

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**UMA NOVA ABORDAGEM PARA O PROBLEMA DE
ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS COM RESTRIÇÕES
OPERACIONAIS**

GLADSTON LUIZ DA SILVA

ORIENTADORA: ADELAIDA PALLAVICINI FONSECA

TESE DE DOUTORADO EM TRANSPORTES

PUBLICAÇÃO: TDM - 012A/2010

BRASÍLIA/DF: 03 DE SETEMBRO DE 2010

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**UMA NOVA ABORDAGEM PARA O PROBLEMA DE
ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS COM RESTRIÇÕES
OPERACIONAIS**

Gladston Luiz da Silva

**Tese submetida ao Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da
Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília como parte dos
requisitos necessários para a obtenção de grau de Doutor em Transportes**

Aprovada por:

Prof^ª Adelaida Pallavicini Fonseca, D.Sc. (UnB/DF)
(orientadora)

Prof. Ricardo Oliveira de Souza, D.Sc. (UnB/DF)
(examinador interno)

Prof. Alexandre Ricardo Soares Romariz, Ph.D. (UnB/DF)
(examinador interno)

Prof. Giovanni Manso Ávila, D.Sc. (UFRJ/RJ)
(examinador externo)

Prof. Paulo Henrique Siqueira, D.Sc. (UFPR/PR)
(examinador externo)

Brasília/DF, 03 de setembro de 2010.

FICHA CATALOGRÁFICA

SILVA, GLADSTON LUIZ DA

Uma nova abordagem para o Problema de Roteirização de Veículos com Restrições Operacionais [Distrito Federal] 2010.

xiv, 92 p, 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Transportes, 2010).

Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- | | |
|--|---|
| 1. Roteirização | 2. Programação de Veículos com Janelas de Tempo |
| 3. Problemas de Designação | 4. Mapas Auto-Organizáveis |
| 5. Algoritmo de Etiquetamento Permanente | |

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, G. L. (2010) Uma nova abordagem para o Problema de Roteirização de Veículos com Restrições Operacionais. Tese de Doutorado em Transportes, Publicação TDM-012A/2010, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF 92 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Gladston Luiz da Silva

TÍTULO: Uma nova abordagem para o Problema de Roteirização de Veículos com Restrições Operacionais.

GRAU: Doutor

ANO: 2010.

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa tese de doutorado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Gladston Luiz da Silva

Endereço: Rua 05 Norte, Lote 01, Residencial Shangrila, Águas Claras, Taguatinga

CEP 71.907-720, Brasília, DF, Brasil

gladston.ls@gmail.com

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a algumas pessoas de minha família as quais tenho amor, respeito e admiração.

Ao meu avô Tatão (*in memorian*).

Aos meus pais Auxiliadora e Virgílio (*in memorian*).

Aos meus tios Nélia e Cyro.

Aos meus filhos Isabela e ao Adriano.

À Melissa, meu amor.

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, Adelaida Pallavicini Fonseca, pelo exemplo ético e humano, pela orientação, pelo apoio e confiança a mim dedicados durante todo o período do Doutorado.

Aos professores e amigos Celso Chiarini, Reynaldo Arcírio, Sérgio Ronaldo Granemann e Carlos Henrique Marques da Rocha, com os quais pude conviver e aprender. Agradeço o apoio e recomendações quando do processo de seleção para o Doutorado, assim como pelo apoio que recebi durante todo o período do Doutorado.

Ao professor Alexandre Romariz pelo apoio e orientação nos estudos das Redes Neurais.

Aos professores Giovani Manso Ávila, Paulo Henrique Siqueira e Ricardo Oliveira de Souza pelas orientações no Exame de Qualificação e por aceitarem participar de minha Banca Examinadora.

Ao Ticiano Augusto Callai Bragatto e ao Gabriel Irribarem Soares Ruas pelo apoio dado no entendimento do ambiente Matlab.

Aos funcionários e professores da Universidade de Brasília que contribuíram com seu trabalho e apoio administrativo.

RESUMO

UMA NOVA ABORDAGEM PARA O PROBLEMA DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS COM RESTRIÇÕES OPERACIONAIS

Esta tese trata do problema de roteirização de veículos com restrições operacionais relacionadas a janelas de tempo e duração da máxima da jornada para frotas homogêneas de veículos, cujo objetivo é a determinação de um conjunto de roteiros que atendam aos clientes relacionados, respeitadas as restrições colocadas.

A estratégia de solução proposta é baseada no uso do mapa Auto-Organizável de Kohonen para a determinação de agrupamentos de clientes, associada à heurística alternativa ao Algoritmo do Etiquetamento Permanente para a definição da programação dos veículos.

Os testes computacionais da estratégia proposta foram realizados no ambiente *Matlab* em problemas-teste usados como *benchmarking* na literatura.

ABSTRACT

A NEW APPROACH TO THE VEHICLE ROUTING PROBLEMS WITH OPERATIONAL CONSTRAINTS

This thesis deals with addresses the vehicle routing problem with operational constraints related to time windows and the maximum duration of the journey to homogeneous fleet of vehicles, whose goal is to determine a set of scripts that meet the clients listed.

The proposed solution strategy is based on using Self-Organizing Map for the determination of groups of customers, coupled with an alternative heuristic to the Permanent Labeling Algorithm for defining the lineup of vehicles.

Computational tests of the proposed strategy were conducted in Matlab using benchmarking problems of literature.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	1
1.1. RELEVÂNCIA DOS PROBLEMAS DE ROTEIRIZAÇÃO	1
1.2. OBJETIVO DO TRABALHO	5
1.3. METODOLOGIA	5
1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	6
O ESTADO DA ARTE DOS PROBLEMAS DE ROTEIRIZAÇÃO	7
2.1. O PROBLEMA DE ROTEIRIZAÇÃO E PROGRAMAÇÃO DE VEÍCULOS	7
2.2. MÉTODOS EXATOS	12
2.3. MÉTODOS HEURÍSTICOS	13
2.4. METAHEURÍSTICAS	14
CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA DE ROTEIRIZAÇÃO E PROGRAMAÇÃO DE VEÍCULOS	21
3.1. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS	21
3.2. O PROBLEMA DA ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS COM JANELAS DE TEMPO ...	24
3.3. DESCRIÇÃO MATEMÁTICA DO PRPJT	25
3.3.1. Variáveis de Decisão	26
3.3.2. Função Objetivo	27
3.3.3. Restrições	27
3.4. O PROBLEMA DO TRANSPORTE EXPRESSO	29
3.5. O PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE ATENDIMENTOS DE COLETAS EXPRESSAS	31
3.6. ROTEIRIZADORES	32
3.6.1. Atributos de um software de roteirização	33
3.6.2. Roteirizadores disponíveis e tendência do mercado	37
ESTRATÉGIA PROPOSTA PARA A SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE ROTEIRIZAÇÃO E PROGRAMAÇÃO DE VEÍCULOS	40
4. A ESTRATÉGIA DE SOLUÇÃO PROPOSTA PARA A SOLUÇÃO DO PRPJT	40
4.1. DESCRIÇÃO DAS INSTÂNCIAS DE SOLOMON	41
4.2. O MAPA AUTO-ORGANIZÁVEL DE KOHONEN	44
4.2.1. A Matriz de Distância Unificada: U-matriz	48
4.2.2. Designação dos clientes aos clusters utilizando o mapa Auto-Organizável	50
4.3. O ALGORITMO DE ETIQUETAMENTO PERMANENTE	53
4.3.1. Caminho de dominação de etiquetas	54
4.4. A ESTRATÉGIA DE SOLUÇÃO PROPOSTA: SOM E HEURÍSTICA ALTERNATIVA DO AEP PARA A SOLUÇÃO DO PRPJT	56
TESTES COMPUTACIONAIS PARA A ESTRATÉGIA PROPOSTA	58
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	69
BIBLIOGRAFIA	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Principais características de sistemas para roteirização de veículos	34
Tabela 3.2: Recursos, restrições e condicionantes de um roteirizador	35
Tabela 3.3: Funções objetivo, Relatórios, Sistemas de Informação Geográfica (SIG), Tecnologias Integradas ao Roteirizador, Outras Características de um Roteirizador	36
Tabela 3.4: Dados gerais sobre as empresas e seus roteirizadores	38
Tabela 3.5: Características dos softwares de roteirização	39
Tabela 4.1: Problemas-teste das instâncias de SOLOMON	41
Tabela 4.2: Registros do Problema-teste C101 de SOLOMON (1987)	42
Tabela 4.3: Medidas utilizadas para representar a qualidade do SOM	47
Tabela 5.1: Resultados da estratégia proposta nos problemas-teste relacionados.....	59
Tabela 5.2: Análise de Variância de resultados apresentados em problemas-teste.....	60
Tabela 5.3: Resultados em 30 dos conjuntos de dados de SOMOLON	63

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Programação de veículos por meio de computador	33
Figura 4.1: Coordenadas e Janelas de Tempo na Instância C104	43
Figura 4.2: Coordenadas e Janelas de Tempo na Instância R206	44
Figura 4.3: Representação das topologias utilizadas para representação de uma Rede de Kohonen: Quadrada (A), Hexagonal (B) e Aleatória (C).....	45
Figura 4.4: Representação agrupamentos de Mapas Auto-Organizáveis por meio da U-matriz	48
Figura 4.5: Amostras de Sucesso do Mapa Auto-Organizável.....	49
Figura 4.6: Posições dos Neurônios do Mapa Auto-Organizável	50
Figura 4.7: Pseudocódigo para o mapa Auto-Organizável de Kohonen	53
Figura 4.8: Pseudocódigo para a heurística alternativa proposta	57
Figura 5.1: Soluções factíveis encontradas para as instâncias C104, R103, R201 e RC202.....	61
Figura 5.2: Resultados factíveis para as instâncias C104 e C204	64
Figura 5.3: Representação gráfica das instâncias C202, C203, C204 e C207.....	65
Figura 5.4: Representação gráfica das instâncias R103 e R201 com as respectivas soluções factíveis	66
Figura 5.5: Representação gráfica das instâncias RC101 e RC201 com as respectivas soluções factíveis	68

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

- ACS - *Ant Colony Systems*
- AEP - Algoritmo de Etiquetamento Permanente
- AIS - *Artificial Immune Systems*
- APHAC - Algoritmo Paralelo Hierárquico e Adaptativo com Competição Justa
- B&B - *Branch-and-Bound*
- CAN - *Cooperative Adaptive Network*
- CASPRP - *Closed-loop Adaptive Shortest Path Routing Problem*
- CEP - Código de Endereçamento Postal
- DYNASMART - *DYNAMIC Network Assignment Simulation Model for Advanced Road Telematics*
- EA - *Evolutionary Algorithms*
- ECS - *Evolutionary Clustering Search*
- ERP - Sistemas de informações que integram todos os dados e processos de uma organização (*Enterprise Resource Planning*)
- GPS - Sistema de posicionamento global (*global-positioning-system*)
- GRC - Grey Relational Coefficient
- HTA – *Heuristic Tabu Algorithm*
- NP-difíceis ou NP-completos
- PAAC-E - Problema de Alocação de Atendimentos de Coletas Expressas
- PCMJT - Problema de Caminho Mínimo com Janela de Tempo
- PRPJT - Problema de Roteirização e Programação de Veículos com Janelas de Tempo
- PRPV – Problema de roteirização e programação de veículos
- PRV - Problema de Roteamento de Veículos
- PRV com *Backhauls* - Problema de roteamento de veículos com coleta e entrega
- PRVC - Problema de roteamento de veículos capacitados
- PRVMD - Problema de Roteamento de Veículos com Múltiplos Depósitos
- PRVP - Problema de roteamento de veículos periódico
- RNRW - Rede Neural Recorrente de Wang
- SA - *Simulated Annealing*
- SIG - Sistemas de informações geográficas
- SOM - *Self-Organizing Map*
- Split Delivery* VRP - Problema de roteamento de veículos com entregas particionadas
- SRPV – Sistemas de Roteirização e Programação de Veículos
- TPH - Treinamento Populacional em Heurísticas
- U-matriz – Matriz de Ultsch
- VRPTW - *Vehicle Routing Problem Time Windows*
- WTA - *Winner Takes All*

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1. RELEVÂNCIA DOS PROBLEMAS DE ROTEIRIZAÇÃO

O interesse e a demanda pela aplicação de modelos de roteirização para problemas reais têm crescido muito nos últimos anos. ASSAD (1988) considera que a roteirização de veículos consiste em uma das histórias de grande sucesso da Pesquisa Operacional nas últimas décadas.

Para CUNHA (1997) a relevância dos problemas de roteirização e programação de veículos pode ser medida pelo expressivo número de artigos publicados na literatura especializada, além da permanente busca de novas estratégias e métodos de solução para a resolução de modelos cada vez mais complexos e abrangentes.

Vários modelos de roteirização foram desenvolvidos ao longo do tempo, a partir do trabalho pioneiro de CLARKE e WRIGHT (1963), assim como diversos *softwares* de roteirização (HALL e PARTYKA, 2000). Alguns dos softwares disponibilizados no mercado não atendem às necessidades das empresas usuárias devido às especificidades de seus clientes e às suas próprias políticas de distribuição. Identificar inadequações do software após tê-lo adquirido resulta em prejuízos consideráveis (NOVAES, 2001), tanto de recursos financeiros, como humanos, sem considerar as expectativas criadas que não são atendidas.

Para CUNHA (2000), as heurísticas contidas nos *softwares* produzem soluções que correspondem a algum tipo de sub-otimização, procurando, prioritariamente, minimizar a frota e, em seguida, a distância total percorrida. Tal fato decorre porque as heurísticas clássicas se baseiam em medidas de distâncias ou tempos de viagem mantendo muitos parâmetros constantes, tais como velocidade de operação, custos do veículo, fluxo de

tráfego, dentre outros. Entretanto, não consideram outros itens de relevância prática que incidem nos custos de operação, dentre os quais se incluem:

- os custos variáveis em função da distância percorrida e os custos horários da tripulação (horas extras);
- os custos de fretes de terceiros, particularmente nas operações de coleta e distribuição urbanas, que nem sempre são calculados com base na distância percorrida, já que são pagos segundo a quantidade total transportada (peso, volume, número de caixas etc.), e em grandes cidades os valores de fretes são calculados por região ou área a ser atendida;
- o arranjo das cargas dentro do veículo, o que pode ser decisivo para a otimização da distribuição.

CUNHA (2000) considera, ainda, que os *softwares* de roteirização devem se tornar ferramentas integradas aos diversos sistemas e bancos de dados das empresas, dentre os quais cita: os de pedidos, cadastro de clientes e faturamento, ou mesmo ferramentas do tipo ERP – *Enterprise Resource Planning (planejamento de recursos empresariais)*. Argumenta, também, que os *softwares* de roteirização devem se integrar aos sistemas de rastreamento de veículos com o uso de GPS, o que possibilitará alteração dinâmica e em tempo real de roteiros, de forma a atender novas solicitações, além de promoverem uma retro-alimentação dos dados das viagens realizadas, permitindo o ajuste e o aprimoramento das bases de dados de tempos de viagem e distâncias.

BODIN (1990) observa que criar e manter um Sistema de Informações Geográficas (SIG) pode implicar em aumento no custo de um sistema de roteirização e programação de veículos. A manutenção e a atualização de uma base de dados de informações viárias georeferenciadas são fatores críticos, principalmente em grandes centros urbanos, nos quais são observadas mudanças frequentes de direção e de restrições à circulação de veículos.

No caso do Brasil, a realidade aponta para a falta sistemática de recursos para manter os mapas digitais atualizados da malha viária, mesmo para as capitais e cidades mais importantes. Ademais, nas cidades onde tais bases estão disponíveis, nem sempre abrangem toda a malha viária e as informações de mãos de direção, de movimentos permitidos e proibidos, e de velocidades e tempos de viagem não são suficientemente acuradas (FONSECA, 2002). Tal fato faz encarecer, ainda mais, os custos de aquisição dos

softwares de roteirização, já que as empresas usuárias têm que custear o levantamento dessas informações para elaborar os planos de roteirização o mais realisticamente possível. Esse problema, somado à falta de interatividade e ambiente amigável desses *softwares*, faz com que estes não sejam atrativos para muitas empresas, principalmente, para as de pequeno e médio porte.

De acordo com CUNHA (2000), as bases geográficas utilizadas nos sistemas de roteirização armazenam um único valor de tempo de viagem ou velocidade em cada trecho da malha, que independe do horário do dia, o que é uma fragilidade óbvia. Em regiões urbanas mais congestionadas a consideração da variação das velocidades médias ou tempos de viagem segundo o horário do dia é determinante para o sucesso da roteirização, principalmente quando restrições temporais como janelas de tempo estão envolvidas.

FONSECA *et al.* (2004) abordam o Problema de Alocação de Atendimentos de Coletas Expressas (PAAC-E), através de uma heurística de inserção baseada na adaptação de um sistema de coordenadas a cada um dos cinco primeiros dígitos do Código de Endereçamento Postal brasileiro (CEP), como base de informação geográfica. Esta abordagem permite a alocação de atendimentos de coleta dinâmicos, isto é, de atendimento de novas coletas que vão surgindo ao longo do dia, após os veículos terem saído da estação operacional, além de tratar os atendimentos de coleta e entrega conhecidos previamente à saída dos veículos.

Segundo FONSECA *et al.* (2004), o serviço de entrega expressa atende a três tipos básicos de clientes:

- Regular: cliente com contrato de longo prazo e perfil de demanda regular e bem definido, que permite a programação antecipada de dia e horário para coleta;
- Frequente: cliente com contrato de longo prazo e perfil de demanda constante, porém com alguma variabilidade de dia e horário, não viabilizando a programação de coletas;
- Ocasional: cliente esporádico e ocasional, com perfil de demanda variável, ou seja, com horário e local imprevisíveis. Essa categoria é composta principalmente por pessoas físicas.

Devido à dificuldade de criação e de manutenção de bases de dados geográficos, assim como à falta de agilidade dos mesmos para acompanharem a velocidade de processamento dos programas computacionais no que se refere às operações de alocação dinâmica de

novos atendimentos aos roteiros em andamento, as empresas têm optado por trabalhar com roteiros fixos, para os quais são destacados *couriers* com experiência em sua área de operação, prescindindo do uso de programas computacionais para a construção de novos roteiros a cada dia.

O universo da roteirização de veículos envolve um conjunto muito grande de diferentes tipos de problemas, alguns de natureza mais tática ou estratégica, outros de natureza operacional. A abordagem proposta por FONSECA (2002) baseia-se em premissas de natureza mais operacional sendo, dessa forma, um problema de roteamento com único objetivo, onde os conjuntos de rotas e de regiões compartilhadas são previamente definidos.

Como exemplos de problemas de natureza mais estratégica podem ser citados problemas integrados de localização e roteirização; problemas integrados de estoque e roteirização, nos quais a programação dos atendimentos considera os aspectos espaciais, e custos de roteiros, assim como as questões relacionadas ao nível de estoque; os problemas de faturamento e roteirização; os problemas de roteamento com múltiplos objetivos, considerando a natureza da demanda determinística; dentre outros.

Este trabalho surge da motivação por estudar esse tema e da intenção em apresentar proposta alternativa de solução para problemas de roteirização e programação de veículos, dada a crescente importância dessa questão para a sociedade, que pode ser explicada como decorrentes dos seguintes fatores (CUNHA, 1991):

- aumento do número de entregas e sua dispersão geográfica;
- restrições de acesso, circulação, estacionamento, carga e descarga de veículos nas áreas mais centrais das grandes cidades;
- desenvolvimento tecnológico da informática e sua redução de preços, concomitante ao fim da reserva de mercado no Brasil.

