática do PRV, cuja modelagem é descrita a seguir.

2.1.1 Modelagem matemática do PRV clássico

O PRV clássico pode ser formulado matematicamente por vários modelos de programação linear inteira. Um modelo que o expressa claramente, é proposto em Golden *et al.* (1977) e é apresentado a seguir.

Dados de entrada: Constantes

n : número de clientes (nós) a serem visitados ;

NV : número máximo de veículos ;

Índices

i, j, p : clientes ou depósito ($i, j, p = 1$ (depósito); $i, j, p = 2..n$ (clientes))

v : veículos ($v = 1..NV$)

Dados de entrada: Vetores e matrizes

d_i : demanda do cliente i ;

t_i^v : tempo de serviço do veículo v no cliente i ;

t_{ij}^v : tempo de viagem do veículo v entre os clientes i e j ;

K_v : capacidade do veículo v ;

c_{ij}^v : distância de viagem do cliente i ao cliente j para o veículo v ;

T_v : tempo máximo de viagem para o veículo v .

Variáveis de decisão

$$x_{ij}^v = \begin{cases} 1, & \text{se o arco entre os clientes } i \text{ e } j \text{ for percorrido pelo veículo } v \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

X = matriz com componentes $x_{ij} = \sum_{v=1}^{NV} x_{ij}^v$, especificando conexões independentemente do tipo de veículo.

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{v=1}^{NV} c_{ij}^v x_{ij}^v \quad (1)$$

Sujeita a:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{v=1}^{NV} x_{ij}^v = 1 \quad (j = 2, \Lambda, n) \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{v=1}^{NV} x_{ij}^v = 1 \quad (i = 2, \Lambda, n) \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ip}^v - \sum_{j=1}^n x_{pj}^v = 0 \quad (v = 1, \Lambda, NV; p = 1, \Lambda, n) \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n d_i \left(\sum_{j=1}^n x_{ij}^v \right) \leq K_v \quad (v = 1, \Lambda, NV) \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n t_i^v \sum_{j=1}^n x_{ij}^v + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n t_{ij}^v x_{ij}^v \leq T_v \quad (v = 1, \Lambda, NV) \quad (6)$$

$$\sum_{j=2}^n x_{1j}^v \leq 1 \quad (v = 1, \Lambda, NV) \quad (7)$$

$$\sum_{i=2}^n x_{i1}^v \leq 1 \quad (v = 1, \Lambda, NV) \quad (8)$$

$$x_{ij}^v = 0 \text{ ou } 1 \quad \text{para } \forall i, j, v \quad (9)$$

$$X \in S \quad (10)$$

A função objetivo do PRV é fornecida por (1) e visa minimizar a distância total percorrida. As restrições (2) e (3) asseguram que a demanda de cada nó seja atendida por exatamente um veículo. A continuidade da rota é representada pela equação (4), isto é, se um

veículo entra em um nó, este deve sair do nó. As desigualdades (5) e (6) representam, respectivamente, as restrições de capacidade dos veículos e o tempo total de viagem. As inequações (7) e (8) garantem que no máximo uma vez um veículo saia e chegue ao depósito.

A restrição (10) imposta à matriz X evita subrotas. O conjunto S é composto por restrições impostas a cada veículo v , ou seja, S pode ser expresso como a união de conjuntos S_v , definidos como:

$$S = \left\{ x_{ij}^v : \sum_{i \in Q} \sum_{j \in Q} x_{ij}^v \leq |Q| - 1 \right\}$$

para todo subconjunto não vazio Q de $(1, \Lambda, n)$, onde $|Q|$ representa a cardinalidade do conjunto Q . Este tipo de restrição proíbe, por exemplo, a decisão $x_{ii}^v = 1$, o que configuraria uma subrota.

As restrições (1)-(10) e a função objetivo descrevem as condições necessárias e suficientes para obtenção de uma solução factível e ótima. Note que este modelo admite frota heterogênea, e não permite o atendimento parcial de um cliente j por um veículo v .

2.2 O Problema Geral de Coleta e Entrega Dinâmico e Estocástico

A disponibilização gradual de informações, típica de sistemas de roteamento dinâmicos, torna razoável que porções das rotas originalmente planejadas e ainda não cumpridas possam ser modificadas para acomodar novas requisições e para responder a outros eventos. Na versão dinâmica e estocástica do PGCE, a decisão de replanejamento de rotas quando da ocorrência de um novo evento pode ser vista como um problema estático a ser resolvido.

A Figura 2.1 ilustra um módulo de despacho onde os eventos considerados correspondem à chegada de uma nova requisição ou à finalização de serviço em um cliente. Note que em ambos os casos, o despachante responde ao evento acionando um procedimento de replanejamento de rotas. Pedidos que chegaram ao sistema até $t=0$, são planejados em conjunto no início do horizonte de planejamento.

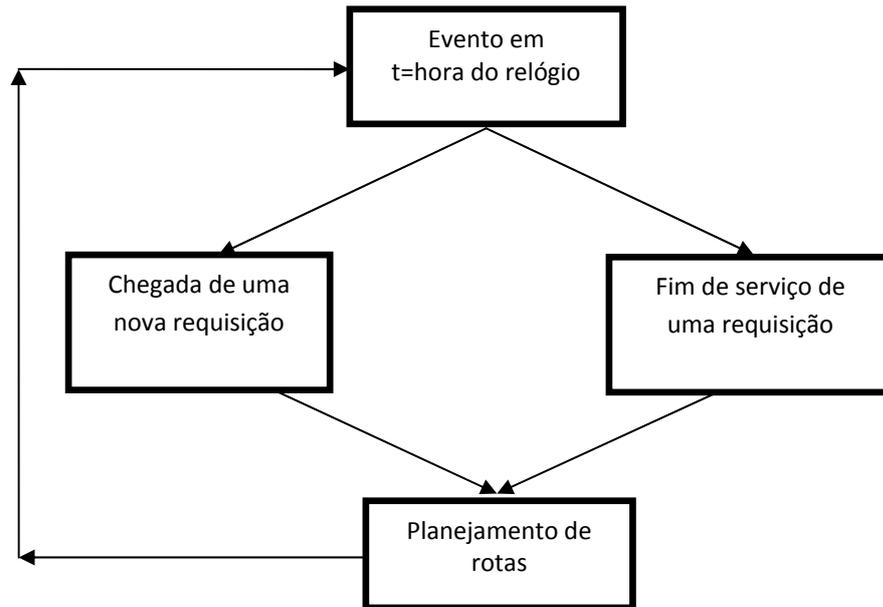


FIGURA 2.1: Um Módulo do Despacho Dinâmico de Veículos.

Considere agora a situação de duas rotas de um PRV dinâmico. A Figura 2.2a ilustra as rotas planejadas no início da jornada de trabalho de um dado dia, considerando as requisições já conhecidas. A Figura 2.2b mostra o instante em que uma nova requisição chega ao sistema. Note que parte das rotas foi realizada, enquanto que as porções que se iniciam na posição atual dos veículos e terminam no depósito correspondem aos roteiros planejados e ainda não realizados. As requisições dos roteiros planejados são, então, reprogramadas juntamente com a nova requisição, com a inserção desta última na rota 2 (Figura 2.2c).

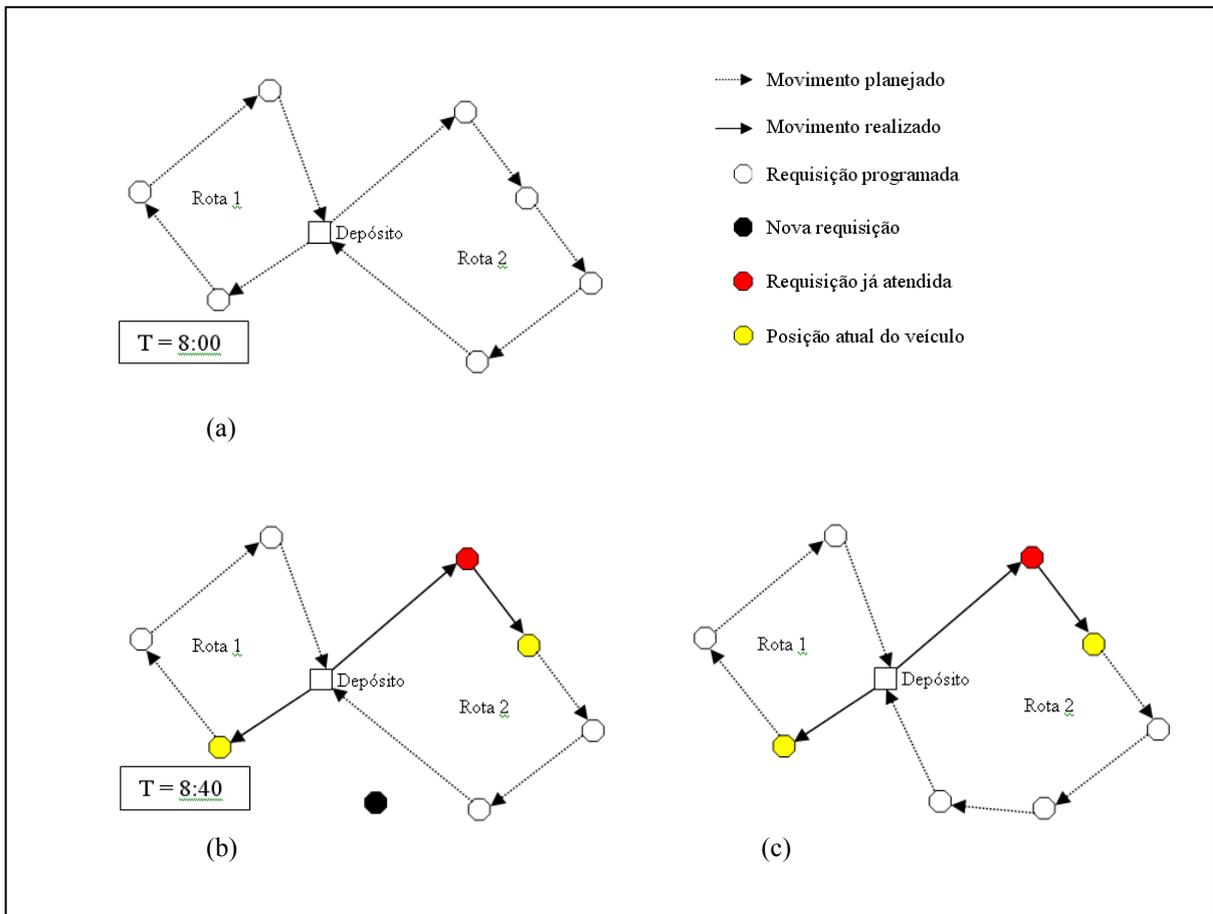


FIGURA 2.2: Planejamento dinâmico de rotas: (a) Rotas planejadas em $T=8:00$, (b) Chegada de uma nova requisição ao sistema em $T=8:40$, e (c) Replanejamento de rotas com inclusão da nova requisição.

O replanejamento de rotas está intrinsecamente associado ao *grau de dinamismo* do problema, por sua vez, definido como a porcentagem de pedidos dinâmicos em relação ao total (Lund *et al.*, 1996). Em seu estudo de diferentes estratégias para o PRV dinâmico, Larsen *et al.* (2002) considera um sistema fracamente dinâmico quando 20-30% dos pedidos chegam em tempo real. Exemplos práticos incluem sistemas de distribuição baseados no vendedor (*vendor-based distribution systems*) e o transporte de deficientes. Um sistema é considerado fortemente dinâmico quando o grau de dinamismo é igual a 80-90%. Serviços emergenciais e empresas de táxi são exemplos típicos desta categoria. Sistemas moderadamente dinâmicos situam-se entre estas faixas e incluem serviços urbanos de encomendas expressas e assistência técnica.

Segundo Larsen *et al.* (2000), o grau de dinamismo específico do problema deve ser considerado na escolha do método de solução. O autor enfatiza as distintas necessidades dos problemas dinâmicos. Modelos probabilísticos, quando utilizados, devem ser muito bem

validados para que seja aceitável enviar um veículo para uma região onde não há uma demanda real, mas uma possibilidade de uma demanda. Este tipo de tratamento é bem adaptado a problemas com alto grau de dinamismo, como por exemplo, onde 90% dos consumidores surgem após o início do roteamento.

Este trabalho aborda a versão dinâmica e estocástica do PRV na qual a localização de novas requisições e seus requerimentos só são reveladas quando os veículos já estão em operação. Assume-se a existência de uma central de comunicação que informa ao motorista, mudanças na sua programação (Montemanni *et al.*, 2003). Para que as requisições não programadas possam ser atendidas no mesmo dia da solicitação, é imposto um tempo limite de solicitação de tal modo que requisições recebidas após esse tempo limite sejam consideradas para o próximo dia de operação.