O uso de Redes Neurais como parte integrante da estratégia proposta neste trabalho, decorre da capacidade de aplicação em problemas reais que essa área do conhecimento tem apresentado, em particular em problemas de transporte relacionados à roteirização de veículos.

1.2. OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo deste trabalho é verificar a validade da estratégia proposta para a solução de problemas de roteirização e programação de veículos com janelas de tempo, decorrente da aplicação da Rede de Kohonen, ou mapa Auto-Organizável, associada ao uso de heurística alternativa ao Algoritmo de Etiquetamento Permanente.

1.3. METODOLOGIA

Este trabalho tem início com uma revisão bibliográfica, cujo objetivo é apresentar o estado-da-arte das estratégias de solução dos problemas de roteirização e programação de veículos, assim como os produtos disponibilizados no mercado, com a descrição de suas características e dos atributos necessários para um sistema de roteirização.

Em seguida é apresentada a estratégia para a resolução de problemas de roteirização e programação de veículos com janelas de tempo, considerando os seguintes aspectos:

- a frota de veículos definida é homogênea;
- cada veículo executa uma rota;
- os pontos de atendimento são visitados apenas uma vez por cada veículo;
- as janelas de tempo para atendimento de coleta são rígidas e invioláveis, definidas pelo cliente dentro dos limites de cada serviço;
- os veículos partem e retornam de uma mesma estação operacional quando alcançarem o limite de capacidade de carga.

Os testes para avaliação da solução proposta foram realizados com a implementação do algoritmo no ambiente *Matlab* e testada em problemas-teste usados como *benchmarking* na literatura, apresentados por SOLOMON (1987).

1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O desenvolvimento deste projeto considera, inicialmente, uma revisão bibliográfica, apresentada no Capítulo 2, cujo objetivo é apresentar o estado-da-arte das estratégias de solução dos problemas de roteirização e programação de veículos, assim como apresentar aspectos de diferenciação e classificação desses problemas.

O Capítulo 3 compreende a caracterização do problema do transporte expresso, considerando estratégias e métodos de solução para problemas de roteirização e programação de veículos para problemas com janelas de tempo. Em seguida, é apresentada uma análise dos produtos disponibilizados no mercado, com a descrição de suas características e dos atributos necessários para um sistema de roteirização.

No Capítulo 4 é apresentada a estratégia alternativa para a solução do problema de roteirização e programação de veículos com janelas de tempo, baseada no mapa Auto-Organizável de Kohonen associado à heurística alternativa ao Algoritmo de Etiquetamento Permanente.

No Capítulo 5 são apresentados os testes para avaliação da solução proposta, realizados no ambiente *Matlab*, utilizando problemas-teste apresentados por SOLOMON (1987).

Por fim, o Capítulo 6 apresenta as considerações finais, conclusões e recomendações.

CAPÍTULO II

O ESTADO DA ARTE DOS PROBLEMAS DE ROTEIRIZAÇÃO

2.1. O PROBLEMA DE ROTEIRIZAÇÃO E PROGRAMAÇÃO DE VEÍCULOS

Segundo BODIN *et al.* (1983), roteirização é o sequenciamento de pontos coleta e/ou de entrega que um veículo deve percorrer ordenadamente, iniciando e terminando em um depósito ou domicílio, enquanto programação de veículo é a inserção de condicionantes de tempos de parada e de chegada no sequenciamento descrito.

Para CUNHA (1997), trata-se de um problema de transporte proveniente da pesquisa operacional, que pode possuir funções objetivo para reduzir o tempo, a distância percorrida ou o custo total do trajeto, cujas condicionantes podem envolver os tempos despendidos no atendimento em cada ponto, tais como os tempos de espera para ser atendido, os tempos de carga e de descarga, o tempo do acerto financeiro da entrega, o tempo de liberação etc., assim como o tempo do trajeto entre pontos consecutivos. Paradas para almoço ou máxima jornada de trabalho são eventos (ou restrições) que também podem ser considerados.

CUNHA (2000) define roteirização de veículos como o termo utilizado para designar o processo de determinação de um ou mais roteiros ou sequências de paradas a serem cumpridas por veículos de uma frota, com o objetivo de visitar um conjunto de pontos geograficamente dispersos, em locais pré-determinados, que necessitam de atendimento.

Para LAPORTE *et al.* (2000), o problema de roteirização consiste em definir roteiros de veículos que minimizem o custo total de atendimento, cada um dos quais iniciando e terminando no depósito ou base de veículos, assegurando que cada ponto seja visitado exatamente uma vez e a demanda em qualquer rota não exceda a capacidade do veículo que a atende.

HALL e PARTYKA (2000) dizem que a roteirização é definida por decisões, objetivos e restrições. Tomar decisões significa atribuir um grupo de clientes a um grupo de motoristas

e veículos, com as respectivas sequências e programações de visitas. Os objetivos expressam o nível de serviço que se deseja fornecer ao cliente, considerando o tempo em que se mantêm os investimentos e custos operacionais tão baixos quanto possível, enquanto as restrições representam as limitações de recursos e de tempo impostos pelos horários de trabalho dos motoristas, pela velocidade no trajeto e compromissos assumidos com os clientes.

Em artigos e em publicações técnicas escritas em língua inglesa, o termo *routing* (ou *routeing*) se refere à definição de um ou mais caminhos, sequências ou itinerários a serem cumpridos por veículos de uma frota, passando por locais pré-determinados que necessitem de atendimento. Tais locais podem ser pontos específicos, caracterizados com nós de uma rede, ou segmentos de vias, usualmente denominados como arcos ou ligações (*links*).

Segundo FERREIRA (1982), o termo roteiro possui vários significados: (i) descrição pormenorizada de uma viagem; (ii) itinerário; (iii) descrição escrita dos pontos que se devem conhecer para realizar uma viagem marítima. O significado do termo rota denota caminho, direção, rumo. Para o autor, *roteirizar* significa escrever o roteiro no sentido de texto, com base no argumento das cenas, sequências, diálogos e indicações técnicas de um filme, enquanto o verbo *rotear* tem o sentido de dirigir ou conduzir uma embarcação.

Alguns autores, dentre os quais NOVAES e ALVARENGA (1994), utilizam o termo *roteirização* como o equivalente em português a *routing*. BECHARA e GALVÃO (1984), CUNHA (1991) e GOUVÊA (1992) adotaram o termo *roteamento*.

CUNHA (1997) apresenta que os termos roteirização (ou roteamento) e programação seriam expressões equivalentes às expressões em inglês *routing* (ou *routeing*) e *scheduling*, haja vista que o termo *routing* (ou *routeing*) refere-se à definição de um ou mais caminhos, sequências ou itinerários a serem cumpridos por veículos de uma frota, passando por locais pré-determinados. O termo *scheduling* refere-se à definição de aspectos temporais (horários de saída, de chegada a cada cliente e de retorno à base) de um ou mais roteiros, no contexto da operação de veículos.

Neste sentido, como os termos *roteirização* e *roteamento*, assim como o verbo *roteirizar*, são conhecidos e utilizados corretamente nas áreas de pesquisa operacional, logística, transportes e distribuição física, com o sentido de caminho, itinerário, sequência de

entregas, e não existe termo mais preciso ou apropriado a esse significado na língua portuguesa, optou-se pelo uso de ambos, indistintamente neste trabalho.

RONEN (1988) argumenta que no processo de roteirização vários aspectos devem ser considerados, desde a tomada de decisões táticas e estratégicas, determinantes para o número de veículos, para o desempenho das equipes e para a programação de cargas e descargas, à introdução de modelos estatísticos para a determinação da demanda e, por conseguinte, dos custos de estoque. Considera, ainda, alguns aspectos práticos da roteirização, tais como: o uso de restrições flexíveis, que podem ser violadas de modo gradativo, a variabilidade da demanda, funções objetivo múltiplas, assim como a qualidade, precisão e atualização dos dados de entrada.

Os modelos de roteirização têm a função de determinar a melhor rota para coleta, entrega ou visitas para atendimento de solicitações de serviços e de definir os pontos de parada em cada roteiro de um dado veículo. Adicionalmente, podem servir de subsídio à determinação do número de veículos envolvidos e suas capacidades num processo de roteirização (BALLOU, 1993), de forma a reduzir os custos de transporte e o tempo de atendimento aos clientes.

Segundo DASKIN (1985) as principais abordagens adotadas nos processos de roteirização são: técnicas de definição do caminho ótimo, cobertura de vias e cobertura de nós. Na primeira abordagem procura-se encontrar a rota ótima, conhecidos a origem e o destino das paradas, obedecendo a diversas restrições e tentando minimizar distâncias percorridas e custos. Na segunda abordagem, mais conhecida como o problema do Carteiro Chinês, tenta-se obter o caminho mínimo, tal que todas as vias sejam percorridas pelo menos uma vez. Por fim, a terceira abordagem, chamada de problema do Caixeiro Viajante, consiste em partir de um dado ponto (geralmente a base), visitar cada um dos pontos da rede de transporte ao menos uma vez, retornando em seguida ao ponto de partida.

Vários trabalhos e autores analisam o problema do sequenciamento dos pontos (roteirização) para distribuição ou coleta de mercadorias e para visitas de prestação de serviços em diversos setores da economia. A título de exemplo, pode-se citar os trabalhos de BODIN *et al.* (1983), DEJAX e HAOUARI (1991), que trazem uma tipologia dos problemas de roteirização e realizam um panorama dos diversos modelos propostos pelos

pesquisadores. Por outro lado, uma apresentação geral dos métodos baseados em processos heurísticos pode ser encontrada em LAPORTE (1992) e LAPORTE (1993).

Outros autores desenvolveram pesquisas para solucionar problemas de roteirização de veículos utilizando variantes ou adaptações das abordagens do caminho ótimo, do Carteiro Chinês e do Caixeiro Viajante. Dentre esses trabalhos, pode-se citar WITUCKI, DEJAX e TOUATI (1994), que estruturaram um sistema de apoio à decisão para resolver o problema da roteirização de veículos para uma empresa de distribuição de produtos alimentícios congelados, definindo a metodologia nos planos estratégico, tático e operacional.

Da mesma forma, SOUZA e BRINATI (1999) propuseram uma modelagem para resolução do problema de coleta e entrega de cargas, com janelas de tempo, em empresa de transporte rodoviário intermunicipal. Já GALVÃO *et al.* (1997), trabalharam um algoritmo de roteamento integrado a um Sistema de Informação Geográfica para planejar entregas de mercadorias.

A racionalização dos atendimentos programados e emergenciais permite reduzir as distâncias percorridas pelas viaturas que prestam os serviços, permite diminuir os tempos de execução das atividades e permite otimizar a sequência de atendimentos, ocasionando, em consequência, redução de custos e melhoria do nível de serviço aos consumidores, objetivos principais da logística (BALLOU, 1993). Nesta mesma ótica, NOVAES (1989) afirma que o principal problema logístico a ser resolvido associado a redes de transporte é o da roteirização de veículos, nas suas várias modalidades.

SOUZA e NASSI (1995) desenvolveram uma pesquisa com o objetivo de apresentar soluções para o problema de roteamento de um sistema de ônibus fretado com múltiplos objetivos: a minimização do tempo de viagem dos usuários, a minimização da diferença entre o horário de saída do tempo de viagem dos usuários, a minimização da diferença entre o horário de saída de casa no sistema de transporte atual e o horário de saída após a adoção do novo sistema, a minimização da distância percorrida pela frota (custos) e a máxima precisão no horário de chegada.

GRANEMANN e MOREIRA DE SÁ (2000, 2001) realizaram trabalho piloto para roteirização dos atendimentos comerciais de uma concessionária de distribuição de energia elétrica, partindo da metodologia proposta por CLARKE e WRIGHT (1963) e incorporando ao modelo algumas especificidades do serviço do setor elétrico.

HALLAL e PUREZA (2004) propõem uma heurística para a resolução do Problema de Roteamento de Veículos Periódico, utilizando o algoritmo HTA, desenvolvido por PUREZA e FRANÇA (2001), composto de mecanismos de Busca Tabu adaptados aos movimentos de troca e aos movimentos 2-opt. Realizaram testes computacionais envolvendo dez problemas cujos resultados mostraram-se eficazes quando comparados aos obtidos com cinco heurísticas competitivas encontradas na literatura.

SAINT-MLEUX e LANGEVIN (1995), propuseram um modelo de otimização da distribuição de produtos com o auxílio de um sistema de informações geográficas. Além destes, podem ser citados trabalhos como o de JAILLET (1998), que trabalhou num modelo probabilístico para solucionar o problema de roteirização de veículos e o de NOVAES e GRACIOLLI (1999), que desenvolveram modelo de roteirização para otimizar a coleta de produtos, utilizando diversos veículos e diferentes restrições operacionais e aplicando o modelo ao sistema de coleta de lixo urbano.

Diversas estratégias de solução para problemas de roteirização e programação de veículos têm sido apresentadas. Para BODIN (1983) a maioria das estratégias de solução para problemas de roteirização de veículos ocorre da seguinte maneira:

- agrupa e roteiriza (*cluster first – route second*)
- roteiriza e agrupa (*route first – cluster second*)
- economias/inserção
- melhoria/troca
- baseados em programação matemática
- otimização interativa
- procedimentos exatos

LAPORTE (1992) classifica os métodos de solução em dois grupos: algoritmos exatos e heurísticas, enquanto CUNHA (1997) propôs a seguinte classificação para os métodos de solução de problemas de roteirização de veículos:

- métodos exatos – possibilitam a obtenção da solução ótima;
- métodos heurísticos – permitem obter apenas soluções aproximadas, mas, em geral, são obtidas mais rapidamente;
- métodos emergentes – reúnem as técnicas mais recentes e avançadas, não tradicionais, baseadas em sistemas especialistas, ou em métodos de busca ou iterativos, como por exemplo, algoritmos genéticos e busca tabu.

2.2. MÉTODOS EXATOS

PSARAFTIS (1980) utilizou um algoritmo exato de programação dinâmica para o problema do tipo *dial-a-ride* com um único veículo, considerando os casos estáticos e dinâmicos, cuja restrição de tempo máximo de viagem de cada usuário se deu pela diferença entre a ordem de embarque e a de desembarque.

Já DESROSIERS *et al.* (1986a) abordaram o mesmo problema agregando restrições de janela de tempo e utilizando o conceito de etiquetamento bidimensional e critérios para a identificação e eliminação de rotas inviáveis.

Baseado nesse algoritmo, CUNHA (1991) usa estratégia exata de solução com restrição de capacidade e precedência.

BAKER (1982, 1983) publicou dois artigos no qual analisou problemas do caixeiro viajante com restrição adicional de janela de tempo e de roteamento de um veículo, com janela de tempo, sem restrição de capacidade do mesmo. Em ambos, a função objetivo considerava a minimização da duração total do percurso, cujas conclusões indicaram que a relaxação linear das restrições de janela de tempo e de continuidade temporal resultou num problema cujo dual era um problema de caminho mais longo em um grafo direcionado, passando obrigatoriamente por todos os nós. A estratégia de solução adotada considerou o etiquetamento para o problema dual e um algoritmo de enumeração implícita para o controle do processo, denominado *Branch-and-Bound* (B&B).

DESROSIERS *et al.* (1986b) apresentaram comparativamente dois algoritmos B&B para tratar o problema de roteamento e programação de uma frota de veículos homogêneos, com restrição de janela de tempo, mas sem restrição de capacidade dos veículos.

SOLOMON (1986) desenvolveu uma heurística gulosa de inserção, com ordem de complexidade $O(n^2)$ para o problema da árvore com cobertura mínima com janela de tempo, pois a introdução dessa restrição alterou a complexidade computacional do mesmo.

DESROSIERS *et al.* (1989) propuseram o método de geração de colunas como estratégia para problemas de roteamento e programação de veículos com restrições de janela de tempo.

2.3. MÉTODOS HEURÍSTICOS

A palavra heurística (do grego *heuriskein*) significa o ato de descobrir, sendo comumente empregada para expressar o conhecimento empírico usado pelos humanos para tomada de decisão. Segundo OLIVEIRA (2004), o termo heurística está associado ao conhecimento circunstancial, não verificável, nem matematicamente comprovável.

Por definição, um algoritmo é uma sequência finita de instruções bem definidas e não ambíguas, cada uma das quais pode ser executada mecanicamente num período de tempo finito e com uma quantidade de esforço finita.

Em otimização as heurísticas são procedimentos aproximativos, algoritmos de busca capazes de encontrar soluções aproximadas de boa qualidade em tempo computacional razoável.

Os Algoritmos Evolutivos (AE) são considerados heurísticas de busca, ou otimizadores heurísticos, pois se utilizam do conhecimento empírico e também teórico para gerarem soluções ainda melhores, combinando soluções consideradas de boa qualidade.

A heurística de uma teoria deveria particularmente indicar os caminhos e possibilidades a serem aprofundadas na tentativa de torná-la uma teoria progressiva, isto é, capaz de garantir um desenvolvimento empírico, prevendo fatos novos não percebidos no momento da elaboração do núcleo dessa teoria.

GOLDEN *et al.* (1986) descreveram procedimentos heurísticos para a determinação do tamanho e composição ótimos de uma frota heterogênea de veículos de distribuição, baseada em um único depósito, cuja função objetivo minimizada englobava componentes de custo fixo e variável.

STEWART e GOLDEN (1984) apresentaram um procedimento heurístico no qual utilizaram a relaxação Lagrangiana para o problema de roteirização de veículos, modificado dos *m*-caixeiros viajantes, cuja transformação consistiu em mover as restrições relativas à capacidade dos veículos para a função objetivo.

DESROSIERS *et al.* (1988) estudaram o problema de determinação da frota mínima associada a múltiplos caixeiros viajantes com restrições de janela de tempo, considerando

uma frota homogênea, para um único depósito, sem limitações de capacidade de carga, quando utilizaram o método de relação Lagrangiana.

JAW *et al.* (1986) estudaram o problema *dial-a-ride* com frota heterogênea e limite de duração de jornada, no qual consideraram janelas de tempo flexíveis, considerando desvios máximos admissíveis do horário de atendimento.

SOLOMON (1987) analisou o problema de roteirização e programação de uma frota de veículos homogêneos com restrições de janelas de tempo, considerando cinco heurísticas: de economias, de inserção, do roteiro gigante, de intercâmbio e do vizinho mais próximo com orientação temporal.

CUNHA (1991) propôs um algoritmo para o problema do caminho mínimo com janelas de tempo, através de um método de programação dinâmica denominado etiquetamento permanente, proposto por DESROCHERS e SOUMIS (1988), no contexto da geração de colunas.

POTVIN e ROSSUEU (1993) apresentaram uma heurística que constrói roteiros em paralelo para problemas de roteamento com janelas de tempo, com a adoção de medidas de penalidade para os clientes não atendidos para a seleção dos candidatos para inserção.

POTVIN e ROSSEAU (1995) propuseram uma heurística de intercâmbio do tipo 2-ótimo para problemas com janelas de tempo, cujo método preservou a orientação das rotas, unindo os últimos clientes de uma rota com os primeiros clientes de outra rota.

2.4. METAHEURÍSTICAS

Uma metaheurística é um método heurístico para resolver de forma genérica problemas de otimização, normalmente da área de otimização combinatória, geralmente aplicadas a problemas que não se conhece algoritmo eficiente.

Para OLIVEIRA (2004), metaheurística de busca é uma estratégia de alto-nível capaz de guiar outras heurísticas para produzir soluções de qualidade em tempo computacional admissível. Considera que as heurísticas guiadas por tais meta-estratégias podem ser procedimentos completos de busca ou podem apenas encapsular descrições de movimentos

para transformar uma solução candidata em outra. De um modo geral, o estudo das metaheurísticas tem atraído o interesse de pesquisadores devido a seus atributos, dentre os quais:

- são facilmente implementáveis;
- são modulares e facilmente adaptáveis a qualquer tipo de problema, mesmo os mais complexos;
- são métodos de otimização global, mais robustos a ótimos locais;
- necessitam de pouca informação sobre o problema, basicamente, custo ou ganho de cada possível solução;
- podem encontrar soluções aproximadas, de boa qualidade e, até mesmo, ótimas;
- podem otimizar um grande número de parâmetros discretos, contínuos ou combinações deles;
- realizam buscas simultâneas em várias regiões do espaço de busca (paralelismo inerente);
- podem ser adaptados para encontrar várias soluções ótimas;
- podem ser eficientemente combinados com outras heurísticas de busca.

Segundo LOURENÇO (2001) metaheurística é uma estrutura de produção de heurísticas que possuem melhor desempenho no tratamento de problemas de cadeia de suprimentos, quando comparado a métodos de otimização.

Para FISHER (1985), problemas de otimização combinatória podem ser divididos em dois tipos: os *fáceis*, que podem ser resolvidos em tempo limitado por uma função polinomial, da forma $O(n^k)$; e os ditos *difíceis*, cuja ordem de complexidade dos algoritmos exatos cresce exponencialmente, $O(2^n)$, denominados NP-difíceis.

Na teoria da complexidade computacional, a classe de complexidade NP-completo é o subconjunto dos problemas de decisão em NP, de tal modo que todo problema em NP se pode reduzir, com uma redução de tempo polinomial, a um dos problemas NP-completo. Pode-se dizer que os problemas de NP-completo são os problemas mais difíceis de NP e muito provavelmente não formem parte da classe de complexidade P. A razão é que caso fosse possível encontrar uma maneira de resolver qualquer problema NP-completo rapidamente (em tempo polinomial), então poderiam ser utilizados algoritmos para resolver todos os problemas NP rapidamente.

Para problemas considerados difíceis, uma estratégia de solução possível consiste em definir um problema Lagrangiano, cujas restrições complicadas são substituídas por um ou mais termos com penalidades introduzidas na função objetivo, expressando o valor da violação das mesmas por meio de suas respectivas variáveis duais.

HELD e KARP (1970, 1971) formularam um problema Lagrangiano baseado na cobertura mínima para desenvolver um algoritmo bastante eficiente para o problema do caixeiro viajante.

DESROCHERS e SOUMIS (1988) propuseram o Algoritmo de Etiquetamento Permanente (AEP) para a solução do problema de caminho mínimo com janela de tempo (PCMTJ), cuja ordem de complexidade é quadrática e baseia-se no conceito de *buckets* generalizados e numa regra de seleção de etiquetas.

CUNHA (1997) desenvolveu um modelo para problemas de roteirização de veículos com restrições operacionais, em especial janelas de tempo e duração máxima da jornada, cuja estratégia de solução foi a relaxação Lagrangiana das restrições do modelo relacionadas ao atendimento de todos os clientes exatamente uma vez. Uma vez que o problema relaxado ainda foi de difícil resolução, adotou uma versão aprimorada do algoritmo de etiquetamento permanente para o PCMTJ, associado a duas estratégias distintas para frotas homogêneas: a Alocação Sequencial e a Alocação Paralela.

No problema relaxado do PRPJT, a Alocação Sequencial consiste em utilizar, de maneira sequencial, o algoritmo AEP para a resolução do subproblema de caminho mínimo com janela de tempo. A estratégia básica desta heurística considera todos os clientes como candidatos a serem inseridos em um mesmo veículo.

Já na Alocação Paralela, que também ocorre no problema relaxado do PRPJT, a construção dos roteiros dos veículos é realizada em paralelo, de modo que a cada iteração da relaxação Lagrangiana são obtidos diversos caminhos mínimos com penalidades e o processo se repete até que o limite do número máximo de iterações da relaxação Lagrangiana seja atingido, ou até que haja convergência para uma solução parcial, ou até que todos os clientes sejam atendidos.

CUNHA e GUALDA (1999) trabalharam com heurísticas baseadas em Relaxação Lagrangiana das restrições do modelo matemático relacionadas à obrigatoriedade de

atendimento a todos os pontos uma única vez por um único veículo, para resolver o problema de roteamento de veículos com restrições operacionais. Relaxando-se tais restrições, o problema foi tratado como um problema de múltiplos caminhos simultâneos, sujeito às demais restrições do problema de roteirização e programação de veículos com janelas de tempo (PRPJT), isto é, janelas de tempo, capacidades dos veículos e duração das jornadas.

FONSECA (2002) propôs uma versão adaptada à Heurística de Inserção de SOLOMON (1987), com a adaptação de um sistema de coordenadas baseado no CEP. Diferentemente da abordagem sequencial de SOLOMON (1987), FONSECA (2002) modela o Problema de Alocação de Atendimentos de Coletas Expressas (PAAC-E) como um problema de inserção em diversas rotas em paralelo. O método de solução é composto por duas etapas: na primeira, denominada estática, os atendimentos conhecidos são programados previamente à saída dos veículos; na segunda, denominada dinâmica, os novos atendimentos que vão surgindo são alocados aos roteiros em andamento.

A estratégia de solução proposta por FONSECA (2002) consiste, resumidamente, no recebimento em tempo real de cada atendimento de coleta gerado por um Centro de Atendimento ao Cliente, teste de viabilidade de inserção do pedido em todas as rotas em atividade e escolha, dentre as viáveis, daquela que obtiver menor resultado na função objetivo que corresponde à soma ponderada das parcelas de tempo de atendimento e quantidade de horas-extras.

HU *et al.* (1997) aplicaram um modelo de avaliação de rede dinâmica considerando um sistema de informação em tempo real e de controle de sinais, denominado *DYNAMIC Network Assignment Simulation Model for Advanced Road Telematics – DYNASMART*, considerando dois tipos de controle: ajustes diários dos parâmetros de controle de sinais refletindo os padrões diários de tráfego; ou controle de tráfego em tempo real baseado nos padrões de vôo.

LO *et al.* (2001) desenvolveram uma formulação para o controle dinâmico de tráfego a partir de um modelo de transmissão celular que apresenta uma convergência numérica aproximada ao modelo hidrodinâmico.

FU (2001) estuda o problema da roteirização de veículos em redes viárias nas quais os tempos em cada ligação podem ser modelados como uma variável aleatória e suas

realizações podem ser estimadas de forma a tornar viável o sistema de roteirização antes do veículo entrar na ligação. A questão é formulada como um problema de roteirização denominado *Closed-loop Adaptive Shortest Path Routing Problem (CASPRP)*, cujo objetivo é a identificação somente da ligação mais próxima, ao invés de se considerar todo o caminho para explicar a capacidade futura do tempo de viagem em ligações individuais.

STOJKOVIC *et al.* (2002) desenvolveram um modelo de otimização para programação de vôos em tempo real mediante ocorrência de perturbações de natureza operacional, tais como: más condições meteorológicas, dificuldades técnicas com a aeronave, atrasos da tripulação ou dos passageiros, congestionamento do tráfego aéreo, dentre outros. O estudo teve o objetivo de minimizar as inconveniências para os passageiros, assim como os custos para a empresa.

Segundo SOUZA (1993) o método *Simulated Annealing (SA)* é baseado na analogia com o processo de passar um material do estado líquido para o estado sólido, mediante alta temperatura. Reduz-se, então, a temperatura de modo a possibilitar que as partículas do material se reorganizem em um estado com nível mais reduzido de energia. Neste método, são probabilisticamente aceitos aumentos parciais na função objetivo, através de um conjunto de parâmetros controlados pelo usuário. Além disso, pode-se assegurar que a probabilidade de encontrar uma solução pior tende a zero com o crescimento do número de iterações.

GOLDEN e SKISCIM (1986) aplicaram o método SA ao problema do caixeiro viajante. Concluíram que embora inovador, existiam heurísticas disponíveis mais efetivas para a resolução de um dado problema de otimização combinatória.

REEVES (1993) apresenta estudo comparativo para a solução do problema do Caixeiro Viajante utilizando como estratégias de solução Redes Neurais e SA.

GENDREAU *et al.* (1994) classifica as metaheurísticas SA e Busca Tabu como métodos de melhoria, cujos procedimentos examinam as proximidades de uma solução, permitindo que a função objetivo sofra uma deterioração a fim de serem evitados mínimos locais.

TAILLARD *et al.* (1996) propuseram a Busca Tabu para o problema de roteirização com janelas de tempo para frota homogênea e restrições de capacidade dos veículos e de

duração dos roteiros, cuja solução decompõe o problema em regiões que são tratadas independentemente.

GENDREAU *et al.* (2004 e 2005) propuseram o uso de Busca Tabu para a solução de problemas de roteirização, enquanto CORDEAU *et al.* (2003 e 2005) desenvolveram soluções baseadas em Busca Tabu para a solução de problemas de roteirização de veículos com janelas de tempo.

OLIVEIRA (2004) apresenta três estratégias para intensificação de busca em algoritmos evolutivos híbridos, compondo o núcleo de três abordagens: o Treinamento Populacional em Heurísticas (TPH), o *Evolutionary Clustering Search* (ECS) e o Algoritmo Paralelo Hierárquico e Adaptativo com Competição Justa (APHAC). As três abordagens são aplicadas a vários problemas teste, definidos em espaços de busca contínuos e discretos.

SANTOS *et al.* (2007) descrevem alguns algoritmos baseados em Sistemas de Colônia de Formigas (*Ant Colony Systems* – ACS) para a solução de problemas de otimização combinatória discreta, com foco na solução para o problema de roteirização de veículos com janelas de tempo e testes em problemas padrão usados como *benchmarking* na literatura (TSPLIB).

ARAS *et al.* (1999) usaram técnicas estatísticas para a definição dos pesos dos neurônios em uma Rede de Kohonen, considerando duas fases de atribuição, denominadas de atração e de dispersão. Na primeira, os neurônios mais próximos de determinada cidade são atraídos para a mesma, enquanto na segunda fase, os pesos dos demais neurônios são alterados de forma que se distanciem da cidade relacionada. Caso todos os neurônios sejam envolvidos no processo de seleção, o método é denominado global (KNIESG), caso contrário, se parte dos neurônios seja envolvido na seleção, o método é denominado local (KNIESL).

HU *et al.* (2002) utilizaram o coeficiente de comparação em escala de cinza (Grey Relational Coefficient – GRC) entre os padrões de entrada e os pesos da rede de Kohonen, cujos resultados foram comparados a estruturas de aprendizado das Redes de Kohonen desenvolvidas para classificação e para o problema do Caixeiro Viajante.

COCHRANE *et al.* (2003) utilizam mapas de Kohonen com o princípio de cooperação entre os vizinhos próximos dos neurônios, técnica denominada Rede Cooperativa

Adaptativa de Kohonen (*Cooperative Adaptive Network – CAN*), na qual são utilizados um número maior de neurônios do que o de cidades, resultando em comparações entre várias Redes Neurais desenvolvidas para resolver este problema do Caixeiro Viajante simétrico.

SIQUEIRA (2005) apresenta duas Redes Neurais Recorrentes para resolver o problema da Designação Linear. Inicialmente, utiliza Mapas de Kohonen para a determinação dos elementos da matriz de custos do problema da Designação. Em seguida, utiliza a Rede Neural Recorrente de Wang, com a aplicação do princípio *Winner Takes All* para a resolução do problema de Designação propriamente dito.

CRÉPUT *et alli.* (2007) utilizaram o *Memetic SOM (Self-Organizing Maps)*, algoritmo evolucionário que incorpora mapas auto-organizados para a solução do problema de roteamento de veículos com janelas de tempo (*Vehicle Routing Problem Time Windows - VRPTW*) em instâncias dos problemas apresentadas por SOLOMON (1987).

YEUN *et al.* (2008) apresentaram modelos e soluções para o PRPV, tais como algoritmos exatos baseados em técnicas de programação linear e busca local guiada. Relacionaram, ainda, técnicas heurísticas que têm recebido grande interesse do esforço dos pesquisadores para resolver VRP em grande escala. Entre as técnicas recentemente aplicadas citam: algoritmos genéticos, estratégias evolutivas e redes neurais

POTVIN (2008) apresenta uma revisão de alguns dos principais algoritmos desenvolvidos com inspiração em fenômenos biológicos para a solução de problemas de roteirização de veículos, cuja natureza combinatória apresenta complexidade de ordem NP Hard. Nesse artigo, descreve aplicações a partir de ACS, de Algoritmos Evolucionários (*Evolutionary Algorithms - EA*), de Redes Neurais e de Sistemas Artificiais Imunes (*Artificial Immune Systems – AIS*).

CAPÍTULO III

CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA DE ROTEIRIZAÇÃO E PROGRAMAÇÃO DE VEÍCULOS

3.1. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS

A formulação matemática apresentada por LAPORTE (1992) para o Problema de Roteamento de Veículos - PRV é apresentada a seguir.

Seja x_{ij} uma variável inteira que pode assumir os valores $\{0, 1\}$, $\forall \{i, j\} \in E \setminus \{\{0, j\}: j \in V\}$ e valor $\{0, 1, 2\}$, $\forall \{0, j\} \in E$, $j \in V$, sendo V o conjunto de vértices. Note que $x_{0j} = 2$ quando uma rota incluindo um único cliente j é selecionada na solução. O VRP pode ser formulado como o Problema de Programação Inteira que se segue:

$$\text{Minimize } \sum_{i \neq j} d_{ij} x_{ij} \quad (3.1)$$

Sujeito a:

$$\sum_j x_{ij} = 1, \quad \forall i \in V, \quad (3.2)$$

$$\sum_i x_{ij} = 1, \quad \forall j \in V, \quad (3.3)$$

$$\sum_j x_{ij} > |S| - v(S), \quad \{S: S \subseteq V \setminus \{1\}, |S| \geq 2\}, \quad (3.4)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall \{i, j\} \in E; i \neq j \quad (3.5)$$

Nesta formulação, (3.1), (3.2), (3.3) e (3.5) definem um problema de alocação modificados, no qual as atribuições sobre a diagonal principal são proibidas. As restrições (3.4) referem-se à eliminação da sub-rotas, onde $v(S)$ é um limite inferior adequado do número de veículos necessários para visitar todos os vértices de S na solução ótima.

O problema de roteamento de veículos (PRV) é um problema combinatório, cujo espaço é fixado nas bordas de um grafo $G(V, E)$ e possui a seguinte notação:

- $V = \{v_0, v_1, \dots, v_n\}$ é um conjunto de n vértices, sendo v_0 o vértice que representa o depósito.
- $V' = V \setminus \{v_0\}$ o conjunto de nós a serem visitados.
- $A = \{(v_i, v_j) / v_i, v_j \in V; i \neq j\}$ é um conjunto de arcos.
- C é uma matriz não-negativa de custos ou distâncias c_{ij} entre os clientes v_i e v_j .
- d é um vetor das demandas do cliente.
- R_i é a rota para o veículo i .
- NV é o número de veículos (frota homogênea), onde para cada rota é atribuída um veículo.

Quando $c_{ij} = c_{ji}$ para todo $v_i, v_j \in A$ o problema é dito ser simétrico, sendo então usual substituir A o conjunto de arestas pela seguinte expressão:

$$E = \{(v_i, v_j) / v_i, v_j \in V; i < j\} \quad (3.6)$$

Para cada vértice v_i em V' é associada uma quantidade k_i de alguns bens que devem ser entregues por um veículo.

O problema consiste, portanto, em determinar um conjunto de m rotas para os veículos a um custo total mínimo, iniciando e terminando em um depósito v_0 , de modo que cada vértice é visitado exatamente uma vez por um veículo.

Considerando t_i o tempo de serviço despendido por um veículo para descarregar a quantidade k_i em v_i e que a duração total de qualquer rota de veículos não pode ultrapassar um limite determinado, o custo c_{ij} é considerado como o tempo de viagem entre os nós.

Uma solução viável para o problema é composta por uma partição $\{R_1, R_2, \dots, R_m\}$ de V e por uma permutação de $R_j \cup 0$, que especifica a ordem dos clientes na rota j .

O custo para uma determinada rota ($R_i = \{v_0, v_1, \dots, v_n\}$) é dada pela expressão a seguir:

$$C(R_i) = \sum_{i=0}^m c_{i,i+1} + \sum_{i=1}^m t_i, \text{ onde } v_i \in V \text{ e } v_i = v_{m+1} = 0 \text{ (0 denota o depósito)} \quad (3.7)$$

Uma rota R_i é viável se o veículo parar exatamente uma vez em cada cliente e se a duração total da rota não exceder um limite pré-especificado $C(R_i) \leq D$. O custo da solução de problemas é, portanto, $\sum_{i=1}^m C(R_i)$.

Existem extensões, ou variações, de problemas PRV, como é o caso PRV com janela de tempo, denominado PRVJT, no qual cada consumidor possui uma janela de tempo $[a, b]$ na qual deve ocorrer o atendimento. Uma variante para esse problema seria considerar que o tempo de atendimento difere para cada consumidor. Outras variantes do PRV são apresentadas a seguir:

- Problema de roteamento de veículos periódico (PRVP): é uma generalização do PRV clássico, na qual o período de planejamento não é realizado para um único dia, mas para d dias.
- Problema de roteamento de veículos capacitados (PRVC): uma frota de veículos com capacidade uniforme é disponibilizada para atender às necessidades dos clientes, para determinado tipo de mercadoria, para um depósito comum a um custo mínimo de trânsito.
- Problema de roteamento de veículos com coleta e entrega (PRV com *Backhauls*): é uma variante do PRV, pois considera a coleta e a entrega de produtos, sendo que todas as entregas devem ser feitas em cada rota, antes de qualquer coleta uma vez que os veículos são carregados na parte traseira, e o rearranjo das cargas sobre os trilhos nos pontos de entrega não é considerada viável.
- Problema de Roteamento de Veículos com Múltiplos Depósitos (PRVMD): a empresa possui vários depósitos para atender à demanda de seus clientes. Caso seja possível agrupar os clientes em torno dos depósitos, o problema da distribuição pode ser modelado como um conjunto PRV independentes. Caso contrário, deve ser resolvido com um PRVMD.
- Problema de roteamento de veículos com entregas particionadas (*Split Delivery* VRP): é um relaxamento da PRV, no qual é permitido que um mesmo cliente seja atendido por veículos diferentes, caso os custos globais sejam reduzidos. Esse relaxamento é necessário caso os pedidos dos clientes excedam a capacidade dos veículos.

3.2. O PROBLEMA DA ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS COM JANELAS DE TEMPO

CUNHA (1997) apresentou proposta para a solução do problema de roteirização e programação de veículos denominado Problema de Roteirização e Programação de Veículos com Janelas de Tempo (PRPJT), com restrições de janela de tempo, de duração da jornada e de capacidade de veículos, com quantidades de carga a ser transportadas determinísticas e conhecidas a priori, para uma frota que pode ser homogênea ou heterogênea.