Na Tabela 2.1 são apresentadas algumas aplicações de versões estáticas e dinâmicas do PRV, PCE e DARP com amplo tratamento na literatura atual, segundo Alvarenga (2005).

TABELA 2.1- Aplicações de PGCEs dinâmicos e estáticos.

Problema	Natureza dos Dados	
	Estática	Dinâmica
PRV	Serviços postais	Entrega de bebidas solicitadas a uma distribuidora
PCE	Transporte escolar para várias escolas	Distribuição de dinheiro de várias agências para vários caixas automáticos
DARP	Transporte de deficientes	Serviços de táxi

Fonte: Adaptado de Alvarenga (2005).

2.3 Características de Problemas de Roteamento Dinâmico

Na década de 80, um importante estudo sobre os problemas de roteamento dinâmico foi apresentado em Psaraftis (1988). Neste trabalho, são identificados e comentados 12 fatores que diferenciam os problemas dinâmicos dos estáticos. Algumas dessas diferenças são aqui destacadas.

No roteamento dinâmico:

- **Informações futuras podem ser imprecisas ou desconhecidas:** Assim como em qualquer situação da vida real, o futuro é incerto. Informações probabilísticas podem ajudar a reduzir essas incertezas.
- **Mecanismos de atualização da informação são essenciais:** Durante todo o processo, podem ocorrer novos eventos, como a chegada de um novo pedido ou a quebra de um veículo, os quais precisam ser considerados nas decisões.
- **Eventos de curto prazo possuem maior importância:** Estes eventos possuem prioridade, pois precisam ser tratados mais rapidamente que os de longo prazo.
- **Tempos computacionais baixos são necessários:** Devido às constantes atualizações das informações em tempo real, baixos tempos computacionais são essenciais para a viabilidade de operação de um sistema dinâmico.
- **Flexibilidade para variar o tamanho da frota de veículos é baixa:** No problema dinâmico é geralmente difícil a obtenção de veículos extras, devido ao pouco tempo existente entre a execução do algoritmo e a realização das rotas.

Em Kilby *et al.* (1998) são apresentadas as seguintes características chaves que diferenciam os problemas dinâmicos dos estáticos:

- **Coleta x Entrega:** Problemas estáticos de coleta e problemas estáticos de entrega podem ser modelados como equivalentes. Já em problemas dinâmicos é fisicamente impossível adicionar uma entrega a um veículo que já tenha deixado o depósito. Coletas, por outro lado, podem ser adicionadas às programações de veículos em qualquer momento.
- **Política de compromisso:** Em algum momento da execução da programação, o motorista deve ser informado de seu próximo destino ou conjunto de destinos. Uma vez que isso ocorra, existe o compromisso de que esta(s) localidade(s) seja(m) a(s) próxima(s) a ser(em) atendida(s), ou seja, estas atividades de programação não podem sofrer mudanças. Desta forma, uma das questões fundamentais no roteamento dinâmico é escolher a hora mais adequada para passar as informações de atendimento de próximos clientes aos motoristas.
- **Tarefas conhecidas a priori:** Em problemas estáticos, as atividades são conhecidas com antecedência. Por exemplo, em alguns sistemas de entregas, as mercadorias chegam ao depósito no período noturno, e aguardam ser distribuídas no outro dia logo

pela manhã. Já em problemas dinâmicos, é impossível saber todas as atividades a priori, pois muitas vão chegando ao longo do dia.

- **Incorporação de melhorias:** Um dos principais benefícios de um sistema dinâmico é que ele possui um tempo extra disponível para realizar melhorias na programação atual, por exemplo, por meio de buscas locais. Entretanto, enquanto o sistema está buscando as melhorias, novos eventos vão surgindo, os quais devem ser considerados na programação. Isto faz com que alguns conflitos possam ocorrer. Uma opção é abortar a busca de melhorias no momento em que um evento surge. Outra alternativa consiste no armazenamento dos novos eventos até que a busca por melhorias seja realizada e depois adicioná-las em conjunto no sistema.
- **Tempo entre notificação e despacho:** Um pedido de serviço que chega dez minutos antes de seu prazo final é muito mais difícil de ser tratado do que um que chega com algumas horas de antecedência.
- **Utilização do histórico de informações:** Informações históricas podem ser utilizadas como forma de melhorar o desempenho de algoritmos através da resolução de problemas tanto estáticos como dinâmicos. Históricos com demandas e tempos de atendimento das ordens de pedidos podem ser utilizadas para montar estruturas de rotas *a priori*.

2.3.1 Estratégias de Espera de Veículos

Assim como no caso estático, a resolução de problemas de roteamento dinâmico envolve duas decisões principais: o roteamento, que define a seqüência de localidades designadas a cada veículo, e a programação, que determina os tempos em que cada veículo deve atingir e partir de cada uma destas localidades. A esta última decisão tem-se associado algum tipo de *estratégia de espera de veículos*. Estas políticas podem também prescrever locais diferentes das localidades correntes para reposicionamento de veículos ociosos enquanto estes esperam por novos pedidos.

Estratégias de espera de veículos encontram-se entre dois extremos: *dirigir primeiro* (*drive-first* - DF) e *esperar primeiro* (*wait-first* - WF). A estratégia DF requer que os veículos deixem suas localidades atuais assim que o atendimento esteja completo. Esta é a estratégia mais comumente usada, talvez porque seja a única opção apropriada para o caso estático, e

também porque é a mais fácil de ser gerenciada (Benyahia and Potvin, 1998; Gendreau *et al.*, 2006).

A estratégia WF, por outro lado, atrasa o veículo de seu local de partida até o último momento possível (Gendreau *et al.*, 1999). Quando existem janelas de tempo nos clientes, WF prescreve que o instante de partida do veículo seja tal que a chegada ao próximo cliente programado ocorra, sempre que possível, no limitante *superior* de sua janela de tempo. A razão motriz para a espera de veículos em uma dada localidade é que ela permite o acúmulo de pedidos antes do próximo replanejamento de rotas, o que por sua vez, pode resultar em melhores decisões de roteamento e programação.

Experimentos computacionais reportados em Mitrović-Minić e Laporte (2004) para o PDCEJT confirmam que a estratégia WF tende a produzir rotas mais curtas quando comparada à estratégia DF. Por outro lado o WF requer mais veículos do que o DF já que a grande concentração de tempos de espera nos estágios iniciais impede que os veículos em rota atendam novos pedidos.

Entre DF e WF, estratégias de espera intermediárias e híbridas podem ser formuladas. Um exemplo de estratégia híbrida é proposta em Mitrović-Minić e Laporte (2004) e consiste em utilizar DF se a localidade corrente e as seguintes estão próximas (em tempo e espaço) entre si; caso contrário, WF é empregada. Um exemplo de estratégia intermediária, denominada WE (Pureza e Laporte, 2008), é aplicada a problemas com janelas de tempo nos clientes e determina que o instante de partida do veículo seja tal que a chegada à próxima localidade planejada ocorra o mais cedo possível, mas não antes do limitante *inferior* de sua janela de tempo.

2.4. Classificação de abordagens de resolução para problemas de roteamento estocásticos e dinâmicos

Segundo Larsen (2000), pode-se distinguir as abordagens para problemas estocásticos e dinâmicos de acordo com a metodologia básica de resolução e pela maneira com que as incertezas se apresentam no problema. No tocante à metodologia de resolução, as estratégias podem ser classificadas como:

a) *A priori*

Na estratégia *a priori*, uma solução inicial é obtida baseando-se em informações probabilísticas de eventos futuros tais como a existência do cliente, demanda, tempo de viagem entre trechos, entre outras. Segundo Bertsimas e Simchi-Levi (1993), a aplicação de re-otimização em problemas com demandas aleatórias pode gerar um consumo excessivo de tempo e recursos. Além disso, muitas alterações de roteiros levam a uma diminuição do nível de controle da frota. Estes fatores justificam a investigação dos métodos baseados em soluções *a priori*.

Em situações de demanda estocástica, por exemplo, a demanda de cada possível localidade está associada a uma probabilidade de existir de fato. Caso as demandas que se confirmam sejam conhecidas no momento em que se inicia a execução da rota, a seqüência de visitas determinada *a priori* é seguida, ignorando-se pontos de demanda que não se confirmaram. Este problema pode ser aplicado em serviços de entrega que contam com uma base fixa de clientes que podem ou não ter uma demanda a cada dia. Uma boa solução deve ajudar a determinar rotas que, além de terem um custo baixo, sejam pouco influenciadas pela existência ou não do pedido (Lorenzi, 2003). Caso as demandas sejam conhecidas apenas na chegada dos veículos a cada cliente, uma estratégia prescreve que os veículos visitem todos os clientes, servindo apenas àqueles em que a demanda se confirmou. Quando a capacidade do veículo se esgota, este retorna ao depósito e inicia uma nova rota (Bertsimas *et al*, 1990).

b) Otimização em tempo real

Estas abordagens constroem rotas durante sua execução. Em especial, alguns estudos fornecem limitantes inferiores para tempos de percurso em condições de tráfego leve ou pesado, a partir da análise de disciplinas ou políticas de despacho de veículos. Dentre tais políticas, cabe ressaltar a política FCFS (*first come first served*), sob a qual pedidos são atendidos em ordem de chegada ao sistema, e a política SQM (*Stochastic Queue Median*), a qual prescreve o retorno do veículo à mediana da região de atendimento assim que o serviço é finalizado.

Em particular, Bertsimas e Van Ryzin (1991) propõem e estudam o Problema do Técnico de Manutenção Viajante Dinâmico (*Dynamic Traveling Repairman Problem*). O problema é definido da seguinte maneira: um veículo (técnico) viaja a uma velocidade constante e unitária em uma região delimitada e quadrada de área A . Todas as demandas são dinâmicas e chegam de acordo com uma distribuição de Poisson com parâmetro de intensidade λ . As localizações de demanda são uniformemente distribuídas e cada demanda i requer serviço com duração s_i . O objetivo é minimizar o tempo total de serviço.

O estudo considerou as políticas de despacho FCFS, NN, SQM, TSP, SFC e PART. A política NN (*Nearest Neighbor*) consiste na abordagem do *vizinho mais próximo*; após a finalização do serviço no cliente i , o veículo se dirige ao cliente mais próximo de i . Na política TSP, a cada número pré-determinado de clientes, um problema do caixeiro viajante é resolvido para determinar a ordem de execução. Se mais de um conjunto de clientes estiver aguardando serviço, a ordem de execução de cada conjunto segue a política FCFS. A política SFC (*Space Filling Curve*), por sua vez, prescreve que os pedidos sejam atendidos na ordem em que são encontrados enquanto o veículo viaja em torno da região e em direção ao seu centro no sentido horário. Na política PART (*Partition policy*), a região servida é dividida em subregiões quadradas onde são atendidos os pedidos por FCFS. O veículo só deixa a região corrente quando não houver mais pedidos aguardando serviço.

Posteriormente, os resultados obtidos pelos autores foram generalizados para o caso de mais de um veículo e restrições de capacidade em Bertsimas e Ryzin (1993). Os autores concluem que a política do vizinho mais próximo gera bons resultados quando comparado a outros, tanto para o caso de um ou mais veículos.

Grande parte dos trabalhos que consideram o planejamento de rotas em tempo real se utiliza de modelos de programação matemática estocástica (Hvattum *et al*, 2006) ou, ainda mais comumente, de métodos heurísticos. O capítulo a seguir apresenta uma revisão bibliográfica destes últimos. A revisão é restrita aos trabalhos considerados relevantes aos propósitos desta pesquisa.

CAPÍTULO 3. ABORDAGENS DE RESOLUÇÃO PARA ROTEAMENTO DINÂMICO

Grande parte da literatura em problemas de roteamento de veículos é devotada à versão estática das muitas variações do problema (Savelsbergh e Sol, 1995; Mitrović-Minić e Laporte, 2004). Não obstante, dado o maior realismo que um tratamento dinâmico oferece a situações de relevância prática, observa-se um número crescente de abordagens de resolução que buscam explorar as características distintas destes problemas.