Para problemas com frotas homogêneas o autor propôs a adoção de heurísticas de Inserção Sequencial e de Inserção em Paralelo. Na heurística de Inserção Sequencial, cujo objetivo é minimizar o número de veículos utilizados, assim como determinar roteiros que otimizem a distância ou o tempo de viagem, o algoritmo para a resolução do caminho mínimo com janela de tempo é aplicado sequencialmente, de forma que todos os clientes ainda não atendidos são candidatos à inclusão no veículo corrente e, caso não tenha sido possível sua inserção após certo número de iterações, mantém-se a melhor solução para o veículo. Os demais clientes ainda não atendidos são candidatos à inclusão no veículo seguinte.

Já para a heurística de Inserção em Paralelo o objetivo é determinar uma programação que utilize a frota total disponível, assegurando uma distribuição mais homogênea dos clientes aos veículos.

Para problemas com frotas heterogêneas, CUNHA (1997) propôs a heurística de Agrupamento e Alocação Sequencial, que ao contrário da heurística de Inserção Sequencial, realiza um agrupamento e uma seleção dos clientes que devem estar potencialmente juntos, para, então, tentar determinar um roteiro que passe por todos os clientes do grupo. Assim, há um procedimento de seleção do veículo a ser alocado, seguindo-se um procedimento de agrupamento dos clientes não atendidos, consideradas as restrições do problema, ambos inseridos em um algoritmo que controla as iterações da relaxação Lagrangiana.

3.3. DESCRIÇÃO MATEMÁTICA DO PRPJT

Dispõe-se de uma frota composta por NV veículos, que podem ou não ser homogêneos com relação a tipo, modelo ou tamanho, para atendimento a N pontos ou clientes.

Para cada veículo v da frota, onde $v = 1, 2, \dots, V$, são definidos:

- Capacidade máxima de peso K^v ;
- Custo unitário com a distância C_d^v ;
- Custo fixo diário total C_f^v , que considera os salários relativos às horas de trabalho da tripulação, as despesas de capital do veículo, as despesas com licenciamento, seguro, dentre outras.
- Custo horário C_h^v , decorrente de veículos que por ventura sejam alugados com tarifas horárias.
- Duração máxima da jornada de cada veículo H^v .

Ao conjunto de N pontos ou clientes a serem atendidos, onde a cada ponto $i \in \{1, 2, \dots, N\}$ deve ser realizado um atendimento de coleta ou de entrega de produto(s) para o caso do transporte de carga, são associados:

- Um tempo de atendimento $s_i \geq 0$;
- Uma janela de tempo $[a_i, b_i]$, $a_i \leq b_i$, que define os limites no qual o atendimento pode ser iniciado, ou seja, o horário mais cedo e o horário mais tarde, de tal forma que o horário de término de atendimento não está condicionado ao limite superior da janela de tempo, mas ao horário de início do atendimento;
- Uma quantidade $q_i \geq 0$ de carga a ser coletada ou entregue.

Para diferenciar os pontos de origem e de destino dos veículos, representa-se a base de saída e de chegada dos veículos, respectivamente, pelos pontos 0 e $N + 1$. Sendo o problema de entrega, as cargas originam-se na base de partida e o veículo retorna vazio ao final dos atendimentos, sendo o problema de coleta, o veículo inicia vazio e, ao final dos atendimentos, as cargas têm como destino o depósito. A cada um dos pontos tem-se as seguintes associações:

- Tempos de atendimento $s_0 = s_{N+1} = 0$, sendo que para o problema de entregas $s_0 \neq 0$ representa o tempo de carregamento do veículo, enquanto para o problema de coleta $s_{N+1} \neq 0$ representa o tempo de descarga do veículo;
- As janelas de tempo $[a_0, b_0]$ e $[a_{N+1}, b_{N+1}]$, representam os horários permitidos de saída e de chegada dos veículos à base;
- Assume-se que as quantidades de carga movimentadas são iguais a zero ($q_0 = q_{N+1} = 0$), pois nesses pontos não ocorrem atendimentos.
- Sendo o problema de entregas $q_0 = \sum_{i=1}^N q_i$, caso o problema seja de coletas $q_{N+1} = \sum_{i=1}^N q_i$.

O deslocamento do veículo de um nó i , $i = 0, 1, 2, \dots, N$ até o nó sucessor $j = 1, 2, \dots, N+1$, $i \neq j$, representado pela distância d_{ij} , requer um tempo de viagem t_{ij} . Assume-se que matrizes de distâncias percorridas, assim como dos tempos de viagem não são simétricas, ou seja, não necessariamente $d_{ij} = d_{ji}$ e $t_{ij} = t_{ji}$, assim como $d_{ij} = \infty$ e $t_{ij} = \infty$, caso não exista ligação entre i e j .

3.3.1. Variáveis de Decisão

A formulação matemática do problema compreende as seguintes variáveis de decisão:

- $x_{ij}^v = \begin{cases} 1, & \text{se } j \text{ é atendido após } i \text{ pelo veículo } v; \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$
- $T_i =$ horário de início de atendimento em i , $i \in \{1, 2, \dots, N\}$.

3.3.2. Função Objetivo

A função objetivo do problema proposta por CUNHA (1997) foi a seguinte:

[minimizar]

$$\begin{aligned} & \sum_{v=1}^{NV} \sum_{i=0}^N \sum_{j=1}^{N+1} C_d^v d_{ij} x_{ij} + \\ & \sum_{v=1}^{NV} \sum_{i=0}^N \sum_{j=1}^{N+1} (T_i + s_i + t_{i,N+1}) C_h^v x_{i,N+1} + \\ & \sum_{v=1}^{NV} \sum_{j=1}^N C_f^v x_{oj}^v \end{aligned} \quad (3.8)$$

O primeiro termo da função objetivo refere-se ao custo proporcional à distância total percorrida, enquanto o segundo considera o custo proporcional ao tempo despendido pelos veículos nos roteiros, e o terceiro termo diz respeito aos custos fixos de propriedade e manutenção dos NV veículos que compõem a frota.

Vale observar que embora os custos fixos independam da utilização da frota num dado dia, sua incorporação na função objetivo tem por finalidade promover a utilização mais econômica dos recursos, na medida em que for alocada somente a frota necessária para o cumprimento dos atendimentos programados.

Ademais, na função objetivo não foram explicitados o custo de horas extraordinárias pagas quando a duração do roteiro excede a jornada de trabalho do pessoal, nem o custo relativo ao tempo de espera de cada veículo para início do atendimento, o que caracterizaria uma penalidade decorrente da chegada ao local antes do horário previsto na janela de tempo.

3.3.3. Restrições

As restrições (3.9) impõem que cada um dos pontos $i \in \{1, 2, \dots, N\}$ seja visitado uma única vez e por um único veículo.

$$\sum_{v=1}^{NV} \sum_{j=1}^{N+1} x_{ij}^v = 1 \quad i = 0, 1, 2, \dots, N; i \neq j \quad (3.9)$$

As restrições (3.10), (3.11) e (3.12) consideram o fluxo no caminho que o veículo v for utilizar.

$$\sum_{j=0}^{N+1} x_{oj}^v = 1 \quad v = 1, 2, 3, \dots, NV \quad (3.10)$$

$$\sum_{i=0}^N x_{ij}^v - \sum_{i=1}^{N+1} x_{ji}^v = 0 \quad j = 1, 2, 3, \dots, N; \quad v = 1, 2, \dots, NV \quad (3.11)$$

$$\sum_{i=0}^{N+1} x_{i,N+1}^v = 1 \quad v = 1, 2, 3, \dots, NV \quad (3.12)$$

As restrições (3.13) impõem que o horário de atendimento de cada nó i ocorra dentro de sua respectiva janela de tempo.

$$a_i \leq T_i \leq b_i \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3.13)$$

As restrições (3.14) impõem a continuidade temporal dos horários de início de atendimento ao longo das rotas, assim como que o horário de atendimento em cada um dos nós seja crescente ao longo de uma rota, não permitindo a formação de sub-rotas.

$$T_i + s_i + t_{ij} - T_j \leq (1 - x_{ij}^v)M \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3.14)$$

$$j = 1, 2, \dots, N \quad j \neq i$$

$$v = 1, 2, 3, \dots, NV$$

onde M é uma constante positiva ($M \rightarrow \infty$).

As restrições (3.15) impõem a não violação da capacidade de carga de cada veículo ao longo dos roteiros.

$$\sum_{i=0}^N \sum_{j=1}^N q_j x_{ij}^v \leq K^v \quad v = 1, 2, 3, \dots, NV \quad (3.15)$$

As restrições (3.16) impõem o limite de duração máxima da jornada de cada veículo.

$$(T_j + s_j + t_{j,N+1}) x_{j,N+1}^v - (T_i + t_{oi}) x_{oi}^v \leq H \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3.16)$$

$$j = 1, 2, \dots, N$$

As restrições (3.17) impõem que as variáveis de decisão de fluxo x_{ij}^v relativas às sequências de atendimento nas rotas, sejam binárias.

$$x_{ij}^v \in \{0, 1\} \quad i = 0, 1, 2, \dots, N+1 \quad (3.17)$$

$$j = 0, 1, 2, \dots, N+1$$

$$v = 1, 2, 3, \dots, NV$$

Para tais problemas, muitas vezes é desejável a obtenção de soluções aproximadas, que podem ser encontradas mais rapidamente e são suficientemente precisas para a aplicação a que se referem. Geralmente esta tarefa é realizada por meio de métodos heurísticos e metaheurísticos, desenvolvidos a partir de alguns *insights* sobre a natureza do problema.

3.4. O PROBLEMA DO TRANSPORTE EXPRESSO

Segundo FONSECA (2002), as remessas expressas podem ser caracterizadas pelo transporte de documentos e de pequenos volumes, manuseáveis por um único indivíduo, cujo processo tem início com uma solicitação de coleta, a qual pode decorrer de uma programação prévia ou de um pedido ocasional.

Na operação expressa de uma Estação Operacional as rotas são fixas e determinadas por um conjunto de CEP predefinidos, fruto de uma análise das características geográficas da região, da densidade de clientes, assim como de características particulares da região com relação ao fluxo de veículos ao longo do dia.

Cada rota é atendida por um *courier* que realiza os serviços de coleta, de entrega, ou ambos, de acordo com os horários definidos para o início e para o término de suas atividades. No planejamento do dia um conjunto de CEP pode ser atendido por mais de uma rota em determinado período, assim como pode ocorrer de em determinada rota serem realizadas coletas e entregas, enquanto, na mesma região, um segundo *courier* operar em paralelo numa segunda rota, a fim de prover um reforço no atendimento de coletas, ou ainda, dois *couriers* operando numa mesma região em períodos diferentes do dia.

A prioridade da operação em garantir o atendimento no horário compromissado, aliada à característica física de pequenas encomendas, permitem classificar a frota como homogênea e não capacitada, ou seja, em cada rota as restrições temporais são severas e, na prática, não ocorrem restrições de capacidade dos veículos utilizados pelos *couriers* para as coletas e entregas de documentos e pequenos volumes.

Na operação expressa os *couriers* devem ser conhecedores dos detalhes de sua rota por força dos seguintes motivos:

- urgência e prazo reduzido para execução do serviço, principalmente a coleta, por não haver tempo para consultas a guias ou outros auxílios de localização;
- dinâmica acelerada e surgimento de novos atendimentos de coleta;
- imprecisão na codificação dos endereços de entrega;
- necessidade de agilidade no deslocamento de um atendimento ao outro, exigindo conhecimento da velocidade de tráfego nas diferentes horas do dia, locais para estacionar, acesso a edifícios etc.

Para BARROS (2005), uma das formas de estudar o problema do transporte de carga urbana ocorre pela utilização da referência espacial. Aponta que em grande parte dos cadastros que as pessoas realizam junto ao comércio, bancos e outros, alguns campos estão sempre presentes no questionário de preenchimento. Contudo, nos modernos aplicativos de bancos de dados, o endereço não é solicitado, haja vista que para o sistema, não interessa manter o registro de uma rua com vários nomes possíveis, dependendo da forma em que este nome é digitado. Cita como exemplo o caso da Avenida Rio Branco, que pode ser registrada como Av. Rio Branco ou Avenida R. Branco, indicando que uma mesma informação de localização geográfica pode estar armazenada de diferentes formas, dificultando a sua utilização.

CUNHA (2000) aponta que as condicionantes de urgência que caracterizam o transporte expresso, assim como o elevado nível de detalhe das informações geográficas que seriam necessárias para formalizar uma base de dados, tais como mãos de direção, movimentos e conversões permitidas e proibidas, velocidades de tráfego que variam ao longo do dia, complexidade dos nomes de ruas, falta de padronização no uso de abreviações, tornam inviável a localização automática de atendimentos por endereço (*Address Matching*), principalmente em se tratando de remessas internacionais, onde é maior a probabilidade de enganos e imprecisões na grafia dos endereços de destino.

Para contornar o problema, as empresas que oferecem esse tipo de serviço prescindem do uso de programas computacionais para a construção de novos roteiros, optando por roteiros fixos e *couriers* experientes, o que representa elevada dependência do conhecimento humano.

FONSECA (2002) propôs um método automatizado para o problema, considerando as características dinâmicas e de localização de endereços com base na representação geográfica por meio do Código de Endereçamento Postal – CEP, cuja abordagem considera a fase de acesso e retorno à estação operacional, assim como a fase de coleta e entrega na região de atendimento.

Na etapa de acesso e retorno à estação operacional, considera-se uma região na qual os logradouros são identificados pelo CEP, atendidos por uma ou mais rotas partindo e retornando para uma única estação operacional, de onde partem e retornam os veículos ao

centro. No acesso à sua região, o veículo passa por diversas regiões de CEP sem realizar nenhum atendimento.

Na coleta e entrega na região de atendimento, FONSECA (2002) observou que a configuração de uma sequência diária usual de atendimento dentro da região de CEP, a definição de horários e sentidos de direção com trânsito intenso, assim como o perfil de ocorrência de atendimentos de coleta ao longo do dia, eram características que se repetiam dia-a-dia, configurando uma sequência informal para a programação dos atendimentos.

Na fase de planejamento das rotas são definidas regiões de compartilhamento entre rotas, para atender os casos no quais uma das rotas atinja o limite de sua capacidade horária de atendimentos, novos atendimentos são transferidos para outra(s) rota(s).

3.5. O PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE ATENDIMENTOS DE COLETAS EXPRESSAS

FONSECA (2002) define o Problema de Alocação de Atendimentos de Coletas Expressas - PAAC-E, como um problema dinâmico de designação de solicitações de coletas a rotas, que envolve a operação de coletas e entregas de remessas expressas, uma frota de m veículos homogêneos e não capacitados são disponibilizados para atender a um conjunto de pontos com janelas de tempo específicas, com alocação de novas solicitações efetuadas de modo a minimizar a soma ponderada do tempo total necessário para responder ao atendimento de coleta com o tempo total de trabalho realizado em regime de horas-extras.

O método proposto por FONSECA (2002) para o tratamento de atendimentos de coleta é heurístico, com alocação sequencial dos atendimentos e inserção paralela em cada uma das rotas do conjunto já existente, por meio de ajustes na heurística de inserção apresentada por SOLOMON (1987).

A heurística de inserção proposta por SOLOMON (1987) é um método sequencial de geração de uma rota por vez com base em um dos seguintes critérios:

- maximização do benefício de atendimento de parada por uma rota compartilhada e não direta, minimizando-se de forma ponderada a distância e tempo extra para seu atendimento;
- minimização dos custos ponderados de distância e tempo de atendimento.

FONSECA (2002) propõe a modelagem do PAAC-E como um problema de inserção em diversas rotas em paralelo, sugerindo critérios de ponderação para ajuste dos parâmetros identificados para compor as decisões de alocação. A cada iteração, atendimentos são agrupados, sequenciados e testados, um a um, em diferentes rotas, quanto à viabilidade do atendimento.

A dificuldade em se tratar o problema de roteirização nas atividades de coleta e entrega no transporte expresso decorre da combinação de janelas de tempo muito reduzidas com um conjunto de atendimentos de coleta dinâmico, com a velocidade requerida para a tomada de decisão, devido à urgência que caracteriza a atividade e à dificuldade de localização geográfica de parcela dos endereços de atendimento.

3.6. ROTEIRIZADORES

MELO (2000) define roteirizadores como sistemas computacionais que, através de algoritmos, geralmente heurísticos e uma apropriada base de dados, são capazes de obter soluções para problemas de roteirização e programação de veículos (PRPV) com resultados relativamente satisfatórios, consumindo menor tempo e esforço de processamento quando comparados aos gastos nos tradicionais métodos manuais.

A maioria dos Sistemas de Roteirização e Programação de Veículos (SRPV) encontrados no mercado surgiram na década de oitenta (HALL, 2006). Segundo MELO (2000), antigamente a roteirização e a programação de veículos eram realizadas com base na experiência pessoal dos profissionais que trabalhavam no pátio.

Segundo SANTOS (2008), o uso do SRPV aumentou significativamente devido a dois aspectos: primeiro, devido ao aumento da complexidade do problema, o que inviabilizou a obtenção de bons resultados de roteirização por meio de métodos manuais; segundo, devido ao avanço da informática, caracterizado pela redução dos custos e melhoria significativa da qualidade das ferramentas criadas, pelo uso de algoritmos e de interfaces amigáveis para os roteirizadores.

SANTOS (2008) considera que os roteirizadores tornaram-se uma ferramenta primordial na melhoria da produtividade dos processos de distribuição de mercadorias, sendo a peça central da integração de uma série de tecnologias em telemática que visam gerir com maior precisão os recursos operacionais disponibilizados e o serviço prestado ao mercado. Um esquema típico de como ocorre uma programação de veículos com o uso de um roteirizador o que pode ser observado na Figura 3.1.

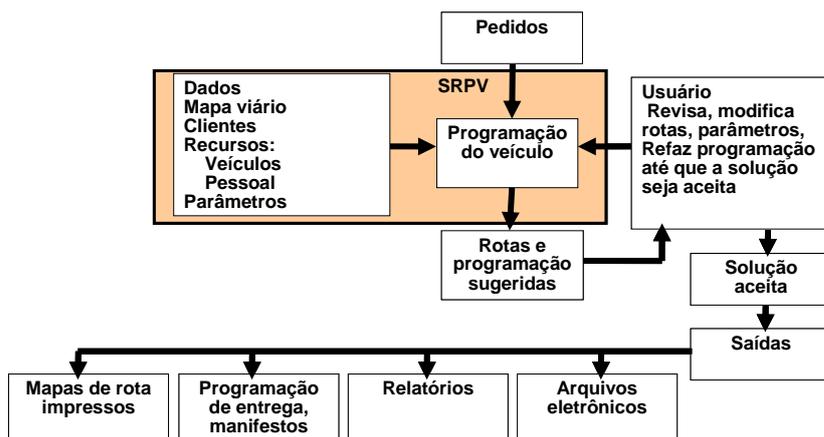


Figura 3.1: Programação de veículos por meio de computador
Fonte: SANTOS (2008)

3.6.1. Atributos de um software de roteirização

Segundo BODIN *et al.* (1983), se as características de um problema de roteirização são bem conhecidas torna-se mais claro propor uma solução para o mesmo. Para RONEN (1988), classificar os problemas de roteirização em categorias padrão pode facilitar a comunicação entre pesquisadores e profissionais ligados ao tema, e ajudar a focalizar nos tipos de problemas que merecem maior atenção.