Em 1988, Psaraftis publicou o primeiro estudo da versão dinâmica do PRV, apontando propostas para estudos posteriores. Neste trabalho, o autor apresenta adaptações possíveis de abordagens estáticas a problemas dinâmicos, detalhando o algoritmo *MORSS (MIT Ocean Routing and Scheduling System)* (Psaraftis *et al.*, 1985), desenvolvido para o MSC (*Military Sealift Command*). O objetivo do problema é o de alocar cargas a navios em situações de emergência de forma que todos os veículos cheguem aos seus destinos em uma dada janela de tempo. Restrições de capacidade e utilização dos navios, compatibilidade entre navios, cargas e portos, e congestão dos portos são consideradas. Psaraftis argumenta que o problema é dinâmico por natureza devido às condições ambientais que mudam em tempo real. O algoritmo usa o princípio de horizonte rolante, no qual apenas cargas mais urgentes são consideradas para alocação permanente. Cargas com prazos mais distantes no horizonte têm menor prioridade de alocação visto que tais decisões estão sujeitas a alterações.

Para o PRVJT dinâmico, uma das primeiras metaheurísticas desenvolvidas é a de Gendreau *et al.* (1999). Este algoritmo é essencialmente uma adaptação do algoritmo de busca tabu de Taillard *et al.* (1997) para o problema estático. Experimentos computacionais com instâncias geradas aleatoriamente, e caracterizadas por diferentes taxas de chegada de pedidos, atestam o desempenho superior do algoritmo proposto em relação aos de outros cinco métodos. Além disso, as soluções obtidas apresentam distâncias totais (custos) que representam no máximo 4,1% de aumento em relação ao obtido com o problema estático.

Uma extensa revisão sobre os diferentes tipos de problemas de roteamento dinâmico pode ser encontrada em Ghiani *et al.* (2003). Os autores listam sete classes de problemas dinâmicos e apresentam alguns métodos heurísticos para a resolução destes como métodos de inserção e metaheurísticas. Em métodos de inserção, clientes são inseridos em tempo real na posição de menor custo (distância, tempo) das rotas atuais. Já para as metaheurísticas, os

autores comentam que estes métodos melhoram significativamente a qualidade das soluções relativamente aos anteriores e citam alguns trabalhos como o de Potvin *et al.* (1992) e Bagchi e Nag (1991). Cabe ressaltar o excelente desempenho do algoritmo de busca tabu de Gendreau *et al.* (1998) para o PCE dinâmico.

Kilby *et al.* (1998) utilizam um procedimento heurístico de inserção e melhoria (*insert and improve*) para o PRV capacitado (coleta ou entrega) e descrevem como vantagem a utilização do tempo disponível entre chegadas de pedidos para busca de melhorias. Enquanto no problema estático um cenário de entrega é equivalente a um cenário de coleta para qualquer abordagem, no problema dinâmico o cenário de entrega acrescenta maiores dificuldades, visto que não se pode incluir um pedido de entrega a um veículo que já tenha saído do depósito. A solução inicial é gerada através da incorporação de todos os pedidos conhecidos. Cada pedido dinâmico é então acrescentado à programação assim que se torna conhecido, inserindo-o em uma posição que aumente o custo o mínimo possível. Em seguida aplicam-se buscas locais utilizando vizinhanças 2-Opt, Or-opt, entre outras. No estudo, uma instância de 100 visitas diárias é resolvida com muitos movimentos de melhoria testados e implementados entre as chegadas dos pedidos. Os autores avaliam a qualidade da abordagem, adaptando ao caso dinâmico, problemas testes estáticos utilizados em Taillard (1994), Christophides e Beasley (1984), e Fisher *et al.* (1981). Os resultados mostram que em relação ao problema estático, o custo da entrega aumenta significativamente com o aumento da dinamicidade, ou seja, com o número de pedidos surgidos após o início do roteamento.

Fleischmann *et al.* (2004) analisam para o problema de coleta e entrega dinâmico com janelas de tempo, a combinação de dois aspectos dinâmicos - a ocorrência de novos pedidos e as condições de trânsito, estas fornecidas por um centro de gerenciamento de tráfego. O cenário estudado contempla 50 veículos e 981 pedidos diários, dos quais aproximadamente 50% são dinâmicos. Os autores analisam o desempenho de regras de despacho, algoritmos de designação de pedidos a veículos, e algoritmos de inserção e melhoria. O algoritmo de designação de pedidos a veículos apresentou os melhores resultados. A cada novo pedido determina-se o custo de não se atender imediatamente cada pedido pendente (violação das janelas de tempo) e o de designá-lo a um determinado veículo. Calcula-se também qual seria o custo de manter um veículo parado, esperando uma nova ordem. Resolve-se então o problema de designação resultante com o algoritmo LAPJV de Jonker e Volgenant (1987), com base na matriz de custos.

Um problema dinâmico de coleta e entrega com janelas de tempo é analisado por Mitrović-Minić *et al.* (2004). Serviços do tipo *courier* utilizam este tipo de processo, onde

produtos de pequeno porte e em quantidades pequenas são coletados e entregues no mesmo dia. Para cada pedido, um mesmo veículo deve passar pelas localidades de coleta e de entrega, respeitando a ordem de precedência e os intervalos definidos pelas janelas de tempo. O método proposto baseia-se na separação do problema em dois horizontes, de curto e de longo prazo. A meta para o problema de curto prazo é minimizar a distância das viagens, enquanto para o problema de longo prazo é maximizar a folga das rotas de forma a aumentar a chance de inserção de pedidos futuros. Para a resolução do problema foram desenvolvidas duas heurísticas. A primeira heurística consiste em um procedimento de construção de inserção/reinserção mais barata. O procedimento é inicialmente aplicado para os novos pedidos que foram acumulados ao longo de um certo período de tempo. Estes pedidos são classificados e inseridos em ordem crescente de tempo de folga, isto é, a diferença entre o tempo total disponível para atender a requisição e o tempo de viagem entre os locais de coleta e entrega. Segue-se então a reinserção dos pedidos dos locais de coleta planejados e que ainda não foram atendidos, também em ordem crescente de tempo de folga. Já a segunda heurística adiciona uma fase de melhorias por meio de um algoritmo de busca tabu, aplicado enquanto novos pedidos se acumulam.

Mitrović-Minić e Laporte (2004) incluem estratégias de espera de veículos para o problema apresentado em seu artigo anterior. O benefício da espera é atender a um custo menor os novos clientes que poderiam surgir em locais próximos à posição atual do veículo. São testadas quatro estratégias de espera, as quais definem o momento em que um veículo que terminou o atendimento do cliente deve partir para o próximo destino. Além das estratégias DF (*drive-first*) e WF (*wait-first*), é proposta a estratégia *dinâmica*, híbrida das anteriores. O veículo segue a estratégia DF no atendimento de clientes pertencentes a uma mesma zona de serviço, a qual é demarcada considerando tanto a distância entre os clientes, quanto o intervalo de tempo para atendimento de todos os clientes da zona. Após o término do atendimento dos clientes de uma zona de serviço, o veículo segue a estratégia WF até a próxima zona. A estratégia *dinâmica avançada* é semelhante à espera dinâmica. A única modificação é uma atenuação da estratégia de espera WF com a distribuição do tempo de espera distribuído por toda a rota. Dentre estas, a estratégia de espera dinâmica avançada foi a que produziu os melhores resultados em relação ao tamanho total da rota e à quantidade de veículos utilizados.

Branke *et al.* (2005) realizam um estudo teórico baseado em estratégias de espera para o PRV dinâmico. O estudo analisa a chegada de novos pedidos de localidades aleatórias, desconhecidas, após os veículos já terem deixado o depósito. É considerada a utilização de

um e dois veículos. O objetivo é o de maximizar a probabilidade de inserção de um novo cliente numa rota existente.

Pureza e Laporte (2008) analisam estratégias de espera de veículos e de armazenamento de pedidos para um problema dinâmico de coleta e entrega com janelas de tempo (PDCEJT). Em particular, a estratégia de armazenamento adia a designação de algumas novas requisições de atendimento não urgentes. A estratégia de espera de veículos, por sua vez, vale-se do fato dos tempos de viagem entre duas localidades i e j serem aleatórios e, portanto, permitirem a ocorrência de caminhos mais rápidos (*fastest paths*) que passem por localidades intermediárias entre i e j . Adotando-se estes caminhos, o tempo extra em relação à viagem direta i - j é utilizado para estender o tempo de espera em i e/ou antecipar a chegada em j . Para um conjunto de instâncias geradas aleatoriamente com até 200 pedidos, um algoritmo dotado da estratégia de espera proposta (algoritmo WEF) produz reduções de até 8,3% (número de pedidos não atendidos) e 4,3% (número de veículos) em relação à estratégia WE (descrita na seção 2.3.1). No tocante à distância total percorrida, verifica-se um aumento médio de até 7,1%. O melhor desempenho em termos de redução de pedidos não atendidos foi obtido com instâncias de grau moderado de dinamismo (entre 0,2 e 0,6); quase 70% do total de ganhos neste critério foram obtidos em exemplos com esta característica.

CAPÍTULO 4. A EMPRESA ESTUDADA

A Companhia de Bebidas Ipiranga é uma empresa que opera desde 1948 na região de Ribeirão Preto e sul do estado de Minas Gerais, atendendo mais de 300 cidades e abastecendo aproximadamente 30.000 postos de venda. Desde a sua fundação, produz e engarrafa produtos de *The Coca Cola Company*, tendo sido uma das primeiras franquias da multinacional no Brasil. A empresa apresenta um faturamento na casa de R\$ 580 milhões ao ano, oferecendo mais de 100 produtos de qualidade entre águas, refrigerantes, cervejas, chás, energéticos e sucos.

A companhia atua com um sistema próprio de vendas e distribuição de bebidas. O sistema adotado pela empresa é o de pré-vendas. Esse sistema é assim denominado porque a equipe de vendas, por intermédio de seus vendedores, realiza visitas a um conjunto de clientes num dia e somente no dia útil seguinte, as mercadorias são entregues. Em outras palavras, a empresa trata a distribuição de forma estática. O planejamento das rotas de distribuição é realizado pelo sistema *Roadshow Route PlannerTM* (<http://www.descartes.com>), contando para isso com uma base de dados que reúne informações de toda a malha viária, condições das ruas, distâncias, velocidade, mãos de direção, horários de congestionamento, assim como características de cada cliente, janelas de tempo, tempos de atendimento fixo e variável, entre outras.

Além da produção, engarrafamento e distribuição dos produtos, a empresa presta serviços de manutenção corretiva e preventiva de equipamentos que disponibilizam estes produtos. A próxima seção descreve o departamento responsável por esta atividade, onde o presente estudo foi realizado.

4.1 O Departamento de Equipamentos de Mercado

O Departamento de Equipamentos de Mercado (DEM) é responsável pela manutenção dos equipamentos nos postos de venda. São quatro os tipos de equipamento que demandam manutenção, cada qual caracterizado pela modalidade de produtos e pela forma de disponibilização. Especificamente:

- Geladeira: disponibiliza produtos variados em embalagens de vidro, latas e encartonados.
- *Push mix*: máquinas que fornecem refrigerantes em copos descartáveis, encontradas geralmente em restaurantes e lanchonetes.
- Chopeira: similar ao *push mix* onde o produto disponibilizado é o chopp.
- *Vend-machine*: Possuem o formato de uma geladeira e seu funcionamento consiste na inserção de fichas ou notas de dinheiro para a liberação de produtos. Encontrados em escolas, empresas e shoppings.

As atividades desenvolvidas pelo DEM consistem na instalação, atualização e retirada de equipamentos, e em manutenções corretiva e preventiva. A retirada de equipamentos ocorre quando há casos de inadimplência ou quando foi verificada a colocação de produtos de concorrentes nas máquinas Coca-Cola. Para equipamentos do tipo geladeira e *vend-machine* há hoje somente a atividade de manutenção corretiva; já para os produtos *push mix* e chopeira há tanto a manutenção corretiva quanto a preventiva uma vez que estes precisam ser sanitizados pelo menos a cada 21 dias.

Atualmente, o tempo para atendimento a partir da colocação do pedido é de 48 horas para o item geladeira e 24 horas para os demais. Os funcionários responsáveis por estas atividades são chamados de técnicos de manutenção e estão divididos em grupos, onde cada grupo atende somente um tipo de equipamento. O número de técnicos, seus respectivos grupos e atividades desenvolvidas são apresentados na Tabela 4.1.

TABELA 4.1: Número de técnicos por tipo de equipamento e serviço.