Assim, com o intuito de facilitar a identificação do tipo de problema de roteirização e programação, alguns autores propuseram classificações e, dentro destas, buscaram extrair características que fornecessem uma compreensão e análise mais completas a respeito. Destacam-se então os trabalhos de BODIN e GOLDEN (1990) e RONEN (1988).

CUNHA (1997) propôs uma síntese dos principais condicionantes e requisitos desejáveis para um software comercial genérico para roteirização de veículos, cujos atributos podem ser utilizados como ponto de partida num processo de seleção para definir uma lista de

verificação dos condicionantes práticos que um software de roteirização deve poder lidar para uma dada aplicação prática.

Tabela 3.1: Principais características de sistemas para roteirização de veículos

CARACTERÍSTICA	ASSAD (1988)	RONEN (1988)	BODIN (1990)
Recursos, restrições e condicionantes			
Roda em microcomputador, com interface para <i>mainframe</i>			
Uma ou múltiplas bases			
Diferentes tipos de veículos			
Coletas e entregas – <i>backhauls</i>			
Janelas de tempo			
Tempos de carga e descarga			
Velocidades variáveis			
Contratação de terceiros			
Limite de peso e volume			
Múltiplos compartimentos por veículo			
Duração máxima do roteiro			
Contabilização de horas extras			
Horários de início e término de viagem			
Roteiros com duração superior a um dia; pernoite; revezamento de motoristas			
Locais de parada fixos (e.g. almoço)			
Restrições quanto ao tamanho de veículo e seus equipamentos para um cliente			
Zonas de entregas e possibilidade de fracionamento de carga; roteiros fixos			
Sistema de georeferência; barreiras físicas e restrições de circulação de veículos			
Múltiplos roteiros por veículo			
Função Objetivo			
Minimizar distância			
Minimizar tempo de viagem			
Minimizar número de veículos			
Minimizar custo total			
Resultados			
Roteiro e programação de cada veículo			
Relatório de utilização do veículo			
Relatório de programação do motorista			
Roteiros gráficos			
Relatórios definidos pelo usuário			
Alteração manual de soluções			

Fonte: CUNHA (1997)

SANTOS (2008) propôs uma breve descrição e exemplos de uso dos atributos ou características de um roteirizador comercial para servir de referência na compreensão e definição das características técnicas do roteirizador almejado. As Tabelas 3.2 e 3.3 apresentam atributos que um roteirizador deve atender.

Tabela 3.2: Recursos, restrições e condicionantes de um roteirizador

	Atributos	Descrição	Uso
Recursos	Coletas e entregas – <i>backhauls</i>	Programação das coletas após as entregas feitas ou simultaneamente.	Recolhe embalagens usadas, produtos não conformes ou outros materiais.
	Fracionamento de carga	Divisão de pedidos que superam a capacidade de um único veículo	Viabiliza a entrega de um pedido por mais de um veículo
	Uma ou múltiplas bases	Roteiriza as entregas considerando saídas dos veículos de uma ou mais bases	Operações com diferentes bases, tais como na relação matriz e filial.
	Diferentes tipos de veículos	Aceita veículos com diferentes capacidades, dimensões e usos	Em frotas heterogêneas.
	Contratação de terceiros	Discriminação de frota terceirizada, c/ os custos e caracterização de veículos próprios	Na gestão da frota terceirizada ou na contratação de temporários.
	Múltiplos compartimentos por veículo	Especifica compartimentos conforme a natureza da carga (refrigerada, viva)	Distribui a carga na carroceria para adequá-la ao tipo de acondicionamento.
	Re-roteirização e programação tempo real	Reformulação do roteiro ou programação em um curto espaço de tempo (on-line)	Informa <i>on-line</i> mudanças no trajeto. Minimiza alterações pelo motorista
	Informações de tráfego tempo real	Coleta informações c/ GPS, celulares, comp. de bordo, conecta centrais de tráfego.	Previsão + real das entregas p/ cliente, e calibragem automática do roteirizador.
	Roteiros c/duração de mais de um dia	Especifica pernoite, motoristas, horários e equipes para mais de um dia.	Entregas que demandam mais de um dia de trabalho.
	Múltiplos roteiros	Mais de um roteiro por veículo.	Planeja a recarga do veículo.
Restrições	Roteiros fixos (rota master)	Roteiros pré-fixados.	Atende rotas em que sequência de visitas e clientes são pré-determinados.
	Limite de peso e volume	Limites da capacidade em tonelagem ou da cubagem da carroceria do veículo.	Para definir a distribuição de cargas por veículos.
	Restrições ao veíc. e equip. p/ cliente	Clientes podem requerer veículos ou o uso de equipamentos específicos.	Ex.:local de descarga não comporta veículo maior; necessita uso de paleteiras.
	Zonas de entrega	Delimitação de áreas com atendimento diferenciado.	Restringe o uso de determinados veículos a determinadas áreas.
	Restrições à circulação	Restrições devido a limites geográficos, físicos ou legais.	Adequa o veículo às condições do tráfego (ex.: obrigatório uso VUC, segurança)
	Duração máxima do roteiro	Limitação, muitas vezes flexível, da jornada de trabalho em um roteiro.	Distribui a carga horária de trabalho conforme a política da empresa
	Horário de início e término de viagem	Normalmente o horário de saída e chegada ao depósito.	Orienta horário do carregamento, conferências e saídas de veículos.
	Locais de parada fixos	Busca chegar em determinado local em horário pré-estabelecido.	Especifica locais com horários fixos (ex.:almoço, recarga do veículo)
Condicionante	Janelas de tempo	Horários em que cliente trabalha ou não possa ou queira receber visitas.	Evita chegada ao cliente em horário impróprio. Utiliza com precaução.
	Tempos de carga e descarga	Soma de tempos variáveis (qde. de bens, fixos e espera atendimento e acerto financeiro)	Especialmente em operações c/ múltiplas entregas e vários tipos de produtos
	Velocidades variáveis	Por tipo de veículo e via, e em função de aspectos temporais ou geográficos.	Na calibragem de parâmetros do sistema relacionados com veículos e malha viária.
	Contabilização de horas extras	Incorporação de horas extras como penalização e cálculo do custo de entrega.	Para penalizar e contabilizar custos de jornada extra ao horário normal.

Fonte: SANTOS (2008)

Tabela 3.3: Funções objetivo, Relatórios, Sistemas de Informação Geográfica (SIG), Tecnologias Integradas ao Roteirizador, Outras Características de um Roteirizador

	Atributos	Descrição	Uso
Funções Objetivo	Minimizar distância	Priorizar a execução dos roteiros com menor distância	Reduz custos variáveis com frota
	Minimizar tempo de viagem	Priorizar a execução dos roteiros com menor tempo de viagem	Reduz custos com mão de obra ou priorizar entregas mais rápidas
	Minimizar número de veículos	Priorizar o menor uso de ativos (veículos)	Reduz custos fixos com frota
	Minimizar custo total	Priorizar a execução dos roteiros com menor distância	Alcança o melhor <i>trade-off</i> dos custos anteriores
Relatórios	Roteiro e programação de cada veículo	Relatório com sequencia, caminho e horários das entregas e coletas	Para monitoramento da viagem por parte da empresa ou dos clientes
	Utilização do veículo	Percentual de ocupação volumétrica ou em peso do veículo	Avalia o percentual de uso da capacidade e se o perfil da frota estão adequados
	Relatório de programação do motorista	Especifica o roteiro de trabalho do motorista por veículo.	Quando há necessidade em especificar separadamente o veículo do motorista
SIG	Apresenta rotas e paradas no mapa	Visualização gráfica dos roteiros e caminhos (path) do veículo	Facilita a visualização do roteiro pelo motorista, empresa ou clientes.
	Permite editar rotas com “ <i>drag & drop</i> ”	Alterações manuais no roteiro e na composição da carga dos veículos utilizando o mouse	Inserir pedidos e alterar rotas manualmente
	Geocodifica paradas a partir de endereços	Utiliza referências como CEP ou coordenadas geográficas para localizar pontos no mapa	Incorporação automática de clientes e malha viária a partir de uma base de dados georeferenciada
Tecnologias Integradas	Display Eletrônico on-board	Integra-se com computadores de bordo capazes de fornecer informações textuais e gráficas do roteiro ou da programação do veículo.	Facilita a visualização e cumprimento do roteiro pelo motorista.
	Rastreamento de veículo em tempo real	Monitoramento dos tempos e do trajeto do veículo.	Monitora o cumprimento do roteiro, aumentar a segurança da viagem por meio do bloqueio do funcionamento do veículo em caso de saída do roteiro especificado (cerca virtual)
	Scanner para código de barra (*)	Comunicação com dados obtidos por meio de códigos de barra	Gestão integrada da roteirização com estoques e o momento do carregamento e entrega das mercadorias
	Software de gestão da cadeia de suprimentos	Comunicação com ferramentas de gestão WMS e EDI.	Gestão integrada da cadeia de suprimentos e roteirização
	Processamento de pedidos dos clientes	Permite receber os pedidos por meio eletrônico e processá-los (separar por análise de crédito, p. exemplo)	Função feita quando não há disponível um sistema administrativo responsável por tal função
	Integração com tecnologias de comunicação móvel	Recebe e envia mensagens, roteiros, programações por meio de celulares, internet sem fio, <i>paggers</i> .	Comunicação entre empresa, motorista e cliente com vistas a: re-roteirização ou reprogramação em tempo real; auxílio ao motoristas na execução do roteiro
Outras características	Instruções turno a turno	Roteirização ou programação por turno de trabalho	Em processos que trabalham em roteiros por turno (ex.: roteiros diurnos e noturnos)
	Previsão automática de entregas	A partir do histórico de velocidades médias, dos tempos de entrega por cliente, emite a previsão de entrega por cliente	Acompanhamento das entregas pelos clientes e pela empresa.
	Manifesto de carga	Emissão da lista de mercadorias com respectivos clientes	Acompanha motorista para auxiliar no processo de entrega
	Plano de carga para o veículo	Emite a ordem de carregamento e consequente disposição dos pedidos na carga.	Facilitar a descarga na rota em função das sequências de entrega.

Fonte: SANTOS (2008)

3.6.2. Roteirizadores disponíveis e tendência do mercado

HALL e PARTYKA (2008) realizaram um levantamento que apresenta dezoito soluções de roteirizadores presentes no mercado americano, apresentadas nas Tabelas 3.4 e 3.5.

Com base em aspectos analisados sobre a evolução e tendências relacionadas com a aplicação de SRPV nos últimos anos, SANTOS (2008) concluiu que a abordagem central e os objetivos no uso de roteirizadores partiram de sua inserção como elemento fundamental de soluções integradas em logística, especialmente quanto à gestão da cadeia de suprimentos.

Destaca a integração dos SRPV como ferramenta de gestão, com sistemas de informações que integram todos os dados e processos de uma organização em um único sistema. Considera que houve uma busca por uma comunicação ampliada, ágil e eficiente, que possibilitou um melhor gerenciamento da operação e o estreitamento do relacionamento entre empresas, motoristas e clientes.

SANTOS (2008) aponta que somada a essa evolução, o surgimento de novos negócios em função dos problemas de tráfego vêm indicando uma tendência à diminuição das frequências e à dispersão das entregas, sinalizando impactos significativos no modo de operar a roteirização e, por conseguinte, oportunidades para a busca de maior produtividade.

Tabela 3.4: Dados gerais sobre as empresas e seus roteirizadores

Produto	Empresa	Ano de Introdução	Plataforma (**)							Tamanho máximo da aplicação			Nº de Cias Usuárias	Instalações mais significativas	
			Wi	L	U	M	We	A	P	O	Nº de Paradas	Nº de Veículos			Nº de CDs
Descartes Routing & Scheduling	The Descartes Systems Group (*)	1996									+10.000	+100	Ilimitado	501-1000	Arla Foods, Ferrellgas, Home Depot, Samsung, and many others
Direct Route	Applan Logistics Software, Inc.	1996									Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	501-1000	Walgreens, Ryder, Schneider, Kraft, Dunkin Donuts, Haverly's, Kellogg's, National Dairy Holdings, Home Depot, Ruan
DISC	MJC2 Limited	1990									Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	1-100	Todos os nossos clientes operam com grandes frotas e restrições de roteirização específicas e complexas.
ILOG Dispatcher	ILOG, Inc.	1997									Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	1-100	Serviço de campo.
JOpt.SDK	DNA Evolutions										Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	101-500	Navisys (CZ), MacFadyen (US), BlakeIS (US), Mislogistics (UK), Cleardestination (CAN), Synchron (AUS)
Optrak4 Vehicle Routing & Scheduling	Optrak Distribution Software	2002									Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	1-100	3663 First for FoodService, Brakes Group, RH Group, Robert Home
ORTEC Routing and Scheduling	ORTEC	1981									Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	101-500	a.o. Coca-Cola Enterprises, BP, TNT, InBev
Paragon Routing and Scheduling System	Paragon Software Systems, Inc.	1997									20.000	3.000	500	101-500	Airgas, McLane Co; Exel; Ceva; Ryder Canada; Safeway.com; Toyota; Progistix; Canada Cartage
Prophesy Total Transportation System	Prophesy Transportation Solutions	1999									Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	1001+	Mais de 1000 transportadoras e turcking companies and acima de 100 embarcadores e distribuidores de porte médio
PTM Pro Online	Spatial Decisions Support Systems	2003									Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	1-100	Instalações municipais envolvendo escolas. Equivalem a uma instalação de porte estadual.
REACT	MJC2 Limited	1990									Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	1-100	Todos os nossos clientes operam com grandes frotas e restrições de roteirização específicas e complexas.
Roadnet Anywhere	UPS Logistics Technologies	2006									Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	1-100	
Roadnet Transportation Suite	UPS Logistics Technologies	1983									Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	1001+	Anheuser-Busch, Office Depot, Sysco, Mohawk Industries, Apria Healthcare
STARS 5.0	SAITECH, Inc.	1995									Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	101-500	WR Grace, Nihon Oil, NEC, Fujitsu
StreetSync Desktop	RouteSolutions Inc.	2005									Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	1-100	Navteq, Coca-Cola Enterprises, Cintas, Duncan Telcom
The LogiX Suite	Distrib Planning Soft Limited	1985									+ 50.000	999	Ilimitado PC ou Serv	101-500	
TourSolver for MapPoint/MapInfo Pro	Magellan Ingenierie	2002									Depende de restrições de hardware			501-1000	
TruckStops Routing and SchedulingSoftw	MicroAnalytics	1984									Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	1001+	The Home Depot, Owens Corning, Fastenal, C.H.I. Overhead Doors

Fonte: HALL e PARTYKA (2008)

(*) The Descartes Systems Group fornece o software Roadshow

(**) Plataforma: Windows, Linux, Unix, Mac-os, Web, Asp, Paralelo, Outros.

Tabela 3.5: Características dos softwares de roteirização

Produto	Funções de roteirização (*)					Produto faz parte de um pacote que contém						Características especiais(**)				Recursos SIG (***)		
	Roteirização por Arco	Re-roteiriza em tempo real	Programação em tempo real	Informações de tráfego em tempo real	Aceitação Janela de tempo flexível	Display eletrônico on board	Comunicação sem fio com motorista	Rastreamento de veículo em tempo real	Scanner para código de barra	Softw. gestão da cadeia de suprimento Ex.gestão de estoques	Processamento de pedido dos clientes	Instruções turno a turno	Previsão automática de entrega	Manifesto de carga	Plano de carga para o veículo	mostra rotas e paradas no mapa	edita rotas com o recurso “arrasta e solta”	Geocodificação parada pelo endereço
Descartes Routing & Scheduling																		
Direct Route																		
DISC																		
ILOG Dispatcher																		
JOpt.SDK																		
Optrak4 Vehicle Routing & Scheduling																		
ORTEC Routing and Scheduling																		
Paragon Routing and Scheduling System																		
Prophesy Total Transp. System																		
PTM Pro Online																		
REACT																		
Roadnet Anywhere																		
Roadnet Transp.Suite																		
STARS 5.0																		
StreetSync Desktop																		
The LogiX Suite																		
TourSolver for MapPoint/MapInfo Pro																		
TruckStops Routing and Scheduling Softw																		

Fonte: HALL e PARTYKA (2008)

(*) Funções de roteirização: existem três outros itens além dos listados: roteirização por nó; roteirização diária e; análise e planejamento de rotas. Todas as soluções possuem estes atributos;

(**) Características especiais: Todos apresentam o recurso “atribui motoristas individualmente”, ou seja, separa o motorista da vinculação a um veículo.

(***) Recursos SIG (Sistemas de Informações Geográficas)

CAPÍTULO IV

ESTRATÉGIA PROPOSTA PARA A SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE ROTEIRIZAÇÃO E PROGRAMAÇÃO DE VEÍCULOS

4. A ESTRATÉGIA DE SOLUÇÃO PROPOSTA PARA A SOLUÇÃO DO PRPJT

Neste trabalho a estratégia adotada para a resolução do PRPJT utiliza o mapa Auto-Organizável de Kohonen para determinar a estrutura de agrupamento (*clusters*) a ser adotada, quando ocorre a designação do conjunto de pontos (clientes) aos veículos, seguida pela utilização de uma variação do Algoritmo de Etiquetamento Permanente para a resolução do problema PRPJT propriamente dito, cujos testes de avaliação ocorreram no ambiente *Matlab* e fazendo uso de problemas-teste (ou instâncias) de SOLOMON (1987).

A opção pelo uso do mapa Auto-Organizável de Kohonen ocorreu após a verificação da viabilidade e adequação da Rede de Hopfield e da Rede *Backpropagation* como estratégias para a solução do PRPJT. Devido às características dos problemas-teste de SOLOMON, o uso da Rede de Hopfield apresentou-se de difícil implementação, em virtude da complexidade em se definir o vetor de entrada no Matlab, que deve ser representado por sequências de +1 (um positivo) ou -1 (um negativo). Para o teste da estratégia proposta por meio dos problemas-teste de SOLOMON, foi necessário realizar comparativos entre modelos com vetores de entrada considerando 2, 3 ou 4 variáveis de interesse, o que na Rede de Hopfield apresentou-se como um fator de grande dificuldade de implementação. Por outro lado, os problemas-teste de SOLOMON são representados por apenas 56 problemas, número insuficiente para o treinamento e simulação da Rede *Backpropagation*.

Já a Rede de Kohonen se apresentou adequada para ser adotada como parte da estratégia, dadas as características do PRPJT e das instâncias de SOLOMON, conforme descrito a seguir.

4.1. DESCRIÇÃO DAS INSTÂNCIAS DE SOLOMON

Os testes realizados para a verificação da validade da estratégia proposta para a solução do PRPJT utilizaram os problemas-teste propostos por SOLOMON (1987), aqui denominados Instâncias de SOLOMON, os quais se encontram distribuídos em seis conjuntos, conforme apresentado na Tabela 4.1:

Tabela 4.1: Problemas-teste das instâncias de SOLOMON

Conjunto	Problemas-teste	No. de veículos	Capacidades de carga de cada veículo [unidades]
C1	C101 a C109	25	200
C2	C201 a C208	25	700
R1	R101 a R112	25	200
R2	R201 a R211	25	1000
RC1	RC101 a RC108	25	200
RC2	RC201 a RC208	25	1000

*Nota: dados obtidos no endereço eletrônico
<http://www.idsia.ch/~luca/macsvrptw/problems/welcome.htm>*

O autor cita que os dados utilizados para as coordenadas e demandas dos clientes/pontos de atendimento tiveram como referência problemas do conjunto padrão de problemas-teste de roteamento fornecidos por CHRISTOFIDES *et al.* (1979).

Cada problema-teste é constituído por 100 registros e apresenta em seu cabeçalho a identificação do problema, o número de veículos disponíveis e a capacidade de carga de cada veículo, além dos seguintes campos: CUSTOMER (*Cliente*), XCOORD (*Abscissa*), YCOORD (*Ordenada*), DEMAND (*K*), READY_TIME (*A*), DUE_DATE (*B*) e SERVICE_TIME (*S*).

A Tabela 4.2 apresenta alguns registros do Problema-teste C101.

Tabela 4.2: Registros do Problema-teste C101 de SOLOMON (1987)

C101						
VEHICLE						
NUMBER	CAPACITY					
25	200					
CUSTOMER	XCOORD	YCOORD	DEMAND	READY_TIME	DUE_DATE	SERVICE_TIME
0	40	50	0	0	240	0
1	25	85	20	145	175	10
2	22	75	30	50	80	10
3	22	85	10	109	139	10
4	20	80	40	141	171	10
5	20	85	20	41	71	10
6	18	75	20	95	125	10
7	15	75	20	79	109	10
8	15	80	10	91	121	10
9	10	35	20	91	121	10
10	10	40	30	119	149	10
...
99	26	35	15	77	107	10
100	31	67	3	180	210	10

Esses problemas-teste foram gerados para enfatizar diversos fatores que podem ter influência no comportamento de heurísticas para o roteamento e programação de veículos, tais como: aspectos geográficos e de distribuição dos pontos a serem atendidos; número de clientes atendidos por um veículo; características das janelas de tempo, tamanho e posição das janelas de tempo, assim como porcentagem de clientes com restrição de horário de atendimento.

Os conjuntos de problemas-teste R1 e R2 tiveram seus dados geográficos gerados aleatoriamente, a partir de uma distribuição uniforme. Os conjuntos denominados C1 e C2 apresentam as localizações geográficas agrupadas, enquanto os conjuntos denominados RC1 e RC2 apresentam as localizações geográficas semi-agrupadas, isto é, decorrentes de uma combinação de dados randômicos e agrupados.

O horizonte de programação adotado pelo autor para os conjuntos R1, C1 e RC1 é para um período de curta duração, no qual o horário de retorno à base atua como uma restrição de capacidade, a qual restringe o número de clientes e a carga por veículos, assim como uma restrição de capacidade dos veículos.

A Figura 4.1 exemplifica a variação das janelas de tempo dos clientes na instância C104.

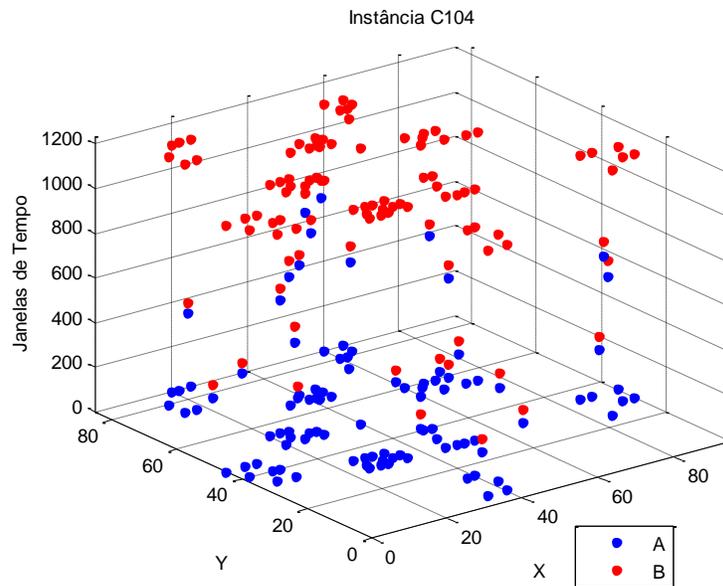


Figura 4.1: Coordenadas e Janelas de Tempo na Instância C104

Para os conjuntos R2, C2 e RC2 a jornada adotada foi a de maior duração, representada pelo horário de retorno à base (extremo superior da janela de tempo), e a capacidade dos veículos também foi ampliada, permitindo um maior número de clientes atendidos pelo mesmo veículo.

Os problemas-teste foram gerados considerando a variação das janelas de tempo quanto à sua duração, para diferentes porcentagens de clientes, sendo gerados problemas com 25, 50, 75 e 100% dos clientes com janelas de tempo.

A Figura 4.2 apresenta a variação das janelas de tempo na instância R206.

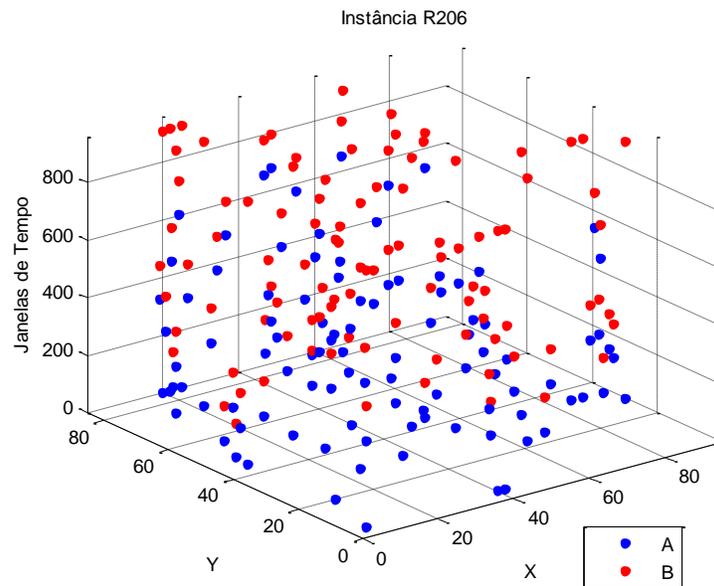


Figura 4.2: Coordenadas e Janelas de Tempo na Instância R206

No trabalho apresentado por SOLOMON (1987) foram consideradas a minimização do número de roteiros e da distância total percorrida para as 56 instâncias do problema, geradas para os seis conjuntos de problemas-teste.

4.2. O MAPA AUTO-ORGANIZÁVEL DE KOHONEN

O princípio fundamental da Rede Neural de Kohonen baseia-se na simulação da atividade cerebral, na qual o arranjo das células nervosas corticais decorre de estímulos recebidos por sensores ligados às mesmas, formando centros de atividades mais intensos, de acordo com as atividades no momento. Por esse princípio, as ligações que produzem respostas mais eficientes são aquelas que são reforçadas.

FAUSETT (1994) apresenta o mapa Auto-Organizável como uma Rede Neural de treinamento não supervisionado, cuja estrutura topológica apresenta r unidades de neurônios denominados

protótipos, arranjados, usualmente, em um mapa de dimensão 1, 2 ou 3, e v vetores de dimensão s que representam os sinais de entrada.

Para cada agrupamento é associado um neurônio, cujo vetor peso é tido como modelo padrão. JAIN *et al.* (1999) recomendam a normalização dos padrões de entrada da Rede de Kohonen, padronizando-os de forma a evitar discrepâncias entre e dentre os vetores de entrada.

O *Matlab* oferece três opções de representação de topologia para a organização dos neurônios. A topologia *gridtop* na qual os neurônios são arranjados na forma quadrada, a topologia *hextop* apresenta os neurônios na forma hexagonal, enquanto na topologia *randtop* os neurônios são arranjados numa topologia aleatória.

A Figura 4.3 apresenta um exemplo das formas de vizinhança utilizadas para uma Rede de Kohonen, que contém 25 neurônios e 1 entrada apresentada à rede.

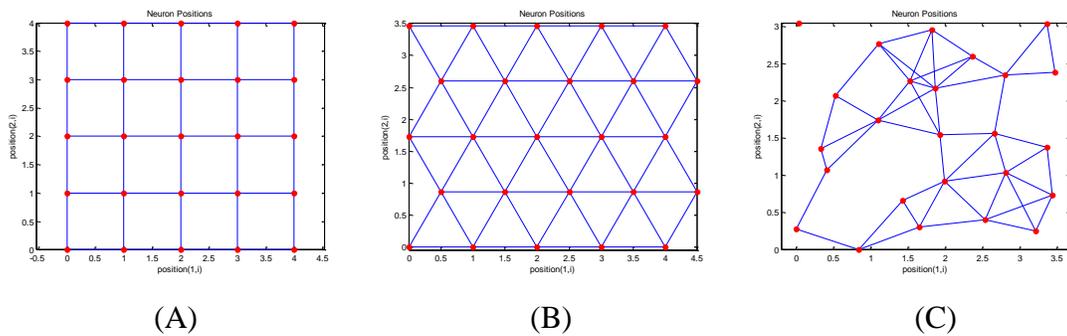


Figura 4.3: Representação das topologias utilizadas para representação de uma Rede de Kohonen: Quadrada (A), Hexagonal (B) e Aleatória (C)

No treinamento da Rede de Kohonen a distância Euclidiana de cada neurônio é calculada relativamente ao padrão de entrada, e o i -ésimo neurônio vencedor tem os pesos atualizados, assim como sua vizinhança V_i , mesmo que a mesma não possua os pesos próximos ao padrão de entrada.

SIQUEIRA (2005) apresenta o algoritmo para a Rede de Kohonen unidimensional ou bidimensional com r neurônios, com entrada aleatória dos padrões, que segue os seguintes passos:

Passo 1: Inicie os r neurônios da rede com os pesos w_{ij} , gerados aleatoriamente a partir de uma distribuição Uniforme $[0, 1]$. Faça $t = 1$, determine os valores iniciais do raio da vizinhança R e da taxa de aprendizagem α . Escolha um critério de parada, e vá para o Passo 2.

Passo 2: Encontre um padrão de entrada k ainda não apresentado à rede na iteração t , onde $k \in (0, v]$. Se todos os padrões já foram apresentados na iteração t , faça $t = t + 1$, e vá ao Passo 5. Caso contrário, apresente à rede a entrada p_k , e vá para o Passo 3.

Passo 3: Determine o neurônio i que possui a menor distância Euclidiana do peso w com o vetor de entrada p_k .

$$d_i = \sum_{j=1}^s (p_{kj} - w_{ij}(t))^2, \text{ para } i = 1, \dots, r.$$

Este neurônio é denominado vencedor, e denotado por i^* . Vá para o Passo 4.

Passo 4: Ajuste os pesos do neurônio vencedor e dos neurônios pertencentes à vizinhança $V_{i^*}(t)$ centrada no mesmo:

$$w_{ij}(t + 1) = w_{ij}(t) + \alpha(t) \Lambda_{ii^*} [p_{kj} - w_{ij}(t)], \text{ para } j = 1, \dots, s \text{ e } i \in V_{i^*}(t).$$

Vá para o Passo 2.

Passo 5: Calcule o erro do mapa, ajuste a taxa de aprendizagem α e o raio de vizinhança R .

Se o critério de parada for satisfeito, pare. Caso contrário, volte ao Passo 2.

SIQUEIRA (2005) destaca que a função Λ é uma forma de ajustar a vizinhança dos neurônios vencedores e que usualmente é definida de duas formas. Sendo a função de vizinhança discreta, Λ é expressa por:

$$\Lambda_{ii^*}(t) = \begin{cases} 1, & \text{se } i \in V(i^*) \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4.1)$$

No caso da função de vizinhança ser Gaussiana, Λ é expressa por:

$$\Lambda_{ii^*}(t) = \exp\left(-d_{ii^*}^2 / 2R(t)^2\right), \quad (4.2)$$

onde $R(t)$ representa o raio topológico no mapa, que decresce com o tempo (iterações), e d_{ii^*} representa a distância topológica entre os neurônios i e i^* .

O processo de redução iterativo da função de vizinhança de uma cobertura total do mapa a uma vizinhança de raio zero, onde é atualizado somente o neurônio vencedor, ocorre de acordo com a seguinte expressão:

$$R(t) = R(0) \cdot \exp\left(\frac{-t}{1000/\log(R(0))}\right) \quad (4.3)$$

A atualização da taxa de aprendizagem do mapa de Kohonen é exponencial, tem início com $\alpha(0) < 1$, decaindo a valores próximos de zero, ocorre de acordo com a seguinte expressão:

$$\alpha(t) = \alpha(0) \cdot \exp\left(\frac{-t}{1000}\right) \quad (4.4)$$

O treinamento de uma Rede de Kohonen é finalizado quando um dos seguintes critérios de parada é atendido: o erro mínimo desejável é alcançado, ocorre o número máximo de iterações ou o valor mínimo para a taxa de aprendizagem é observado.

Na primeira fase do algoritmo da Rede de Kohonen observa-se uma competição entre os neurônios da camada de saída, resultando em um neurônio vencedor que atenda ao critério estabelecido, que em geral é a distância Euclidiana. Em seguida, observa-se uma fase cooperativa entre os neurônios, quando é definida a vizinhança do neurônio vencedor. Por fim, os pesos do neurônio vencedor e de sua vizinhança são ajustados, caracterizando esta fase final como adaptativa.

A Tabela 4.3 apresenta três medidas para representar a qualidade do mapa Auto-Organizável de Kohonen (SIQUEIRA, 2005):

Tabela 4.3: Medidas utilizadas para representar a qualidade do SOM

Erro de Quantização	Erro Médio Quadrático	Erro Topológico
$E_Q = \frac{1}{v} \sum_{k=1}^v \ p_k - w_k^*\ $	$E_{MQ} = \frac{1}{v} \sum_{k=1}^v \ p_k - w_k^*\ ^2$	$E_T = \frac{1}{v} \sum_{k=1}^v u_k$
v: quantidade de padrões de entrada apresentados ao mapa w_k^* : vetor peso do neurônio vencedor para o padrão p_k		$u_k = \begin{cases} 1, & \text{se } i^{**} \notin \bar{V}_i \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$

O Erro de Quantização e o Erro Médio Quadrático são duas formas de representar o erro médio correspondente à diferença entre os vetores dos padrões de entrada e os respectivos pesos de seus neurônios vencedores.

O Erro Topológico mede o quanto o mapa aproxima os padrões de entrada aos vetores peso próximos, representando o percentual de neurônios vencedores que não possuem o segundo vencedor (i^{**}) para o padrão k em uma vizinhança \bar{V}_{i^*} de raio unitário centrada no neurônio vencedor.

4.2.1. A Matriz de Distância Unificada: U-matriz

Segundo SIQUEIRA (2005), a representação denominada U-matriz, ou matriz de distância unificada, é a mais utilizada para visualização de mapas Auto-Organizáveis. Foi criada por Ultsch e consiste numa representação topológica das relações entre os neurônios do mapa, utilizando o mesmo tipo de distância da fase de treinamento.

Na U-matriz são representados os neurônios do mapa, assim como as distâncias intermediárias entre os neurônios do mapa original por meio de cores, de acordo com os coeficientes do vetor peso de cada neurônio. A Figura 4.4 exemplifica as distâncias entre neurônios vizinhos.

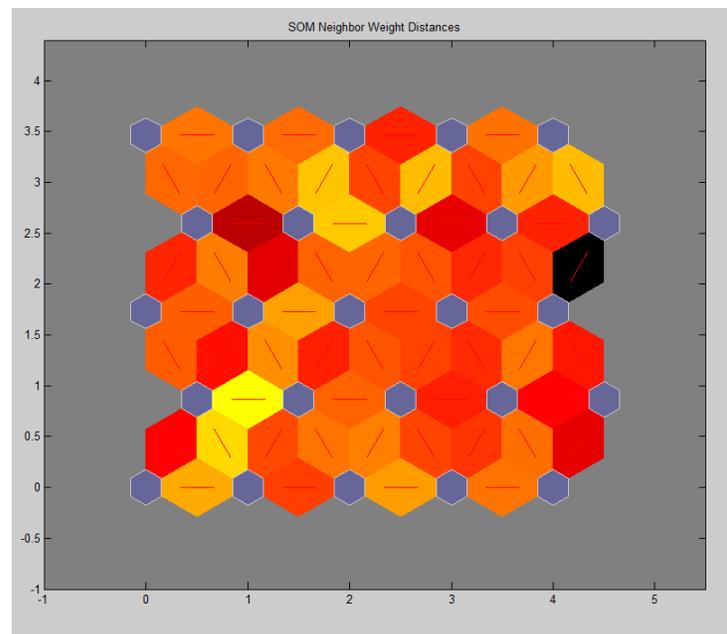


Figura 4.4: Representação agrupamentos de Mapas Auto-Organizáveis por meio da U-matriz

O código de cores da Figura 4.4 tem a seguinte representação: os hexágonos azuis representam os neurônios; as linhas vermelhas conectam os neurônios vizinhos; as cores das regiões contendo as linhas vermelhas indicam as distâncias entre os neurônios, sendo que as cores mais escuras representam as distâncias maiores, enquanto as cores mais claras representam as distâncias menores.

A U-matriz também pode ser representada pela medida de distanciamento para cada neurônio, denominada U-altura, que apresenta valores altos para neurônios que se distanciam muito dos vizinhos imediatos, ou valores baixos para neurônios com vizinhos próximos que contém vetores-peso similares.

$$U - altura(i) = \sum_{j \in V_i} \|w_i - w_j\| \quad (4.5)$$

Outra representação possível do Mapa Auto-Organizável é apresentada na Figura 4.5, que mostra como muitos dos dados de treinamento estão associados a cada um dos neurônios (centros de cluster), representados por hexágonos. A topologia é uma grade de 5 por 5, havendo, portanto 25 neurônios, onde o número máximo de acertos associada a qualquer neurônio é 10, representando que há 10 vetores de entrada nesse cluster.

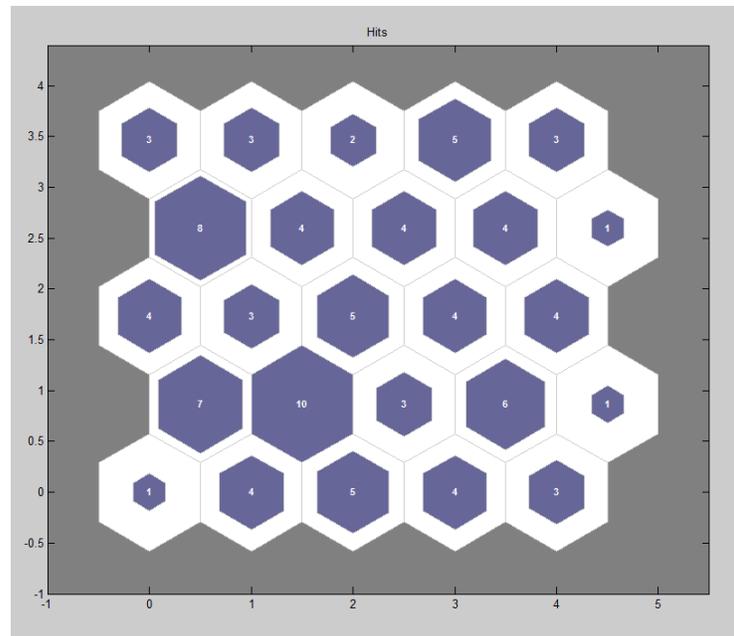


Figura 4.5: Amostras de Sucesso do Mapa Auto-Organizável

A Figura 4.6 apresenta o mapa bidimensional com as localizações do vetor de entrada (100 pontos) e a distribuição dos vetores de peso de 25 neurônios, após 200 iterações do algoritmo desenvolvido no ambiente *Matlab*.