	Tipo de produto			
	Geladeira	<i>Push mix</i>	Chopeira	<i>Vend-machine</i>
Manutenção preventiva	-	9	2	-
Manutenção corretiva	4	1	1	2

O horário de trabalho do DEM é das 7:15 às 17:00 hs. Inicialmente, o cliente telefona para o *call center* da empresa e entra em contato com um atendente disponível, o qual gera um documento para registrar o atendimento. Este documento é chamado de *E-com* (Figura 4.1). Nele são anotados dados como: data e hora do atendimento, número de vezes que ocorreu o problema, contatante e nome fantasia (cliente), endereço, telefone, entre outros. No

E-com é também descrita uma prévia do problema e anotado o horário de atendimento quando este é solicitado pelo cliente.

Após o horário administrativo (17:00), pedidos urgentes são anotados pela portaria e estes passados para os dois técnicos noturnos para atendimento imediato. Um deles atende os produtos geladeira e *vend-machine* e o outro os produtos chopeira e *push mix*.

COMPANHIA DE BEBIDAS IPIRANGA		<u>CONTATO</u>		Emissão : 06/03/2008 11:26	
Companhia de Bebidas Ipiranga				Página: 1	
Contato:	314983	Data:	05/03/2008 17:08	Atendente:	LIDIANE
Ocorrência:	1	Area:	RIB.PRETO	PV:	1021542
Contatante:		Nome Fant :		Bairro:	
Endereço:		Cidade:	RIB. PRETO	UF:	SP
Fone:		Setor:	EQUIPAMENTOS	Cep.:	
Tipo:	INFORMAÇÃO	Responsável:			
Motivo:	MACHINE				
Sub-Motivo:	MANUTENÇÃO				
Observacao:	VMRP010354 - ESTÁ RETENDO DINHEIRO HH - 24H CTT - NILSON				

FIGURA 4.1: Exemplo do documento *E-com*.

O documento registrado é enviado para o setor administrativo que recebe a notificação através do *Notes* (sistema de notificação de emails) e abre o *E-com* para visualização. Pelo sistema SAP (sistema de gestão empresarial), é gerado então o Relatório de Assistência Técnica (ordem de serviço), conforme ilustrado na Figura 4.2. Se no *E-com* há o número do GERP da máquina, este é inserido no relatório e todos os dados referentes ao cliente são gerados automaticamente. O GERP é um número criado no sistema SAP para registrar os dados de uma determinada máquina, isto é, através deste número, dados como tipo e localização do equipamento são informados.

As ordens de serviço são geradas a partir dos contatos recebidos até às 16:00, e são passadas no dia posterior, logo cedo às 7:15 para os técnicos de manutenção, através de uma reunião que dura cerca de 15 minutos.

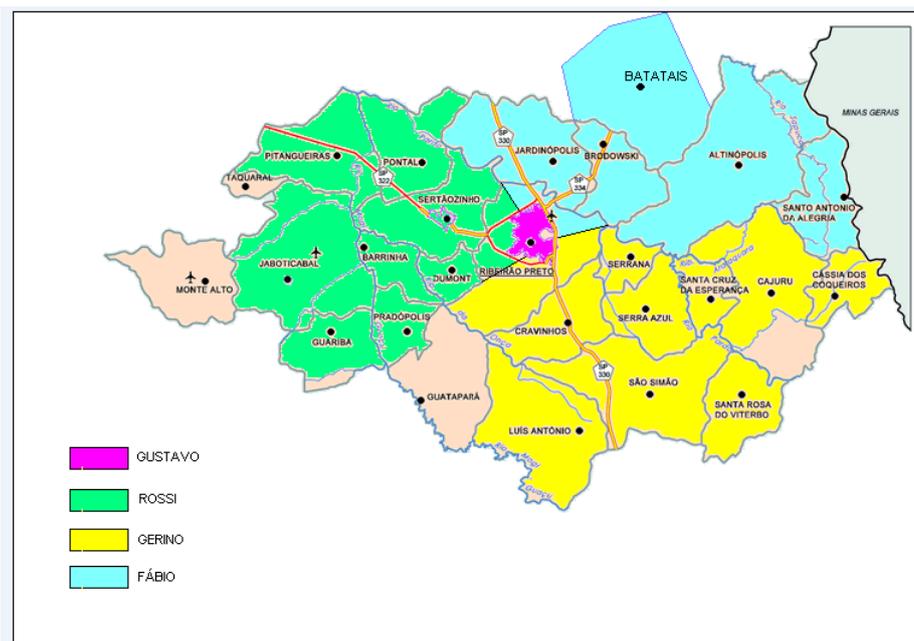


FIGURA 4.3: Divisão da região em quatro áreas de atendimento (produto geladeira).

Os clientes estão distribuídos na região de atendimento de forma mista. Partes da região apresentam uma concentração de muitos clientes, como é o caso da área central de Ribeirão Preto, composta por muitos bares e restaurantes. Em outras partes, observam-se poucos clientes geograficamente dispersos uns dos outros. Assim, pode-se dizer que a distribuição dos pontos de demanda é do tipo aleatória/agrupada (*random/clustered*). Devido a esta distribuição, é importante o balanceamento da carga de trabalho dos funcionários, pois alguns podem ficar sobrecarregados (em particular, aquele que atende a área central de Ribeirão Preto-SP), enquanto outros muito ociosos.

Com as ordens em mãos, os técnicos primeiramente analisam a quantidade de peças que serão utilizadas durante todo o dia, e verificam no veículo se estas são suficientes. Caso não sejam, os técnicos vão até o almoxarifado de peças e adquirem os itens faltantes. Esta atividade leva em média de 20 a 30 minutos para ser realizada.

Cada técnico elabora manualmente a seqüência de visitas de sua rota utilizando como critério, a menor distância da localidade anterior da seqüência. Assim, o primeiro cliente a ser atendido é o que está mais próximo da companhia, o segundo cliente a ser atendido é o que se encontra mais próximo do primeiro cliente, e assim sucessivamente. Em situações em que o tempo para atendimento de um cliente está chegando ao limite, o critério da menor distância é temporariamente desconsiderado, e o cliente é atendido em seguida.

A cada técnico é disponibilizado um utilitário de pequeno porte, equipado com peças e ferramentas necessárias para realizar a manutenção corretiva do produto geladeira nos clientes. Os veículos se encontram em uma única garagem localizada na própria fábrica. A partida da garagem ocorre aproximadamente às 8:00 hs.

Os técnicos são responsáveis por anotar as peças utilizadas durante a jornada de trabalho para depois serem descontadas dos depósitos dos carros. Os relatórios de atendimentos realizados e não realizados são entregues no final do expediente para o assistente administrativo dar baixa no sistema de requisições. Os técnicos só retornam ao depósito no final do expediente, e caso tenham atendido todas as ordens do dia antes das 17:00, ligam para o assistente para verificar se há algum local a mais para ser visitado. Caso não haja, os técnicos são liberados e horas a menos de trabalho são descontadas do banco de horas.

A Figura 4.4 ilustra um resumo da seqüência de ações envolvidas no processo de prestação de serviços de manutenção de equipamentos acima descrito.

	Ações
1	Cliente liga para o Call Center
2	Atendentes registram contato no E-com
3	Contato é enviado para o administrativo
4	Administrativo recebe a notificação de pedido através do Notes
5	Abre-se o E-com e visualiza-se o contato
6	Abre-se o sistema SAP e gera-se relatório de Assistência Técnica
7	Administrativo distribui as ordens impressas para os técnicos
8	Técnicos realizam atendimentos

FIGURA 4.4: Ações no processo de prestação de serviços de manutenção de equipamentos.

Note que o planejamento de rotas de atendimento para a manutenção corretiva de geladeiras pode ser descrito como um PRV com um único depósito (garagem), e frota de tamanho limitado. Como se trata de prestação de serviços, a carga requisitada por cada cliente é 0 (problema não capacitado) e os tempos de serviço muito variados. Restrições de janela de tempo incidem somente no depósito, correspondentes à jornada de trabalho.

Este contexto foi escolhido para a realização do presente estudo, uma vez que o problema tem claras características dinâmicas e estocásticas que não são exploradas pela empresa. Considere a situação em que no instante em que um pedido chega ao sistema, um

técnico esteja realizando um serviço nas proximidades da localidade do novo pedido. Na maioria das vezes, o novo pedido só será atendido no dia seguinte, ou seja, o tratamento estático dado ao planejamento coíbe oportunidades de melhorias ao nível de serviço fornecido (atendimento de novos pedidos no mesmo dia). Além disso, todo o planejamento de rotas para manutenção de equipamentos é feito manualmente o que levou ao interesse da empresa em verificar as vantagens e deficiências da aplicação de técnicas matemáticas e computacionais de roteamento dinâmico neste tipo de operação.

O capítulo a seguir descreve uma adaptação do algoritmo WEF de Pureza e Laporte (2008), citado no Capítulo 3, com vistas à resolução do PRV dinâmico em um horizonte de planejamento. São também apresentados e discutidos resultados de experimentos computacionais obtidos com sua aplicação a um conjunto de instâncias geradas aleatoriamente. Instâncias reais não foram disponibilizadas pela empresa. A adaptação do algoritmo, assim como a geração das instâncias, procurou refletir tanto quanto possível, as características do problema de planejamento de rotas para manutenção de equipamentos. O objetivo destes experimentos é o de aferir ganhos potenciais com a adoção do tratamento dinâmico do problema.

CAPÍTULO 5. UMA ADAPTAÇÃO DO ALGORITMO WEF PARA O PRV DINÂMICO

No estudo de Pureza e Laporte (2008) é investigado o impacto de duas estratégias em heurísticas de inserção para resolução do problema dinâmico de coleta e entrega com janelas de tempo (PDCEJT). Especificamente, são propostas: (a) uma estratégia de espera que atrasa a designação dos veículos para seus próximos destinos, e (b) uma estratégia de armazenamento de pedidos que adia a designação de algumas novas requisições de atendimento não urgentes para um próximo planejamento de rota.

Para os propósitos deste trabalho, a discussão a seguir se restringe ao algoritmo que utiliza apenas a estratégia de espera proposta (algoritmo WEF).

5.1 O algoritmo WEF de Pureza e Laporte (2008)

O problema de coleta e entrega visa obter um conjunto de rotas e programações factíveis para n pedidos por transporte de bens. Tanto na localidade de coleta (p^+) como na localidade de entrega (p^-) de cada pedido p são impostas janelas de tempo para o início do serviço, as quais não podem ser violadas. O serviço é realizado por uma frota homogênea de tamanho ilimitado que parte e retorna a um único depósito. O objetivo é o de minimizar de forma hierárquica: (1) o número de pedidos não atendidos, (2) o número de veículos utilizados, e (3) a distância total percorrida. Além disso, é adotada a política de compromisso dos veículos (Seção 2.3); caso um veículo tenha deixado uma localidade, ele é forçado a servir diretamente a próxima localidade planejada. Outra importante característica da aplicação é que uma vez que um pedido tenha sido incorporado à solução em algum estágio, este deverá ser atendido obrigatoriamente em alguma rota. Em outras palavras, se estabelece um compromisso entre a empresa e o cliente.

Os tempos de viagem entre duas localidades i e j são aleatórios e podem ser dependentes do tempo. Uma implicação da aleatoriedade dos tempos de viagem é a de possibilitar que partindo-se de i no instante t , a chegada em j ocorra em um instante mais cedo ao se utilizar um percurso indireto $i-k-j$. Note que esta premissa pode ser considerada realista em muitos

cenários urbanos; congestões de tráfego podem tornar a travessia de certos trechos mais demorada do que a de outros trechos mais longos.

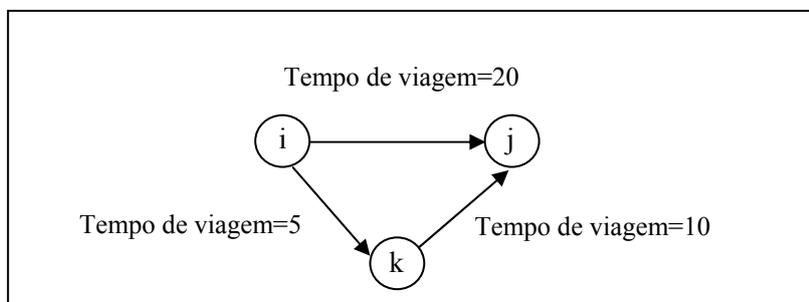


FIGURA 5.1: Exemplo de implicação de tempos de viagem aleatórios: partindo-se de i em $t=0$ chega-se a j em $t=20$ via trecho $i-j$ (viagem direta), e em $t=15$ via trecho $i-k-j$.