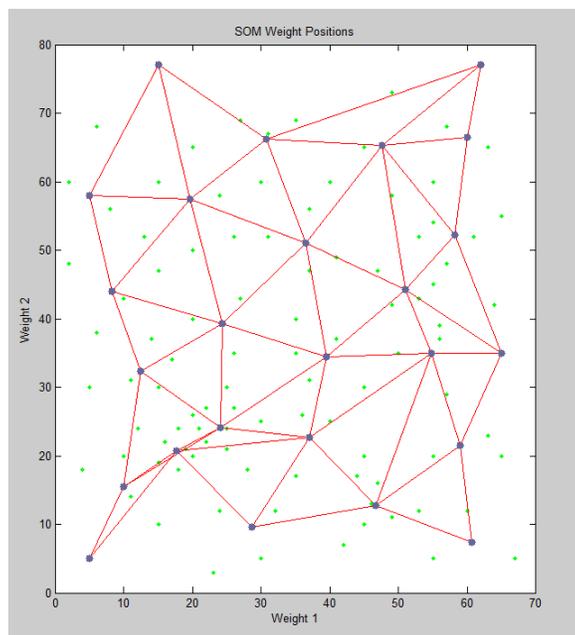


Figura 4.6: Posições dos Neurônios do Mapa Auto-Organizável

4.2.2. Designação dos clientes aos clusters utilizando o mapa Auto-Organizável

O procedimento adotado para a etapa de Designação dos clientes aos agrupamentos tem início com a padronização das variáveis componentes do *input* para o mapa Auto-Organizável de Kohonen.

Vale destacar que devido ao fato da avaliação da estratégia de solução proposta neste trabalho ter sido realizado com o uso do *Matlab*, a descrição dos passos adotados terá no ambiente desse *software* sua referência descritiva.

Inicialmente, foram consideradas três possibilidades para a composição do vetor de entrada da rede:

- a primeira considera apenas as coordenadas dos clientes, onde $P = [\text{Abscissas}, \text{Ordenadas}]$;
- a segunda considera as coordenadas e o limite superior para o início do atendimento dos clientes, onde $P = [\text{Abscissas}, \text{Ordenadas}, B]$;
- a terceira considera as coordenadas e os limites inferior e superior para o início do atendimento dos clientes, onde $P = [\text{Abscissas}, \text{Ordenadas}, A, B]$.

O passo seguinte refere-se à escolha dos parâmetros que determinam o número de neurônios a serem utilizados no mapa Auto-Organizável. Inicialmente, o critério adotado decorre da limitação imposta pela própria instância do problema-teste quanto à capacidade de carga de cada veículo, relativamente ao total de carga dos clientes.

Por exemplo, na instância R103 a carga total dos clientes é de 1458 unidades, sendo que cada veículo tem capacidade máxima para transportar 200 unidades. O resultado direto indicaria que seriam necessários 7,29 veículos para transportarem toda a carga.

Assim, os parâmetros que definem o número de neurônios, d_1 e d_2 , recebem, inicialmente, os valores cujo produto resulte em oito neurônios. Poder-se-ia, por exemplo, iniciar a parametrização da rede com $d_1 = 4$ e $d_2 = 2$.

De acordo com o resultado alcançado comparativamente a resultados já obtidos por outros autores, procede-se à variação desses parâmetros.

O passo seguinte refere-se à escolha dos parâmetros e decorre da seguinte sintaxe do *Matlab*:

$$net = newsom(P, [d_1, d_2, \dots], tfcn, dfcn, steps, in),$$

onde:

- P é uma matriz de dimensão $R \times Q$ constituída pelas variáveis de entrada;
- d_i representa a dimensão da i -ésima camada, $defaults = [5 \ 8]$;
- $tfcn$ representa o parâmetro relativo à topologia da rede, que pode ser hexagonal, ser um *grid*, ou ser aleatória, $default = 'hextop'$;
- $dfcn$ representa a função distância, $default = 'linkdist'$;
- $steps$ representa o número de passos para a vizinhança alcançar dimensão 1, $default = 100$;

- *in* representa o tamanho inicial da vizinhança de cada neurônio, *default* = 3.

O resultado é o mapa Auto-Organizável para o problema em questão.

As medidas disponibilizadas no *Matlab* para o cálculo das distâncias entre os neurônios são assim definidas:

- *dist*: calcula a distância Euclidiana entre os neurônios.
- *linkdist*: calcula o número de ligações, ou passos, que existem entre dois neurônios.
- *mandist*: calcula a distância de Manhattan entre dois neurônios.
- *boxdist*: calcula a distância da vizinhança “diametral” de um neurônio relativamente aos demais.

Para cada instância sob análise há diversas opções de parametrização, dada a sensibilidade apresentada pela Rede de Kohonen quando da variação desses parâmetros.

Vale destacar que o vetor de entrada *P* apresentou-se como o mais importante definidor do nível de resposta da Rede de Kohonen para a estratégia adotada neste trabalho.

De acordo com a escolha de *P*, a resposta alcançada com a designação dos clientes aos neurônios, seguida da estratégia alternativa ao AEP para a programação dos veículos no atendimento às demandas apresentadas em cada instância de SOLOMON (1987), apresentou resultados superiores ou inferiores aos estudos comparativos.

A Figura 4.7 apresenta o pseudocódigo utilizado na programação realizada no ambiente *Matlab* para o mapa Auto-Organizável de Kohonen, em atendimento à primeira etapa da estratégia proposta apresentada neste trabalho.

```

programa SOM // Rede de Kohonen //
// Dados de entrada //
    Número de veículos disponíveis
    Capacidade  $k$  dos veículos
// Variáveis //
    Cientes: identificação dos clientes
    X: indicação das abscissas dos clientes
    Y: indicação das ordenadas dos clientes
    K: identificação das cargas a serem coletadas em cada cliente
    A: horário mais cedo para início do atendimento em cada cliente
    B: horário mais tarde para início do atendimento em cada cliente
    S: tempo necessário para o atendimento em cada cliente
1. Início // SOM_AEP //
2.    $Pz \leftarrow P$  // normalize as variáveis que compõem o vetor P de entrada da rede //
3.   rede  $\leftarrow$  rede_som(parâmetros) // parametrize a rede //
4.   rede.treinamento.epochs  $\leftarrow$  num_epochs // defina as épocas para treinamento da rede //
5.   rede.treinamento.alvo  $\leftarrow$  parâmetros_alvo // defina parâmetros alvo para treinamento //
6.   rede  $\leftarrow$  treinamento(rede,P) // inicie o treinamento da rede //
7.   para todos os clientes i faça
8.     Calcular a distância Euclidiana de cada neurônio a cada cliente
9.   fim
10.  para todos os clientes i faça
11.    Designar cada cliente ao neurônio mais próximo para a composição dos grupos
12.  fim
13.  para todos os clientes i faça
14.    Calcular o número de elementos em cada grupo
15.  fim
16. fim

```

Figura 4.7: Pseudocódigo para o mapa Auto-Organizável de Kohonen

4.3. O ALGORITMO DE ETIQUETAMENTO PERMANENTE

DESROCHERS e SOUMIS (1988) definiram o problema de caminho mínimo com janela de tempo (PCMJT) como o de encontrar o caminho de menor distância entre um nó de origem e um nó de destino, respeitando-se as restrições de janela de tempo em cada um dos nós do caminho.

Para a solução desse problema propuseram o Algoritmo de Etiquetamento Permanente (AEP), que se baseia no conceito de *buckets* generalizados e numa regra de seleção de etiqueta a ser

tratada, a partir da execução de um teste de dominação, no qual o custo de uma etiqueta gerada é comparado ao custo mínimo de todas as etiquetas já tratadas para o nó destino. Considerando que os tempos de viagem são não negativos, se o custo do caminho associado à etiqueta gerada for maior que o custo mínimo dentre as etiquetas já tratadas, essa etiqueta gerada será dominada. Os princípios conceituais do AEP são apresentados a seguir.

4.3.1. Caminho de dominação de etiquetas

Seja P_{sj} um caminho do nó de origem s a um nó j . A cada caminho P_{sj} satisfazendo as restrições de janela de tempo e capacidade de veículo, é associada uma etiqueta bi-dimensional (hora, custo) que identifica a hora de início de atendimento do nó k (T_j) e o custo (ou distância) total acumulado no caminho até j (C_j), respectivamente. Tais etiquetas são genericamente representadas por (T_j^k, C_j^k) e indicam as características do k -ésimo caminho s a j . O índice k pode ser suprimido quando o contexto não apresentar ambiguidade.

Tais etiquetas são calculadas iterativamente ao longo do caminho $P_{sj} = \{i(0), i(1), i(2), \dots, i(L)\}$, onde $i(0) = s$ e $i(L) = j$, como segue:

$$T_{i(0)} = 0, C_{i(0)} = 0$$

$$T_{i(l)} = \max\{a_{i(l)}, T_{i(l-1)} + s_{i(l-1)} + t_{i(l-1),i(l)}\}, \quad l = 1, 2, \dots, L$$

$$C_{i(l)} = C_{i(0)} + C_{i(l)} \quad l = 1, 2, \dots, L$$

onde

$$a_{i(l)} = \text{horário de início de atendimento em } i(l);$$

$$s_{i(l-1)} = \text{tempo de atendimento em } i(l);$$

$$t_{i(l-1),i(l)} = \text{tempo de viagem entre os nós } i(l-1) \text{ e } i(l)$$

$$c_{i(l-1),i(l)} = \text{custo da ligação entre os nós } i(l-1) \text{ e } i(l)$$

O conceito de dominação entre etiquetas é assim definido: sejam P^1 e P^2 dois caminhos diferentes entre s e j , com etiquetas (T^1, C^1) e (T^2, C^2) , respectivamente. Diz-se que P^1 domina P^2 se e somente se $(T^2, C^2) - (T^1, C^1) > (0, 0)$ e $(T^1, C^1) \neq (T^2, C^2)$. Uma dada etiqueta (T, C) de um dado nó j é dita eficiente caso a mesma não seja dominada por nenhuma outra etiqueta de j . Um caminho P_{sj} é dito eficiente caso a sua etiqueta correspondente seja eficiente.

A relação de dominação entre etiquetas não corresponde a uma ordenação completa entre elas e nem possibilita que todos os caminhos sejam ordenados. Entretanto, essa dominação permite concluir que o caminho eficiente P_{sj} corresponde ao caminho de menor custo, iniciando atendimento no nó j no horário T_j ou anterior, o que implica a existência de inúmeros caminhos eficientes para cada nó.

O pseudo-código do AEP para o PCMJT é apresentado a seguir:

Passo 1: Inicialização

$$P_i = \begin{cases} \{(0,0)\} & i = s \\ \emptyset, \forall i \in N, i \neq s \end{cases}$$

$$Q_i = \emptyset, \forall i \in N, i \neq s$$

onde P_i é o conjunto de etiquetas permanentes do nó i e Q_i é o conjunto de etiquetas candidatas (não tratadas) do nó i .

Passo 2: Encontrar o bucket corrente

Encontrar $F(Q)$ que corresponde à etiqueta (T_j^k, C_j^k) de mínimo custo lexicográfico do conjunto $Q = \bigcup_{i \in N} (Q_i - P_i)$. Se $Q = \emptyset$, parar.

Passo 3: Selecionar a etiqueta seguinte a ser tratada

Selecionar um elemento de $B(Q)$. Se $B(Q) = \emptyset$, então vá para o Passo 2.

Passo 4: Tratamento da etiqueta (T_j^k, C_j^k)

Para todos os sucessores j do nó i faça

Início

se $T_i^k + s_i + t_{ij} \leq b_j$, (janela de tempo satisfeita), então

calcular (T_j^k, C_j^k)

Adicioná-la ao conjunto Q_j caso (T_j^k, C_j^k) não seja dominada

Fim

$$P_i = P_i \cup \{(T_i^k, C_i^k)\}$$

Volte para o Passo 3.

4.4 A ESTRATÉGIA DE SOLUÇÃO PROPOSTA: SOM E HEURÍSTICA ALTERNATIVA DO AEP PARA A SOLUÇÃO DO PRPJT

A heurística proposta de variação do AEP decorre do seguinte argumento: dado o atendimento à janela de tempo por um conjunto de etiquetas, a dominação ocorre somente em função do menor custo (ou distância), privilegiando não o par (T_j^k, C_j^k) , mas (C_j^k) . A abordagem alternativa ao AEP surgiu de forma intuitiva ao se pensar que com o estabelecimento da relação de dominância entre os *buckets*, o atendimento à restrição da janela de tempo seria a função primordial da variável T , deixando para a variável custo o papel de definir a programação dos veículos.

A heurística proposta para a programação dos veículos utiliza como entrada as variáveis que caracterizam a instância em estudo, a variável (grupo) que apresenta a designação dos clientes aos grupos (neurônios), assim como o número de agrupamentos que foram compostos (números de neurônios) e a quantidade de clientes por grupo.

Na composição dessa nova base de dados, deve-se proceder à ordenação crescente dos grupos e, dentro de cada grupo, à ordenação crescente da variável B , que indica o limite superior para o início do atendimento dos clientes.

A heurística estabelece que, em cada agrupamento, a programação dos veículos aos clientes ocorra garantindo o atendimento às restrições das janelas de tempo e à capacidade de carga do veículo, e que a ordem de atendimento seja estabelecida mediante a indicação de menor distância (custo).

Definida a programação dos veículos em cada agrupamento, calculam-se as distâncias percorridas por cada veículo e a distância total percorrida para atendimento à instância em estudo.

A Figura 4.8 apresenta o pseudocódigo para a heurística alternativa proposta para a programação dos veículos, após a designação realizada pelo mapa Auto-Organizável.

programa Heurística alternativa ao AEP

// Compor uma base de dados com as variáveis (grupo, clientes, X, Y, K, A, B, S) segundo o grupo e no horário mais tarde para início do atendimento em cada cliente //

```
1.   para l = 1 até w faça // Algoritmo de caminho mínimo com janelas de tempo em cada grupo //
2.     I ← 1
3.     se l = 1 faça // identifica a última posição de cada cliente no respectivo grupo //
4.       h ← 2
5.       r ← nc(l)
6.     senão faça
7.       h ← r + 1
8.       r ← h + nc(l)-1
9.     fim
10.    enquanto contador < nc(l) faça
11.      para j = h até r faça
12.        se Carteiro(j) = 0 faça
13.          i ← I
14.          T(j) ← Ti(i) + S(i) + D(i,j)
15.          Carga(j) ← Cargai(i) + K(j)
16.          se T(j) < B(j) e Carga(j) < k faça
17.            T(j) ← max(T(j),A(j))
18.            Custo(j) ← Custoi(i) + D(i,j)
19.          fim
20.        fim
21.      fim
22.      Custo(l) ← Inf
23.      Indicação do cliente I com custo mínimo ← min(Custo)
24.      Xd(I) ← Abs(I)
25.      Yd(I) ← Ord(I)
26.      Ti(I) ← T(I)
27.      Custoi(I) ← Custo(I)
28.      Custo(I) ← Inf
29.      Cargai(I) ← Carga(I)
30.      Carteiro(I) ← Cluster(I)
31.      Atendimentos(I) ← Atendimento + 1
32.      Atendimento ← Atendimentos(I)
33.      Contador ← Contador + 1
34.    fim
35.    Atendimento ← 0
36.    Contador ← 0
37.    Custoi(1) ← 0
38.  fim // AEP //
39. fim // SOM_AEP //
```

Figura 4.8: Pseudocódigo para a heurística alternativa proposta

CAPÍTULO V

TESTES COMPUTACIONAIS PARA A ESTRATÉGIA PROPOSTA

Neste Capítulo são apresentados os testes computacionais realizados no ambiente *Matlab* em problemas-teste de SOLOMON (1987), para avaliação da alternativa de solução proposta para problemas de roteirização e programação de veículos com frota homogênea.

A estratégia proposta é baseada no uso do mapa Auto-Organizável de Kohonen para a determinação de agrupamentos de clientes, associada à heurística alternativa ao Algoritmo do Etiquetamento Permanente para a definição da programação dos veículos.

O primeiro passo dado neste sentido foi aplicar a estratégia em alguns problemas-teste, com o objetivo de identificar diferenças que poderiam ocorrer nos resultados devido à variação da parametrização para o treinamento da Rede de Kohonen.

A Tabela 5.1 apresenta alguns resultados decorrentes da variação dos parâmetros no ambiente *Matlab* para a definição do mapa Auto-Organizável de Kohonen.

Para cada problema-teste relacionado, foi verificada a distância total percorrida pelos veículos, em função da variação vetor de entrada \mathbf{P} , das topologias (*tfcn*) hexagonal e quadrática, assim como das opções de medidas de distâncias entre os neurônios (*dfcn*) disponíveis no *Matlab*.

Tabela 5.1: Resultados da estratégia proposta nos problemas-teste relacionados

<i>P</i>	<i>tfcn</i>	<i>dfcn</i>	C104	C204	R103	R206	RC104	RC202
$[X_2, Y_2, A_2, B_2]$	<i>hextop</i>	<i>dist</i>	1.485,90	1.659,70	2.007,45	2.658,20	2.346,03	2.943,18
		<i>boxdist</i>	1.409,98	1.668,67	1.871,61	2.716,97	2.040,27	2.908,62
		<i>linkdist</i>	1.474,92	1.655,25	1.951,60	2.577,26	2.009,47	2.778,26
		<i>mandist</i>	1.478,16	1.741,46	1.952,75	2.716,97	2.004,00	2.778,26
	<i>gridtop</i>	<i>dist</i>	1.625,35	1.737,34	1.963,48	2.729,42	2.231,18	2.638,98
		<i>boxdist</i>	1.445,52	1.835,19	1.963,28	2.658,20	2.323,43	2.857,34
		<i>linkdist</i>	1.327,90	1.649,68	1.874,29	2.675,20	2.213,90	2.922,31
		<i>mandist</i>	1.417,32	1.685,02	1.986,53	2.665,71	1.964,10	2.777,22
$[X_2, Y_2, B_2]$	<i>hextop</i>	<i>dist</i>	1.700,96	1.694,32	1.753,49	2.101,53	2.064,35	2.726,55
		<i>boxdist</i>	1.612,45	1.889,24	1.651,41	2.552,60	1.962,02	2.383,52
		<i>linkdist</i>	1.760,63	1.757,50	1.769,74	2.101,53	1.935,00	2.648,12
		<i>mandist</i>	1.626,46	1.769,06	1.842,29	2.101,53	2.036,07	2.635,14
	<i>gridtop</i>	<i>dist</i>	1.723,97	1.773,05	1.818,30	2.101,53	2.002,35	2.304,11
		<i>boxdist</i>	1.737,56	1.684,48	1.871,21	2.216,00	2.099,16	2.374,55
		<i>linkdist</i>	1.721,65	1.793,14	1.765,13	2.503,28	2.087,36	2.479,38
		<i>mandist</i>	1.550,38	1.775,97	1.863,02	2.101,53	1.927,30	2.643,51
$[X_2, Y_2]$	<i>hextop</i>	<i>dist</i>	1.185,46	1.433,38	1.564,61	1.594,99	1.534,96	1.805,76
		<i>boxdist</i>	1.122,33	1.486,91	1.611,76	1.578,41	1.579,43	1.784,84
		<i>linkdist</i>	1.180,93	1.557,49	1.510,48	1.594,89	1.527,76	1.861,40
		<i>mandist</i>	1.161,31	1.575,29	1.577,74	1.588,64	1.507,49	1.731,59
	<i>gridtop</i>	<i>dist</i>	1.132,59	1.504,50	1.524,09	1.587,01	1.483,34	1.819,39
		<i>boxdist</i>	1.196,83	1.641,11	1.470,86	1.556,86	1.452,90	1.781,67
		<i>linkdist</i>	1.091,31	1.575,29	1.462,75	1.522,34	1.478,07	1.601,14
		<i>mandist</i>	1.111,02	1.575,29	1.594,42	1.583,86	1.448,91	1.743,92

A partir dos resultados apresentados na Tabela 5.1 é possível concluir que a diferença alcançada nos resultados devido à variação da matriz de entrada P é estatisticamente significativa.