Em função das características mencionadas, a estratégia de espera proposta utiliza o tempo extra ao se utilizar *caminhos mais rápidos* entre duas localidades i e j para estender o tempo do veículo na localidade atual (i) ou antecipar sua chegada no próximo destino (j). A antecipação de chegadas resulta em antecipações na finalização do serviço e, conseqüentemente, libera antes os veículos para novos serviços. A extensão do tempo de espera, por sua vez, adia o compromisso dos veículos, permitindo maior flexibilização para mudanças desejáveis no planejamento, por exemplo, o atendimento de um novo cliente urgente nas proximidades da localidade do veículo, seja realizado.

A busca por caminhos mais rápidos é realizada a cada nova localidade k revelada ao sistema; um caminho mais rápido é obtido se a chegada em j é antecipada com a inclusão de k entre i e j . Apenas caminhos mais rápidos com uma única localidade intermediária são considerados. O tempo extra que resulta do uso de um caminho mais rápido é preferencialmente alocado para a antecipação da chegada em j , porém o montante de antecipação está limitado ao início da janela de tempo de j . Na Figura 5.2a, a chegada em j via viagem direta $i-j$ ocorre no *início da janela de tempo* de j (e_j). Assim, todo o tempo extra do caminho mais rápido $i-k-j$ é usado para estender o tempo de espera em i (Figura 5.2b). Na Figura 5.2c, a chegada em j via viagem direta $i-j$ ocorre após e_j . Nesta situação, o tempo extra do caminho mais rápido $i-k-j$ é usado prioritariamente para antecipar a chegada em j para $t=e_j$; o restante do tempo extra é então utilizado para estender o tempo de espera em i (Figura 5.2d).

Sempre que um caminho mais rápido é encontrado e incorporado, os tempos de espera e de partida de todas as localidades seguintes da rota são então atualizados. Esta estratégia, denominada pelos autores de WE_FP (*Waiting Strategy based on Fastest Paths*), garante a factibilidade temporal de toda a rota.

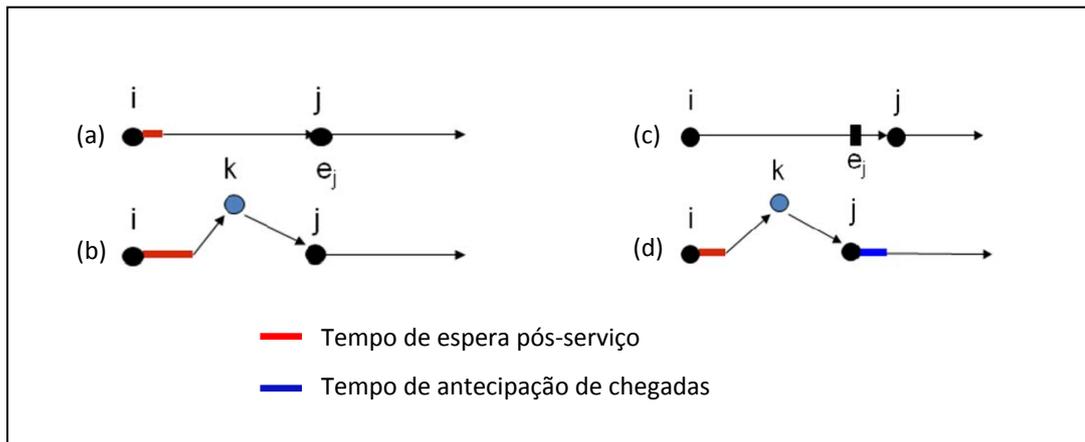


FIGURA 5.2: Estratégia WE_FP - (a) Chegada em j via viagem direta $i-j$ em $t=e_j$ (início da janela de tempo de j), e (b) uso do tempo extra do caminho mais rápido $i-k-j$ para extensão do tempo de espera em i ; (c) chegada em j via viagem direta $i-j$ depois de $t=e_j$, e (d) uso do tempo extra do caminho mais rápido $i-k-j$ para antecipação da chegada em j em $t=e_j$, e extensão do tempo de espera em i .

A estratégia WE_FP foi incorporada a um módulo de despacho para planejamento dinâmico de rotas (algoritmo WEF), cujos principais passos são apresentados na Figura 5.3. Pedidos que chegam ao sistema até $t=0$ são planejados em conjunto no início do dia. Ao longo do dia, sempre que *um serviço é completado* ou *uma nova requisição chega ao sistema* (eventos), a porção das rotas planejadas e ainda não realizadas é desconstruída e reconstruída com a nova informação. As rotas são construídas por meio de uma heurística de inserção, descrita na Seção 5.1.1.

1. **Inicialização:** Faça $t=0$ (hora do relógio) e $\mathbf{PP} = \emptyset$ (conjunto de pedidos planejados).
2. Enquanto $t \leq l_0$ (limitante superior da janela de tempo do depósito):
 - 2.1. Faça t =instante de ocorrência do próximo evento da lista e r =número de rotas na solução corrente.
 - 2.2. Se $t=0$ e $r=0$, o evento corresponde à chegada de um ou mais pedidos. Vá para o Passo 2.6 e construa uma solução S com o(s) novo(s) pedido(s).
 - 2.3. Caso contrário, se $t > 0$ e $r > 0$, faça $S_0=S$ (armazene a solução corrente), e avalie o status de cada localidade da solução S como se segue:
 - a) *Permanentemente designadas a uma rota e posição na rota:* localidades que já foram servidas, ou que estão sendo servidas, ou que são o próximo destino de um veículo em rota.
 - b) *Permanentemente designadas a uma rota:* localidades de entrega que não satisfazem o caso (a), e cujas localidades de coleta satisfazem o caso (a). Tais localidades de entrega precisam ser mantidas na rota atual, mas podem ter alteradas suas posições no seqüenciamento de visitas. Outras localidades podem ser classificadas como designadas a uma rota caso sejam necessárias para manutenção da factibilidade temporal.
 - c) *Não permanentemente designadas:* localidades que não satisfazem os casos (a) e (b).
 - 2.4. Faça \mathbf{P} =conjunto de localidades não permanentemente designadas. Atualize a solução corrente S de forma que ela seja composta apenas por localidades designadas, ou seja, removendo as localidades em \mathbf{P} ($S = S - \mathbf{P}$). Faça $r = |S|$.
 - 2.5. Se o evento é chegada de um novo pedido p , faça $\mathbf{P} = \mathbf{P} + \{p\}$.
 - 2.6. **Planejamento de rotas:** Construa rotas com os pedidos em \mathbf{P} , utilizando a heurística de inserção descrita na Figura 5.4. Se $r > 0$, pedidos em \mathbf{P} podem tanto ser servidos em novas rotas, como em rotas correntes. Neste último caso, as inserções se iniciam a partir da última localização cuja posição no seqüenciamento de visitas não pode ser alterada. Faça S =conjunto de rotas resultante.
 - 2.7. Se algum pedido $p_f \in \mathbf{PP}$ (conjunto de pedidos planejados) não tiver sido inserido em S , faça $S = S_0$ (recupere a solução anterior), e fixe p_f em sua posição e rota. Faça $\mathbf{P} = \mathbf{P} - p_f$ e retorne ao Passo 2.3.
 - 2.8. Se o evento é a chegada de um novo pedido p e este foi satisfatoriamente inserido, aceite o pedido de serviço e insira p no conjunto \mathbf{PP} de pedidos planejados ($\mathbf{PP} = \mathbf{PP} + \{p\}$). Caso contrário, rejeite o pedido.

FIGURA 5.3: Passos do algoritmo WEF - módulo de despacho.

O Passo 2.7 do algoritmo garante que pedidos planejados e removidos durante a desconstrução da solução (Passo 2.4) pertençam à solução resultante. A cada execução da heurística de inserção, apenas pedidos novos podem ser excluídos do planejamento.

5.1.1 A heurística de inserção em WEF

A heurística de inserção no Passo 2.6 da Figura 5.3 é baseada na heurística *i* proposta em Solomon (1987) para o PRVJT. As decisões fundamentais do método consistem na seleção de pedidos para inicialização de rotas, e o critério de seleção dos demais pedidos e suas posições nas rotas. Os passos da heurística são descritos na Figura 5.4.

1. **Inicialização:** Seja \mathbf{P} o conjunto total de pedidos a serem inseridos na solução corrente S , cada qual caracterizado pelas localidades de coleta (p_i^+) e entrega (p_i^-). Seja \mathbf{I} o conjunto de pedidos inseridos, e \mathbf{NI} o conjunto de pedidos não inseridos. Faça $\mathbf{NI}=\mathbf{P}$ e $\mathbf{I}=\emptyset$.
2. Se $r = 0$ ou não houver posições factíveis para inserção dos pedidos em \mathbf{NI} nas rotas correntes:
 - 2.1 Selecione como pedido semente (p_s), aquele cujo atendimento a partir do depósito não resulte em janelas de tempo violadas, e cuja localidade de coleta tenha o menor limitante superior de janela de tempo (pedido de maior urgência). Caso nenhum pedido possa iniciar a rota, vá para o Passo 6.
 - 2.2 Faça $r = r + 1$ e insira o pedido em r , definindo a programação segundo a estratégia de espera de veículos WE_FP. Faça $\mathbf{I} = \mathbf{I} \cup p_s$ e $\mathbf{NI} = \mathbf{NI} - p_s$.
3. Para cada pedido p em \mathbf{NI} , obtenha a posição de inserção de p_i^+ e a posição de inserção de p_i^- que proporcionam o menor acréscimo de custo à solução, respeitando restrições de precedência (p_i^+ deve ser visitado antes de p_i^-), capacidade do veículo, e janelas de tempo. Caso sejam verificados caminhos mais rápidos entre p_i^+ , p_i^- e as demais localidades conhecidas, adote estes caminhos e atualize a programação das rotas.
4. Se no passo anterior tiver sido obtida pelo menos uma posição factível de inserção para pelo menos um pedido, selecione e insira o pedido p^* na rota (e posição associada) com menor custo. Faça $\mathbf{I} = \mathbf{I} \cup p^*$ e $\mathbf{NI} = \mathbf{NI} - p^*$. Seja S a solução resultante.
5. Vá para o Passo 3 se $\mathbf{NI} \neq \emptyset$ e houver posições factíveis de inserção dos pedidos em \mathbf{NI} nas rotas correntes. Caso contrário, se $\mathbf{NI} \neq \emptyset$ e não houver posições factíveis de inserção, vá para o Passo 2.1.
6. Retorne a solução S ao programa principal.

FIGURA 5.4: Passos da heurística de inserção no algoritmo WEF.

No Passo 3 da heurística, o cálculo do custo de inserção em uma determinada posição é dado pela somatória de dois custos com igual ponderação. O 1º custo é o aumento em *distância* com a inserção p_i^+ e p_i^- , enquanto o 2º custo é o aumento no *tempo de início do serviço* na 1ª localidade planejada que sucede p_i^+ .

5.2 Adequação do algoritmo WEF para resolução do problema da empresa

Esta seção descreve as principais modificações aplicadas ao algoritmo WEF para tratamento do problema de manutenção de equipamentos da empresa, e os resultados computacionais obtidos com tal extensão. Como será visto na Seção 5.3, além da adaptação do algoritmo WEF, foram elaborados três outros algoritmos com vistas a comparações de desempenho.

As alterações mais significativas em WEF foram a de habilitá-lo a resolver o PRV dinâmico a cada período de um dado horizonte de planejamento. Como o prazo desejado de atendimento de um pedido abrange mais de um dia, o módulo de despacho deve ser acionado não uma, mas um número de vezes correspondente ao tamanho do horizonte de planejamento. Pedidos que chegam ao sistema até $t=0$ são planejados em conjunto no início deste horizonte (dia 1, $t=0$). Pedidos conhecidos e não servidos em um dado dia estão disponíveis para inserção em $t=0$ no(s) dia(s) subsequente(s). Além disso, conforme discutido na Seção 5.4, a falta de janelas de tempo nos clientes implica que a estratégia de espera de veículos se restringe à antecipação de chegadas. Ou seja, a estratégia adotada é, na prática, DF (*drive-first*).

Cabe enfatizar que o PRV dinâmico aqui tratado considera como objetivo principal o aumento do nível de serviço (tempo decorrido entre a colocação do pedido e o início de seu atendimento) fornecido aos clientes. Além disso, é também almejada a utilização do menor número de veículos e rotas com menor distância total possível. Note que esta hierarquização de objetivos está alinhada com o que foi considerado no trabalho de Pureza e Laporte (2008). Ainda que o algoritmo proposto naquele trabalho vise à redução do número de pedidos não atendidos, entende-se que tal objetivo se reflete no nível de serviço computado.

5.2.1 Adequação da heurística de inserção

A fim de tratar o PRV dinâmico, as seguintes modificações foram realizadas:

- A heurística original é endereçada ao PDCEJT, de forma que cada pedido é caracterizado por duas localidades (p_i^+ , p_i^-). Por simplicidade de implementação, tal caracterização foi mantida. Entretanto, p^- é uma cópia de p^+ (a distância entre p^+ e p^-

é 0) e novos pedidos são sempre inseridos seguindo-se a localidades de entrega. Este procedimento força que p^+ e p^- de qualquer pedido sejam visitadas imediatamente em seqüência.

- A localidade semente de cada rota é aquela com menor prazo desejado de atendimento.

Esta heurística de inserção é aqui denominada SOL, como referência à heurística de Solomon (1987).

O algoritmo resultante destas alterações foi denominado DINÂMICO. A partir deste, foram elaborados 3 outros algoritmos com a finalidade de comparação do desempenho, e cujas diferenças são discutidas a seguir.

5.3 Algoritmos estáticos

a) ESTÁTICO_NN

Este algoritmo visa reproduzir tanto quanto possível, a maneira como a empresa planeja suas rotas para manutenção de equipamentos. O problema é tratado de forma estática; pedidos que chegam ao sistema após $t=0$ são considerados para roteamento somente no dia posterior. Para os pedidos existentes em $t=0$, o roteamento é feito uma única vez, e a estratégia de espera de veículos adotada é DF (*drive-first*). Por simplicidade, o zoneamento da região para divisão de clientes entre veículos não foi realizado. Observe que sem esta decomposição do problema, a qualidade das rotas geradas tende a ser melhor.

A heurística de inserção SOL descrita na seção anterior foi também substituída por uma adaptação da heurística do vizinho mais próximo (NN). Especificamente:

- A cada inserção, é selecionado o pedido com menor distância da localidade anterior da seqüência (cliente ou depósito).
- Caso hajam pedidos cujo tempo restante para prazo de atendimento desejado seja inferior à metade de um dia de trabalho, o critério anterior é desconsiderado e o pedido é selecionado. Se houverem mais pedidos nesta situação, a escolha dentre estes é feita de forma aleatória.

Deve ser ressaltado que o planejamento de rotas neste algoritmo faz uso de caminhos mais rápidos. É razoável admitir que os técnicos conheçam estas alternativas de percurso mesmo que de forma aproximada, e que as utilizem no seu dia a dia.

b) ESTÁTICO_SOL

Este algoritmo é uma versão de ESTÁTICO_NN onde a heurística de inserção NN é substituída pela heurística SOL. O objetivo da criação desta versão é o de verificar o impacto do uso deste método de roteamento mais sofisticado na qualidade das soluções.

c) rESTÁTICO

Este algoritmo é uma versão semi-estática de DINÂMICO. Apesar dos pedidos que chegam ao sistema após $t=0$ serem considerados para roteamento somente no dia seguinte, as rotas planejadas são desconstruídas e reconstruídas a cada fim de serviço. Isso permite a reavaliação de decisões tomadas em estágios anteriores, podendo trazer reduções na distância total percorrida, alterar o tamanho da frota, ou incluir pedidos conhecidos cuja inserção não tenha ocorrido. Assim como nos algoritmos anteriores, a estratégia de espera de veículos adotada é DF.

5.4 Experimentos Computacionais

Os algoritmos descritos na seção anterior foram implementados em Borland Delphi 7 e os experimentos realizados em um computador Intel Core2 2,4 GHz, e 2,00 GB de RAM. O horizonte de planejamento considerado em todos os experimentos é igual a 3 dias.

Instâncias dinâmicas foram geradas a partir de exemplos clássicos do PRVJT de 100 nós propostos em Solomon (1987) (<http://www2.imm.dtu.dk/~jla/solomon.html>).

Especificamente, foram considerados os conjuntos RC1 e RC2 (cada qual com 8 instâncias), uma vez que estes apresentam características de distribuição geográfica de nós similares aos dos clientes da empresa, ou seja, uma distribuição aleatória/agrupada. As janelas de tempo no conjunto RC1 são estreitas, permitindo poucos clientes por rota e relativamente largas no conjunto RC2. As instâncias dinâmicas geradas a partir dos conjuntos estáticos RC1 e RC2 definem os conjuntos dinâmicos denominados RCD1 e RCD2, respectivamente.

Exceto pelas coordenadas geográficas dos nós, os dados originais das instâncias estáticas foram extensamente modificados para a geração das instâncias dinâmicas. Os limitantes inferior e_o e superior l_o da janela de tempo do depósito foram fixados em 0 e 540 minutos, respectivamente. Note que desta forma, a duração da janela do depósito $l_o - e_o$ (tempo máximo de rota) é igual a 540 minutos, correspondentes às 9 horas da operação do setor estudado da empresa (8:00 às 17:00 hs). Em função dessa alteração, os limitantes inferior e_s e superior l_s das janelas de tempo originais dos clientes foram recalculados segundo os seguintes passos:

$$\delta = l_s - e_s$$

$$l_s = l_o$$

$$e_s = \max\{0, l_s - \delta - U(0, l_s)\}$$

Na expressão acima, $U(p,q)$ é um número inteiro aleatoriamente gerado entre p e q segundo uma distribuição uniforme. Na prática, os pedidos não possuem janelas de tempo e esta adequação só é necessária porque e_s é utilizado para determinar o instante de chegada de pedidos dinâmicos ao sistema.

Seja a_s o instante mais cedo que um veículo pode atender um pedido dinâmico s sem a utilização de caminhos mais rápidos. Isso significa que o veículo deixa o depósito no início da jornada de trabalho. O tempo de chegada t_s do pedido s ao sistema é calculado pela fórmula:

$$t_s = \min\{e_s, \max\{U(1,5), l_s - a_s - \beta\}\}.$$

A geração de um número inteiro entre 1 e 5 com a função $U(1,5)$ força o tempo de chegada de cada pedido dinâmico ser maior ou igual a 0. O parâmetro exógeno não negativo β é usado para fornecer algum tempo de reação após o pedido ter sido feito. O gerador utilizou $\beta = 0, 50, 100, 200, 400$, o que significa que para cada instância, no máximo cinco instâncias distintas podem ser obtidas. Note que como as janelas de tempo de RC1 são mais estreitas do que as do conjunto RC2, os tempos de chegada de pedidos de RCD1 tendem a ser mais

próximos do fim da jornada de trabalho do que os de RCD2. Em outras palavras, espera-se que o RCD1 apresente maiores dificuldades de atendimento de pedidos.

O número de pedidos que chegam após $t=0$ (grau de dinamismo) a cada dia é igual a 20. Este valor corresponde ao número médio de novos pedidos diários informado pela empresa. Como o horizonte adotado é de 3 dias, definiu-se que no 1º dia, 20 pedidos sejam estáticos e 20 pedidos sejam dinâmicos, totalizando 40 pedidos. A seleção de pedidos estáticos e aleatórios no conjunto total de pedidos é feita de forma aleatória. Em cada dia subsequente (dias 2 e 3), outros 20 pedidos dinâmicos chegam ao sistema. Em outras palavras, 80 dos 100 pedidos da instância original são selecionados para construir uma instância dinâmica.

Os tempos de serviço em cada pedido foram gerados segundo a seguinte distribuição, fornecida pela empresa (Tabela 5.1):

TABELA 5.1: Distribuição de pedidos por faixa de tempo de serviço.

Faixa de tempo de serviço (em minutos)	% de Pedidos
0-10	12,5
11-20	24,3
21-30	20,8
31-40	13,0
41-50	6,6
51-60	3,6
61-70	2,5
71-80	2,3
81-90	1,6
91-100	1,2
101-110	1,3
111-120	1,7
>120	8,7

Note, por exemplo, que 12,5% das atividades realizadas pelos técnicos têm uma duração de até 10 minutos (Faixa 1). O gerador selecionou uma faixa para cada pedido segundo esta distribuição, seguindo-se à geração aleatória do tempo de serviço na faixa associada. Para a última faixa, atribuiu-se como tempo de serviço exatos 125 minutos, uma vez que pedidos com tempos de serviço muito superiores a este valor são incomuns na prática da empresa.

Com o intuito de gerar tempos de viagem aleatórios, arcos entre cada duas localidades foram classificados aleatoriamente dentre três categorias de velocidade, apresentadas na Tabela 5.2.

TABELA 5.2: Matriz de velocidades de categorias de arcos.

	Categoria de arco		
	1	2	3
Velocidade	0,12	0,67	1,33

O gerador produziu 40 instâncias dinâmicas distintas para cada um dos conjuntos RCD1 e RCD2.

5.5 Resultados

Dois cenários foram considerados para a realização dos experimentos. No primeiro cenário (FI), assumiu-se que o tamanho da frota seja ilimitado. No segundo cenário (FL), o tamanho da frota é limitado igual ao utilizado na empresa, ou seja, quatro veículos.

Nos experimentos, o desempenho dos quatro algoritmos descritos no Capítulo 5 foi medido em termos de: (i) número de pedidos com prazo de atendimento violado, (ii) número de veículos utilizados, (iii) distância total percorrida, (iv) número de pedidos atendidos, e (v) nível médio de serviço. Para cada instância, o nível médio de serviço é calculado somando-se os tempos decorridos entre a colocação de cada pedido servido até o 3º dia de planejamento e o início de seu atendimento, e dividindo-se este valor pelo número de pedidos servidos. Ressalta-se que este intervalo de tempo inclui, quando pertinente, o período em que as atividades de prestação de serviço não estão em operação, ou seja, entre 17:00 e 8:00 hs.

As Tabelas 5.3 e 5.4 apresentam os resultados agregados (acumulados) para as instâncias de RCD1 sob os cenários FI e FL. Para as instâncias de RCD2, os resultados associados são apresentados nas Tabelas 5.5 e 5.6. A segunda coluna de cada tabela (Nº de atendimentos violados) indica o número de pedidos não atendidos ao final do 3º dia que tiveram ultrapassado seu prazo de início do serviço. Estes pedidos necessariamente chegaram ao sistema no 1º dia. Observe que a quantidade de pedidos não atendidos, mas que não tiveram seu nível de serviço violado pode ser obtido subtraindo-se do número total de pedidos do conjunto (3200), o número total de pedidos atendidos e o número total de atendimentos violados. Os tempos de CPU acumulados (em segundos) são também apresentados, porém sua relevância é pequena por estes serem curtos no tocante a aplicações práticas.

TABELA 5.3: Resultados agregados para instâncias RCD1– cenário FI.

ALGORITMO	Nº DE ATENDIMENTOS VIOLADOS	Nº DE VEÍCULOS UTILIZADOS	DISTÂNCIA TOTAL	Nº DE PEDIDOS ATENDIDOS	% DE PEDIDOS ATENDIDOS	NÍVEL MÉDIO DE SERVIÇO	CPU (s)
ESTÁTICO_NN	17	539	86301,3	2489	77,8	39191,9	9,1
ESTÁTICO_SOL	5	579	95026,3	2541	79,4	37063,4	8,8
rESTÁTICO	0	590	89218,6	2556	79,9	34275,3	186,6
DINÂMICO	1	824	121452,8	3078	96,2	10270,1	230,0

TABELA 5.4: Resultados agregados para instâncias RCD1– cenário FL (nº de veículos=4).

ALGORITMO	Nº DE ATENDIMENTOS VIOLADOS	Nº DE VEÍCULOS UTILIZADOS	DISTÂNCIA TOTAL	Nº DE PEDIDOS ATENDIDOS	% DE PEDIDOS ATENDIDOS	NÍVEL MÉDIO DE SERVIÇO	CPU (s)
ESTÁTICO_NN	20	468	79718,5	2423	75,7	41843,1	8,9
ESTÁTICO_SOL	7	476	88714,8	2467	77,1	40600,6	8,3
rESTÁTICO	3	476	86099,5	2509	78,4	37224,5	208,8
DINÂMICO	1	480	97532,7	2899	90,6	23557,5	223,0

Para RCD1 sob os cenários FI e FL, os resultados indicam que a mera utilização de uma heurística mais poderosa no planejamento estático de ESTÁTICO_SOL reduz o número de atendimentos violados em até 70,5% e aumenta o número de pedidos atendidos em até 2,1% em relação a ESTÁTICO_NN. Como resultado, a melhoria em termos de nível médio de serviço atingiu até 8,3%. Tal impacto se traduz em um incremento do número de veículos utilizados e distância total de até 7,4% e 11,3%, respectivamente.

Os ganhos com a redução do número de atendimentos violados, e nível de médio de serviço, são ainda maiores ao se aplicar o replanejamento de rotas a cada fim de serviço (algoritmo rESTÁTICO). Note, entretanto, que o incremento de pedidos atendidos em relação a ESTÁTICO_SOL ocorre de forma marginal (0,6% e 1,7% para FI e FL, respectivamente). Deve-se ressaltar que como resultado da reotimização das rotas, a distância total percorrida para os dois cenários é em média 4,5% menor em relação a obtida com ESTÁTICO_SOL.

Finalmente, o tratamento totalmente dinâmico fornecido pelo algoritmo DINÂMICO produz vantagens particularmente evidentes. O número de pedidos atendidos e nível de serviço aumenta em relação a rESTÁTICO em até 20,4% e 70% respectivamente. Como resultado, a distância percorrida apresenta um aumento médio de 24,7% para os dois cenários. Note que para o cenário mais restrito (FL), e diferentemente do observado para a grande maioria dos demais algoritmos, todos os quatro veículos foram utilizados a cada dia para todas as instâncias. Isso indica que este recurso foi totalmente aproveitado na prestação de

serviço. Note, entretanto, que para uma instância de RDC1 sob o cenário FI, DINÂMICO produziu um pedido com atendimento violado a mais que rESTÁTICO.

Para RCD2, os resultados são similares (veja Tabelas 5.5 e 5.6). Como esperado, o desempenho de todos os algoritmos são superiores ao observado com o conjunto RCD1. Note que sob o cenário FL, o algoritmo ESTÁTICO_SOL apresenta uma deterioração de 1,5% no nível de serviço em relação a ESTÁTICO_NN, por sua vez, pelo menos parcialmente compensada com o aumento de 0,7% no número de pedidos atendidos.

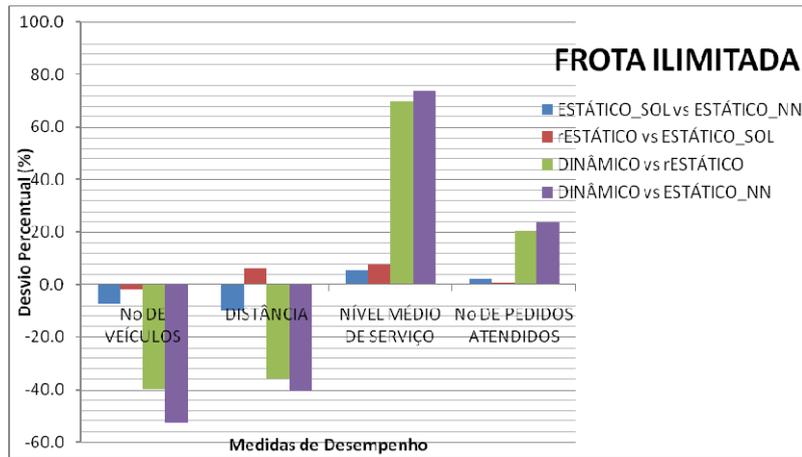
TABELA 5.5: Resultados agregados para instâncias RCD2 – cenário FI.

ALGORITMO	Nº DE ATENDIMENTOS VIOLADOS	Nº DE VEÍCULOS UTILIZADOS	DISTÂNCIA TOTAL	Nº DE PEDIDOS ATENDIDOS	% DE PEDIDOS ATENDIDOS	NÍVEL MÉDIO DE SERVIÇO	CPU (s)
ESTÁTICO_NN	8	571	91695,7	2811	87,8	22848,5	11,0
ESTÁTICO_SOL	0	631	105122,2	2874	89,8	20678,0	9,3
rESTÁTICO	0	635	98380,5	2884	90,1	19271,4	267,7
DINÂMICO	0	758	115717,1	3171	99,1	8220,3	221,7

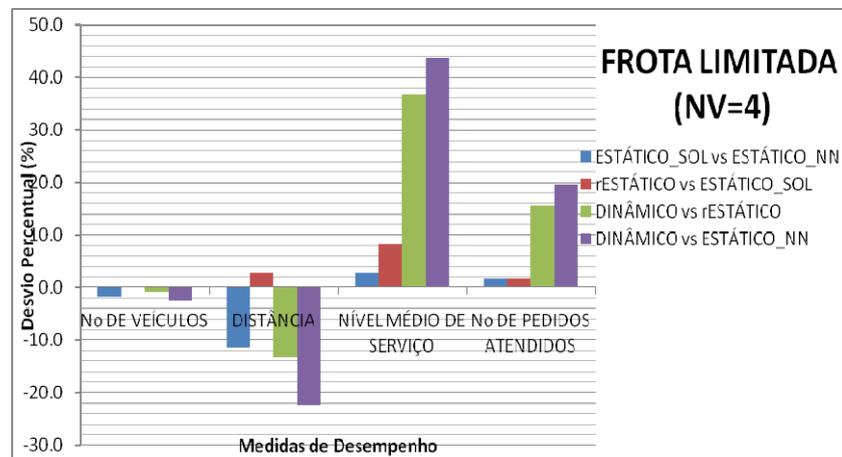
TABELA 5.6: Resultados agregados para instâncias RCD2– cenário FL (nº de veículos=4).

ALGORITMO	Nº DE ATENDIMENTOS VIOLADOS	Nº DE VEÍCULOS UTILIZADOS	DISTÂNCIA TOTAL	Nº DE PEDIDOS ATENDIDOS	% DE PEDIDOS ATENDIDOS	NÍVEL MÉDIO DE SERVIÇO	CPU (s)
ESTÁTICO_NN	15	475	82541,6	2728	85,3	29479,8	9,7
ESTÁTICO_SOL	5	478	92295,4	2746	85,8	29930,3	9,8
rESTÁTICO	5	480	89151,8	2808	87,8	27812,1	271,1
DINÂMICO	1	480	96599,7	3029	94,7	21144,2	226,3

Os resultados de algumas das medidas de desempenho utilizadas são apresentados nas Figuras 5.5 e 5.6, desta vez em termos de desvios percentuais entre algoritmos. Especificamente, são comparados ESTÁTICO_SOL e ESTÁTICO_NN, rESTÁTICO e ESTÁTICO_SOL, DINÂMICO e rESTÁTICO, e DINÂMICO e ESTÁTICO_NN. Valores positivos no gráfico indicam ganhos em relação à medida associada do primeiro algoritmo de cada par.

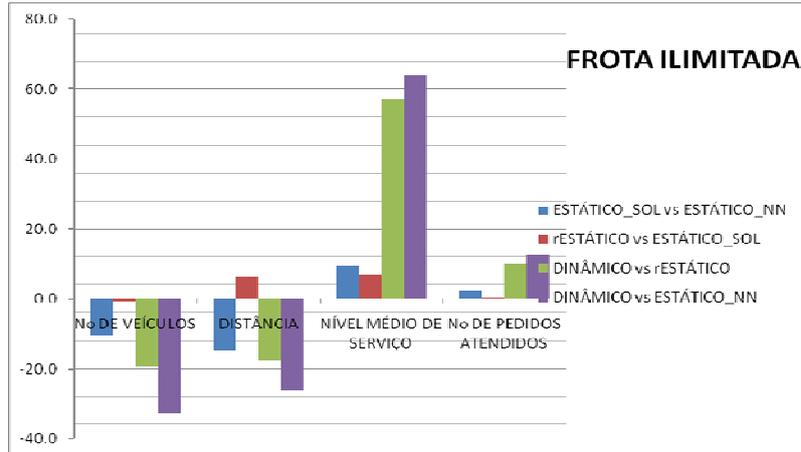


(a)

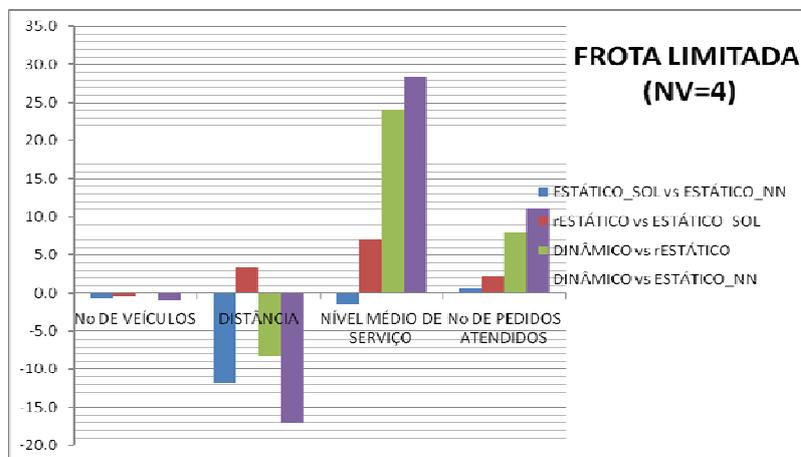


(b)

FIGURA 5.5: Desempenho relativo dos algoritmos com conjunto RCD1: (a) cenário FI, (b) cenário FL.



(a)



(b)

FIGURA 5.6: Desempenho relativo dos algoritmos com conjunto RCD2: (a) (a) cenário FI, (b) cenário FL.

O objetivo destes gráficos é o de ilustrar as vantagens e desvantagens da aplicação de diferentes tratamentos ao problema conforme estes tratamentos crescem em sofisticação. Note em particular, que em termos de nível de serviço, as diferenças entre DINÂMICO e rESTÁTICO, e DINÂMICO e ESTÁTICO_NN são relativamente pequenas. Isso sugere que os maiores benefícios no tocante a este critério são obtidas não com a utilização de heurísticas de inserção poderosas e reotimização diária de rotas, mas com o tratamento totalmente dinâmico do problema.

Finalmente, cabe mencionar que foram realizados experimentos adicionais com outros dois conjuntos de instâncias, similares a RCD1 e RCD2, onde o número de pedidos estáticos no 1º dia é apenas dois (cada instância compreende 62 pedidos). O objetivo foi o de verificar se o desempenho notadamente superior de DINÂMICO com RCD1 e RCD2 é devido ao fato do grande número de pedidos conhecidos em $t=0$ no 1º dia estressar o planejamento dos

algoritmos estáticos nos dias posteriores. Os resultados indicaram que o padrão de desempenho se mantém ou melhora; em termos de nível de serviço, por exemplo, as ganhos obtidos por este algoritmo em relação ao rESTÁTICO variaram entre 52,9% e 72,5%.

CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE PESQUISA

Neste trabalho, foi investigado o impacto da utilização do planejamento dinâmico de rotas em um horizonte de planejamento. A partir do algoritmo WEF de Pureza e Laporte (2008) para o PCEDJT, foi elaborado um algoritmo com base nas características do ambiente de operação de uma empresa de produção e distribuição de bebidas, cujo planejamento de rotas para manutenção de equipamentos é atualmente feito de forma manual e estática.

Resultados obtidos com instâncias geradas com base em algumas características dos clientes da empresa indicam as vantagens do tratamento dinâmico. Em relação ao número de clientes atendidos e ao nível de serviço, ganhos relativos a um algoritmo que procura simular a prática da empresa atingiram cerca de 25% e 70%, respectivamente. O aumento no número de rotas (entre 1% e 53%) e distância total percorrida (entre 17% e 41%), por sua vez, são consistentes com a melhoria das medidas anteriores.

Desta forma, conclui-se que a melhoria no nível de serviço com a aplicação de roteamento dinâmico pode alcançar porcentagens bastante significativas. Empresas que prestam serviços em ambientes com características dinâmicas se beneficiaram desta prática. Em se tratando de mercados competitivos, como é o caso da empresa estudada, isso traria um diferencial razoável em relação aos competidores. Note que se as instâncias utilizadas neste estudo representassem exemplos reais da empresa, seria possível reduzir o prazo máximo de atendimento praticado de 48 horas para cerca de 10 horas no cenário mais restrito.

Como perspectivas de pesquisa futura, cabe observar que o algoritmo proposto não considera o roteamento por área do prestador de serviço. Esta observação pode se desdobrar em duas diferentes ações. Por um lado, ela permite que a atual prática de zoneamento seja reavaliada pela empresa. Por outro lado, caso esta divisão se faça necessária por outros fatores (por exemplo, relações desenvolvidas entre o funcionário e o cliente), a metodologia proposta pode e deve ser modificada para incluir esta restrição. Outra limitação do algoritmo proposto é que ele não endereça o balanceamento de serviço entre os veículos. De fato, a própria essência do roteamento dinâmico apresenta dificuldades para sua implementação, de forma que *trade-offs* entre o balanceamento e o nível de serviço precisarão ser considerados.

Finalmente, cabe notar que o algoritmo proposto se restringe a uma heurística de construção de rotas e, portanto, não utiliza fases de otimização de rotas nos intervalos entre chegadas de pedidos. Procedimentos de busca local ou meta-heurísticas são opções que

trariam melhorias adicionais. Outra linha de pesquisa interessante é a análise do uso de desvios com os veículos em rota, excluindo-se assim, a política de compromisso.

Adicionalmente, o problema poderia ser submetido a uma abordagem multiperódica. Neste caso, para o conjunto de pedidos conhecidos em $t=0$ do 1º dia, uma decisão adicional do planejamento consistiria em definir o dia em que cada pedido seria servido, considerando-se os prazos de atendimento. Como o problema é dinâmico, o horizonte de tomada desta decisão deve ser de curto prazo, sujeito a reavaliações diárias. A perspectiva é obter rotas que contemplem clientes próximos entre si e, portanto, mais flexíveis para a inserção de novos pedidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ASSAD, A.A. Modeling and implementation issues in vehicle routing. In: GOLDEN, B.L.; ASSAD, A.A. (Ed.). **Vehicle routing: methods and studies**. North Holland, Amsterdam, 1988. p.7-46.

BAGCHI, P.K.; NAG, B.N. Dynamic vehicle scheduling: an expert systems approach. **International Journal of Physical Distribution and Logistics Management**, v.21, p.10-18, 1991.

BENYAHIA, I.; POTVIN, J.-Y. Decision support for vehicle dispatching using genetic programming. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics: Part A: Systems and Humans**, v.28, n.3, p.306-314, 1998.

BELL, W. *et al.* Improving the distribution of industrial gases with an on-line computerized routing and scheduling optimizer. **Interfaces**, v.13, p.4-23, 1983.

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

BERTSIMAS, D. J.; RYZIN, G. V. A stochastic and dynamic vehicle routing problem in the euclidean plane. **Operations Research**, v.39, p.601-614, 1991.

BERTSIMAS, D. J.; RYZIN, G. V. A stochastic and dynamic vehicle routing in the euclidean plane with multiple capacitated vehicle. **Operations Research**, v.41, p.60-76, 1993.

BERTSIMAS, D. J.; SIMCHI-LEVI, D. **The new generation of vehicle routing research: robust algorithms, addressing uncertainty**. Cambridge, Massachusetts: MIT, 1993. Working paper.

BODIN, L.D. *et al.* Routing and scheduling of vehicle and crews, the state of the art. **Computers and Operational Research**, v.10, p. 63-211, 1983.

BOWERSOX, D. J.; COOPER, M. B. **Strategic marketing channel management**. New York: McGraw-Hill, 1992.

BOWERSOX, D. J.; CLOSS, D. J. **Logistical management**: the integrated supply chain process. New York: McGraw-Hill, 1996.

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

CASTRO, N. **Intermodalidade, intramodalidade e o transporte de longa distância no Brasil**. Rio de Janeiro: IPEA; Planejamento e Políticas Públicas, 1993.

CHRISTOPHER, M. **Logistics and supply chain management**. Londres: Pitman, 1992.

CHRISTOPHIDES, N.; BEASLEY, J. The period routing problem. **Networks**, v.14, p.237-256, 1984.

CRAINIC, T.G. ; DEJAX, P. ; GENDREAU, M. Modeling the containr fleet management problem using a stochastic programming approach. **Operational Research** , v.18, p.473-486, 1991.

DANTZIG, G.; RAMSER, J. The truck dispatching problem. **Manegement Science**. v.6, p.81-91, 1959.

DROR, M.; POWELL, W.B. Special issue on stochastic and dynamic models in transportation. **Operations Research**, v. 41, p.1-235, 1993.

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

FISHER, M.L.; JORNSTEEN, K.O.; MADSEN, O.B.G. Vehicle routing with time windows: two optimization algorithms. **Operations Research**, v.45, n.3, p.488-492, 1997.

FLEISCHMANN, B.; GNUTZMANN, S.; SANDVOB, E. Dynamic vehicle routing based on online traffic information. **Transportation Science**, v.38, n.4, p.420-433, 2004.

GENDREAU, M.; LAPORTE, G.; SEMET, F. **Solving an ambulance location model by tabu search**. Montreal: Center de Recherche sur les Transports ; Université de Montréal, 1997. Techinal Report CRT-97-18.

GENDREAU, M. *et al.* **Neighborhood search heuristics for a dynamic vehicle dispatching problem with pick-ups and deliveries.** Montreal: Center de Recherche sur les Transports ; Université de Montréal, 1998. Technical Report CRT-98-10.

GENDREAU, M. *et al.* Parallel tabu search for real-time vehicle routing and dispatching. **Transportation Science**, v.33, p.381-390, 1999.

GENDREAU, M. *et al.* Neighborhood search heuristics for a dynamic vehicle dispatching problem with pick-ups and deliveries. **Transportation Research: Part C**: v.14, n.3, p.157-174, 2006.

GHIANI, G. *et al.* Real-time vehicle routing: solution concepts, algorithms and parallel computing strategies. **European Journal of Operational Research**, v.151, n.1, p.1-11, 2003.

GOLDEN, B.; MAGNANTI, T.; NGUYEN, H. Implementing vehicle routing algorithms. **Networks**, v.7, p.113-148, 1977.

HALL, R.W.; PARTYKA, J.G. On the road to efficiency. **OR/MS Today**, p. 38-47, jun., 1997.

HVATTUM, L. M.; LOKKETANGEN, A.; LAPORTE, G. Solving a dynamic and stochastic vehicle routing problem with a sample scenario hedging heuristic. **Transportation Science**, v.40, n.4, p.421-438, 2006.

JONKER, R.; VOLGENANT, A. A shortest augmenting path algorithm for dense and sparse linear assignment problems. **Computing**, v.38, p.325-340, 1987.

KILBY, P.; PROSSER, P.; SHAW, P. **Dynamic VRPs: a study of scenarios.** University of Strathclyde, 1998. Technical Report APES-06-1998.

LAPORTE, G. *et al.* Classical and modern heuristics for the vehicle routing problem. **International Transactions in Operational Research**, v.7, p. 285-300, 2000.

LARSEN, A. **The dynamic vehicle routing.** 2000. Phd. Thesis - Department of Mathematical Modelling (IMM), Technical University of Denmark (DTU), Denmark, 2000.

LARSEN, A.; MADSEN, O.B.G.; SOLOMON, M.M. Partially dynamic vehicle routing: models and algorithms. **Journal of the Operational Research Society**, v.53, p.637-646, 2002.

LORENZI, D.F. **Uma abordagem híbrida baseada em regras de despacho e busca tabu para o problema de roteamento de veículos com coletas e entregas.** 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2003.

LUND, K.; MADSEN, O.B.G.; RYGAARD, J.M. **Vehicle routing problems with varying degrees of dynamism.** Lyngby, Copenhagen: Institute of Mathematical Modeling, Technical University of Denmark, 1996. Technical Report.

MIN, H. The multiple vehicle routing problem with simultaneous delivery and pickup points. **Transportation Research**, v.23 A, p.337-386, 1989.

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

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

MONTEMANNI, R. *et al.* A new algorithm for a dynamic vehicle routing problem based on ant colony system. Proceedings of ODYSSEUS. Palermo, Italy, 2003. p.26-31.

PSARAFTIS, H.N. A dynamic programming solution to the single vehicle many-to-many immediate request dial-a-ride problem. **Transportation Science**, v.14, p.130-154, 1980.

PSARAFTIS, H.N. *et al.* **Analysis and solution algorithms of searift routing and scheduling problems:** final report. Cambridge, Massachusetts: Sloan School of Management; MIT, 1985. Working Paper n° 1700-85.

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

PSARAFTIS, H. N. Dynamic vehicle routing: status and prospects. **Annals of Operations Research**, v.61, p.143-164, 1995.

POTVIN, J-Y.; SHEN, Y.; ROUSSEAU, J-M. Neural networks for automated vehicle dispatching. **Computers & Operations Research**, v.19, p. 267-276, 1992.

PUREZA, V.; LAPORTE, G. Waiting and buffering strategies for the dynamic pickup and delivery problem with time windows. Em fase de publicação em **Information Systems and Operational Research**, 2008.

RONEN, D. Perspectives on practical aspects of truck routing and scheduling. **European Journal of Operational Research**, v.35, n.2, p.137-145, 1988.

SAVELSBERGH, M.W.P.; SOL, M. The general pickup and delivery problem. **Transportation Research**, v.29, p.17-29, 1995.

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

TAILLARD, E. D. Parallel iterative search methods for vehicle-routing problems. **Networks**, v.23, n.8, p.661-673, 1994.

TAILLARD, E.D. *et al.* A tabu search for the vehicle routing problem with soft time windows. **Transportation Science**, v.31, p.170-186, 1997.

TOTH, P.; VIGO, D. **The vehicle routing problem**. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2002. (SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Applications).

GLOSSÁRIO (Termos técnicos, siglas e palavras da língua inglesa)

CSCMP	<i>Council of Supply Chain Management Professionals</i> – Conselho de Profissionais da Administração da Cadeia de Suprimentos.
DARP	<i>Dial-a-Ride Problem</i> .
DEM	Departamento de Equipamentos de Mercado da Companhia de Bebidas Ipiranga.
DF	<i>Drive First</i> – Estratégia de espera de veículos “Dirigir primeiro” (partida para a próxima localidade tão logo o serviço seja finalizado na localidade atual).
DTRP	<i>Dynamic Traveling Repairman Problem</i> – Problema do Técnico de Manutenção Viajante Dinâmico.
<i>E-com</i>	Documento que registra o atendimento do cliente.
EDI	<i>Electronic Data Interchange</i> - Troca Eletrônica de Dados.
FCFS	<i>First Come First Served</i> – Política de despacho de veículos “Primeiro (pedido) a chegar, primeiro a ser atendido”.
FI	Conjuntos de instâncias com tamanho de frota ilimitado.
FL	Conjuntos de instâncias com tamanho de frota limitado.
GERP	Nº de registro de um equipamento de disponibilização de produtos da Companhia de Bebidas Ipiranga.
GIS	<i>Geographic Information Systems</i> - Sistemas de Informação Geográfica.

GPS	<i>Global Positioning Systems</i> - Sistemas de Posicionamento Global.
ICT	<i>Information and Communications Technologies</i> Tecnologias de Informação e Comunicação.
IVHS	<i>Intelligent Vehicle – Highway Systems</i> - Sistemas de Transporte Inteligente.
MORSS	<i>MIT Ocean Routing and Scheduling System.</i>
MSC	<i>Military Sealift Command.</i>
NN	<i>Nearest Neighbor</i> – Heurística do Vizinho mais Próximo.
Notes	Sistema de notificação de emails.
PART	<i>Partition Policy</i> – Política de despacho de veículos FCFS aplicada sequencialmente a áreas resultantes da partição da região de atendimento.
PCE	Problema de Coleta e Entrega.
PDCEJT	Problema Dinâmico de Coleta e Entrega com Janelas de Tempo.
PGCE	Problema Geral de Coleta e Entrega.
PIB	Produto Interno Bruto.
PRV	Problema de Roteamento de Veículos.
PRVJT	Problema de Roteamento de Veículos com Janelas de Tempo.

<i>Roadshow Route Planner</i> TM	Sistema de planejamento de rotas de distribuição.
SAP	Sistema de gestão empresarial.
SFC	<i>Space Filling Curve</i> – Política de despacho de veículos que realiza os atendimentos seguindo uma curva em torno da região de atendimento, e em direção ao seu centro no sentido horário.
SQM	<i>Stochastic Queue Median</i> – Política de despacho de veículos FCFS que prescreve o retorno do veículo à mediana da região de atendimento assim que o serviço é finalizado.
STWE	<i>Standard Algorithm With Waiting Strategy WE</i> – Algoritmo com estratégia de espera WE, proposto em Pureza e Laporte (2008) para o problema dinâmico de coleta e entrega.
TSP	<i>Traveling Salesman Problem</i> – Problema do Caixeiro Viajante.
WE	Estratégia de espera de veículos que prescreve a chegada na próxima localidade no início de sua janela de tempo.
WEF	<i>STWE With Waiting Strategy WE_FP</i> – Algoritmo com estratégia de espera WE_FP, proposto em Pureza e Laporte (2008) para o problema dinâmico de coleta e entrega.
WE_FP	<i>Waiting Strategy based on Fastest Paths</i> – Estratégia de espera de veículos WE com o uso de caminhos mais rápidos entre localidades.
WF	<i>Wait First</i> – Estratégia de espera de veículos “Esperar Primeiro” (chegada na próxima localidade no fim de sua janela de tempo).