Isto representa que há evidência estatística (vide Tabela 5.2, $P\text{-value} \cong 0$) de que melhores resultados são alcançados quando a matriz de entrada é composta apenas pelas coordenadas das instâncias analisadas, isto é, para $P = [X_z, Y_z]$.

Quando a matriz de entrada foi ampliada para $P = [X_z, Y_z, B_z]$ e $P = [X_z, Y_z, A_z, B_z]$ os resultados alcançados não resultaram em melhoria, conforme apresentado na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Análise de Variância de resultados apresentados em problemas-teste

Fonte	Soma de Quadrados	G.L.	Quadrado Médio	F	Prob>F ($P\text{-value}$)
P	10056765.3	2	5028382.6	34.52	0
$TFCN$	2047.9	1	2047.9	0.01	0.9058
$DFCN$	12505.1	3	4168.4	0.03	0.9934
$P* TFCN$	11531.3	2	5765.7	0.04	0.9612
$P* DFCN$	54705.9	6	9117.7	0.06	0.9990
$TFCN * DFCN$	14692.5	3	4897.5	0.03	0.9917
Error	18354645.9	126	145671.8		
Total	28506893.9	143			

Esse resultado indica que a contribuição do mapa Auto-Organizável na solução da estratégia adotada está associada ao agrupamento dos clientes em função das coordenadas dos problemas-teste, cabendo à heurística alternativa ao AEP o papel de determinar a programação dos veículos.

Ainda considerando a Análise de Variância apresentada na Tabela 5.2, é possível concluir que, fixados os parâmetros de treinamento da Rede de Kohonen denominados *steps* (número de passos para a vizinhança alcançar dimensão 1) e *in* (vizinhança inicial dos neurônios), não há evidência estatística de que para os problemas-teste analisados os resultados variam (em média) em virtude das topologias: hexagonal ou quadrada.

Também não foi detectada diferença significativa nos resultados quando da variação das medidas de distâncias dos neurônios (*dist*, *boxdist*, *linkdist* ou *mandist*), tampouco quando foram identificadas variações devido às interações dos efeitos $P^* TFCN$, $P^* DFCN$, $TFCN * DFCN$.

Essa informação orientou a composição paramétrica utilizada na análise realizada em 30 instâncias propostas por SOLOMON (1987), dada a grande possibilidade de variação do espaço paramétrico.

Alguns resultados factíveis alcançados para as instâncias C104, R103, R201 e RC202 são apresentados na Figura 5.1.

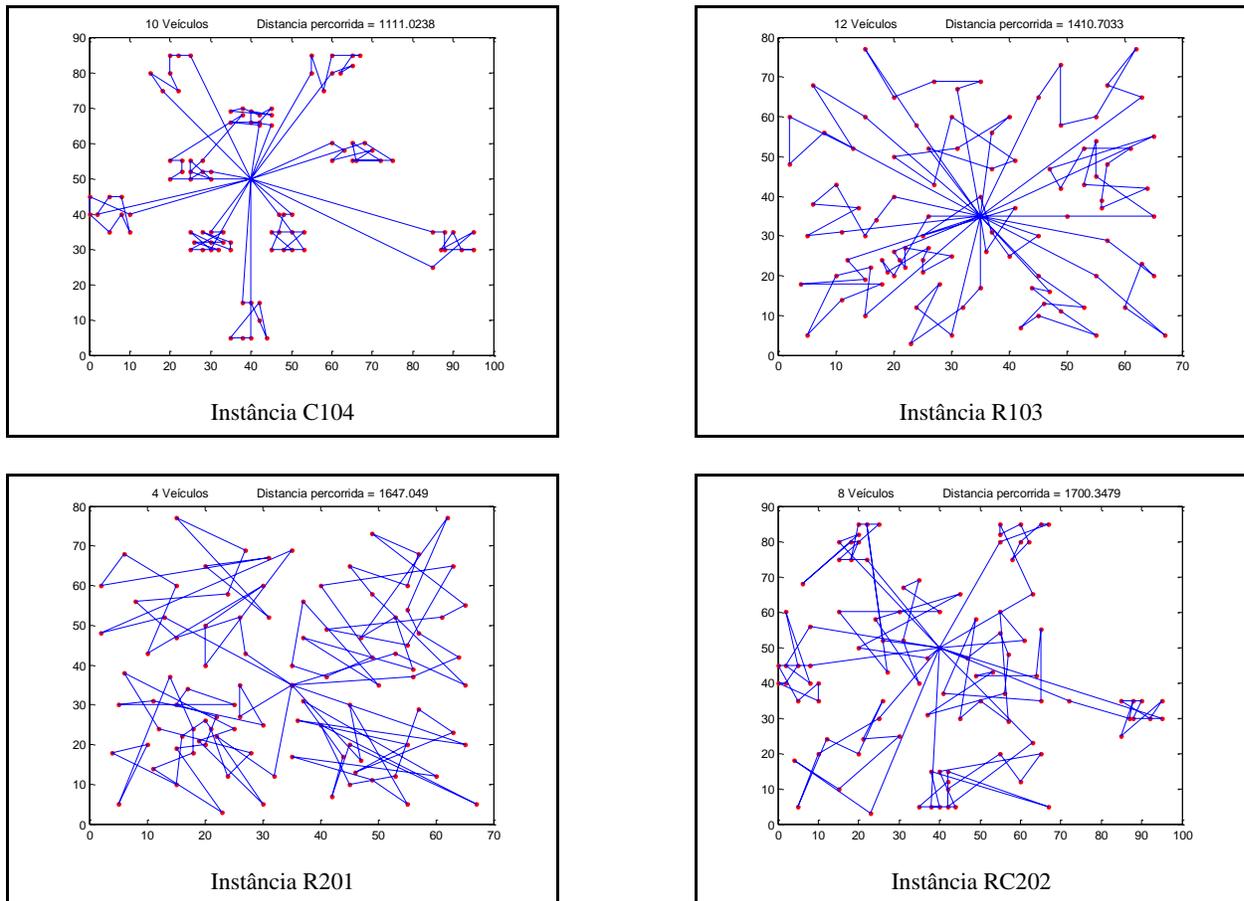


Figura 5.1: Soluções factíveis encontradas para as instâncias C104, R103, R201 e RC202

Os resultados obtidos com a estratégia de solução proposta neste trabalho foram comparados aos resultados alcançados por CUNHA (1997), que também utilizou o AEP em problemas relaxados, associado a duas estratégias distintas para frotas homogêneas: a Alocação Sequencial e a Alocação Paralela.

Os resultados dos estudos realizados em 30 instâncias de SOLOMON (1987) devem considerar alguns aspectos que são importantes para a caracterização dos conjuntos de dados.

Em primeiro lugar, deve ser observado que os conjuntos C1, R1 e RC1 apresentam horizonte de curta duração devido à reduzida capacidade de carga dos veículos (200 unidades), enquanto nos conjuntos de dados C2, R2 e RC2 o horizonte é de longa duração, haja vista que a capacidade dos veículos é ampliada, sendo de 700 unidades no conjunto C2 e de 1000 unidades nos conjuntos R2 e RC2.

Outro aspecto importante a ser observado é que nos conjuntos C1 e C2 as localizações geográficas são agrupadas, enquanto nos conjuntos R1 e R2 as localizações geográficas dos clientes têm um padrão aleatório, e para os conjuntos RC1 e RC2 as localizações geográficas apresentam um padrão semi-agrupado.

Os resultados apresentados nos conjuntos C1 e C2 indicam que a estratégia proposta neste trabalho apresenta resultados inferiores para dados pré-agrupados, para os quais o mapa Auto-Organizável de Kohonen confirma o contexto geográfico dos problemas-teste.

A Tabela 5.3 apresenta os resultados comparativos para 30 instâncias de SOLOMON (1987).

Tabela 5.3: Resultados em 30 dos conjuntos de dados de SOMOLON

Conjunto	Problema	Heurística Alocação Sequencial *		Heurística Alocação Paralela *		SOM e heurística alternativa ao AEP		Comparativo com o melhor resultado
		no. de veículos	distância total	no. de veículos	distância total	no. de veículos	distância total	
C1	C104	10	1.060,30	10	1.108,00	10	1.111,02	4,8%
	C105	10	836,8	10	828,9	10	1.058,21	27,7%
	C106	10	836,8	10	828,9	10	1.051,11	26,8%
	C108	10	836,8	10	828,9	10	1.057,76	27,6%
	C109	10	1.132,90	10	828,9	10	1.056,97	27,5%
	Média	10	940,72	10	884,72	10	1.067,01	20,6%
C2	C202	3	806,5	4	828,5	6	1.541,45	86,1%
	C203	3	934	4	908,5	8	1.459,26	60,6%
	C204	3	952,4	3	1.068,80	8	1.433,38	34,1%
	C207	4	653,8	4	683,2	8	1.334,57	95,3%
	Média	5,44	1032,576	5,76	1029,248	8,4	1.468,07	42,6%
R1	R103	15	1.774,40	15	1.541,90	12	1.438,03	-6,7%
	R105	16	1.880,40	16	1.605,40	12	1.454,88	-9,4%
	R107	13	1.593,70	14	1.393,60	12	1.412,53	1,4%
	R109	14	1.701,00	14	1.394,00	12	1.462,18	4,9%
	R111	13	1.583,10	14	1.497,90	12	1.445,88	-3,5%
	R112	11	1.291,60	11	1.226,50	12	1.429,28	4,6%
	Média	13,4	1609,96	13,8	1423,48	12	1.440,95	-2,0%
R2	R201	4	1.846,90	4	1.907,80	4	1.647,05	-13,7%
	R203	3	1.433,70	3	1.358,50	4	1.661,71	22,3%
	R205	4	1.620,50	3	1.438,60	6	1.567,18	8,9%
	R206	3	1.392,70	3	1.349,80	6	1.522,34	12,8%
	R210	3	1.557,50	3	1.442,40	6	1.519,83	5,4%
	Média	3,4	1570,26	3,2	1499,42	5,2	1.583,62	5,6%
RC1	RC101	18	2.295,60	17	1.997,30	12	1.620,71	-18,9%
	RC102	16	2.020,80	14	1.698,70	12	1.583,57	-6,8%
	RC104	12	1.542,30	12	1.435,70	12	1.448,91	0,9%
	RC106	14	1.810,00	14	1.636,90	12	1.618,64	-1,1%
	RC108	11	1.412,20	12	1.517,60	12	1.586,69	4,6%
	Média	14,2	1816,18	13,8	1657,24	12	1.571,70	-5,2%
RC2	RC201	5	2.295,10	4	1.991,60	12	1.636,02	-17,9%
	RC202	4	1.742,60	4	1.649,30	8	1.601,14	-2,9%
	RC203	3	875,2	3	1.529,60	12	1.524,34	-0,3%
	RC205	4	2.084,00	4	1.865,30	8	1.695,57	-9,1%
	RC207	3	1500,5	5	1.661,90	12	1.612,48	-3,0%
	Média	3,8	1699,48	4	1739,54	10,4	1.613,91	-7,2%

Nota: (*) Resultados alcançados por Cunha (1997)

A Figura 5.2 ilustra essa situação, na qual o melhor resultado possível foi alcançado quando o número de neurônios do mapa Auto-Organizável respeitou a disposição geográfica previamente apresentada nas instâncias C104 e C204, embora para a instância C204 os melhores resultados das heurísticas comparativas foram alcançados com um número menor de veículos.

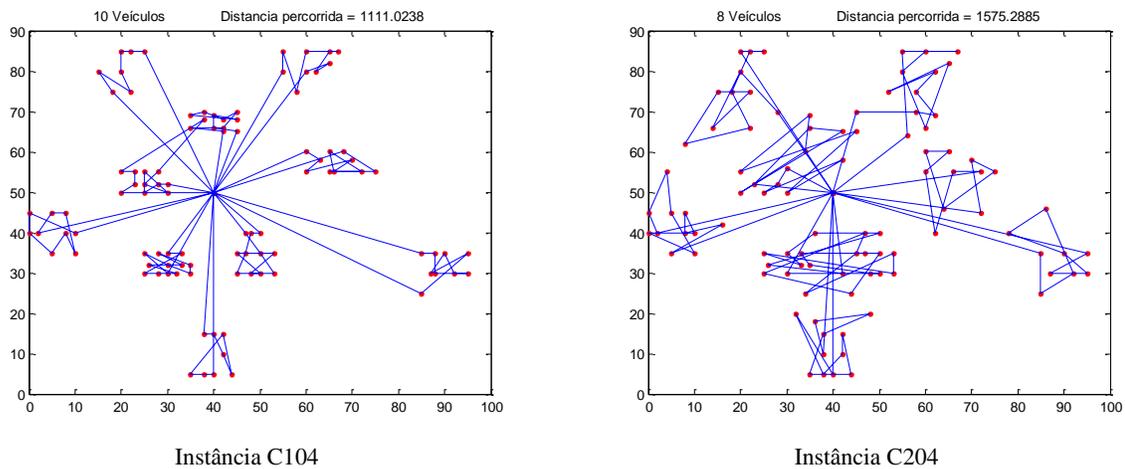


Figura 5.2: Resultados factíveis para as instâncias C104 e C204

No conjunto C1 a estratégia proposta neste trabalho apresentou, em média, resultados com distância percorrida 20,6% superiores aos alcançados por CUNHA (1997).

Já no conjunto C2 as dificuldades para a estratégia proposta foram ainda maiores, quando comparadas aos demais resultados.

No contexto do conjunto C2, além da disposição geográfica de agrupamento apresentada pelos problemas-teste, a longa jornada dos veículos devido à ampliação da capacidade de carga implicou no aumento na distância percorrida relativamente aos resultados comparativos, principalmente nas instâncias que apresentaram maior quantidade de clientes com as janelas de tempo estreitas.

A Figura 5.3 dispõe de representações gráficas das instâncias C202, C203, C204 e C07, que permitem visualizar a disposição geográfica dos clientes, assim como a disposição das janelas de tempo.

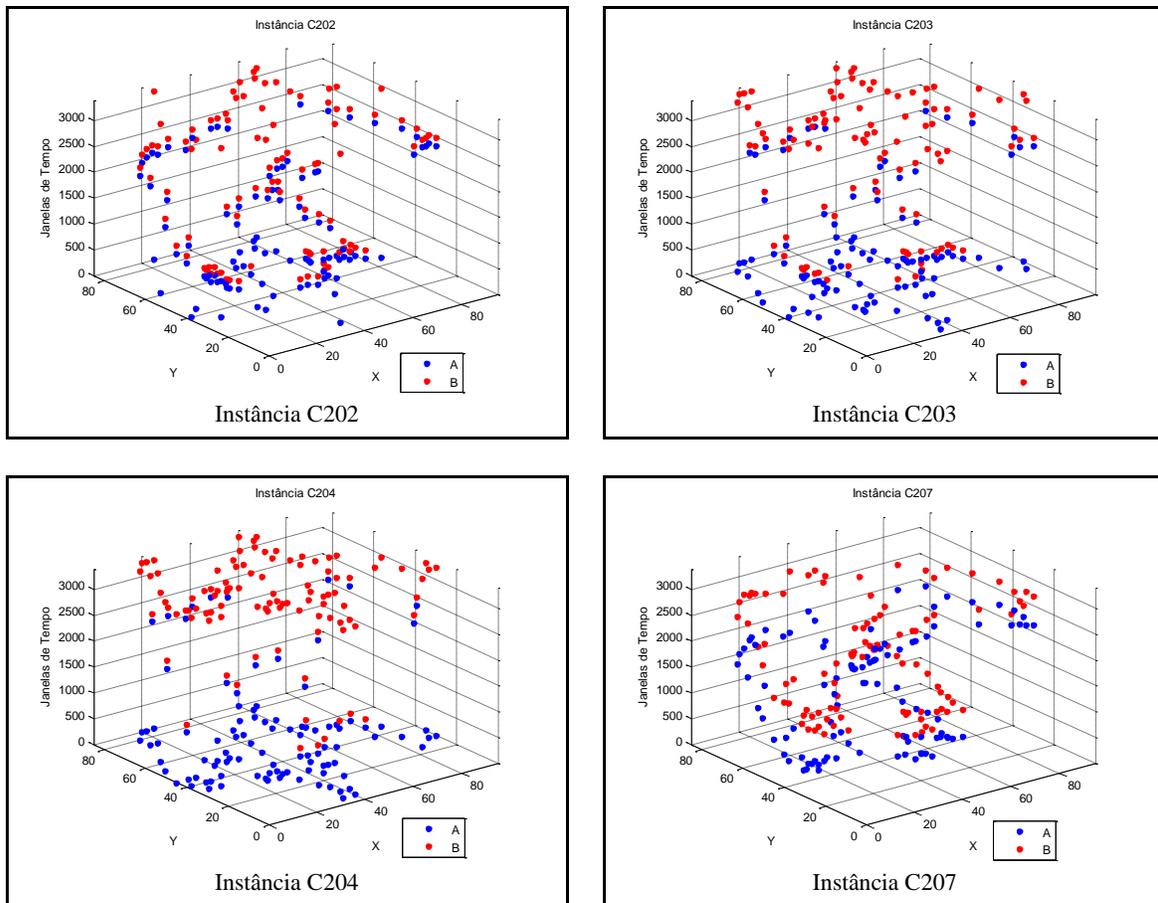


Figura 5.3: Representação gráfica das instâncias C202, C203, C204 e C207

Os resultados não efetivos apresentados nas instâncias C202 e C207 decorrem do contexto no qual estes problemas-teste estão inseridos, a saber: dados agrupados, com jornadas de longa duração e grande parcela de clientes com janelas de tempo estreitas, isto é, *A* muito próximo de *B*. Neste caso, a proximidade de agrupamentos deixa de ser um fator favorável à estratégia proposta na medida em que grupos vizinhos tornem-se competidores quanto à janela de tempo.

Por outro lado, quando o número de neurônios (veículos) foi menor do que a quantidade de agrupamentos geograficamente definidos pelo problema-teste, a limitação de carga aos veículos contribuiu para a não efetividade da estratégia, na medida em que implicou no retorno dos veículos à estação base quando o limite da carga for alcançado.

A proximidade geográfica associada à proximidade de janela de tempo não favorece no alcance de soluções efetivas da estratégia proposta, pelo simples fato de serem concorrentes. Esse contexto se enquadra na situação típica de empresas que trabalham com uma carteira de clientes previamente definida, como é o caso dos CORREIOS, por exemplo, que tem uma carteira definida de clientes, e que podem realizar previamente a programação dos veículos para a entrega e para a coleta de produtos.

No contexto dos conjuntos R1 e R2 os resultados alcançados pela estratégia proposta foram superiores aos anteriores, sendo que no conjunto R1 os resultados foram equivalentes aos resultados comparativos. Na Figura 5.4 é observada a disposição aleatória dos dados relativamente às coordenadas das instâncias R103 e R201, assim como um equilíbrio na distribuição das janelas de tempo, não havendo predomínio de clientes com janelas de tempo muito estreitas.

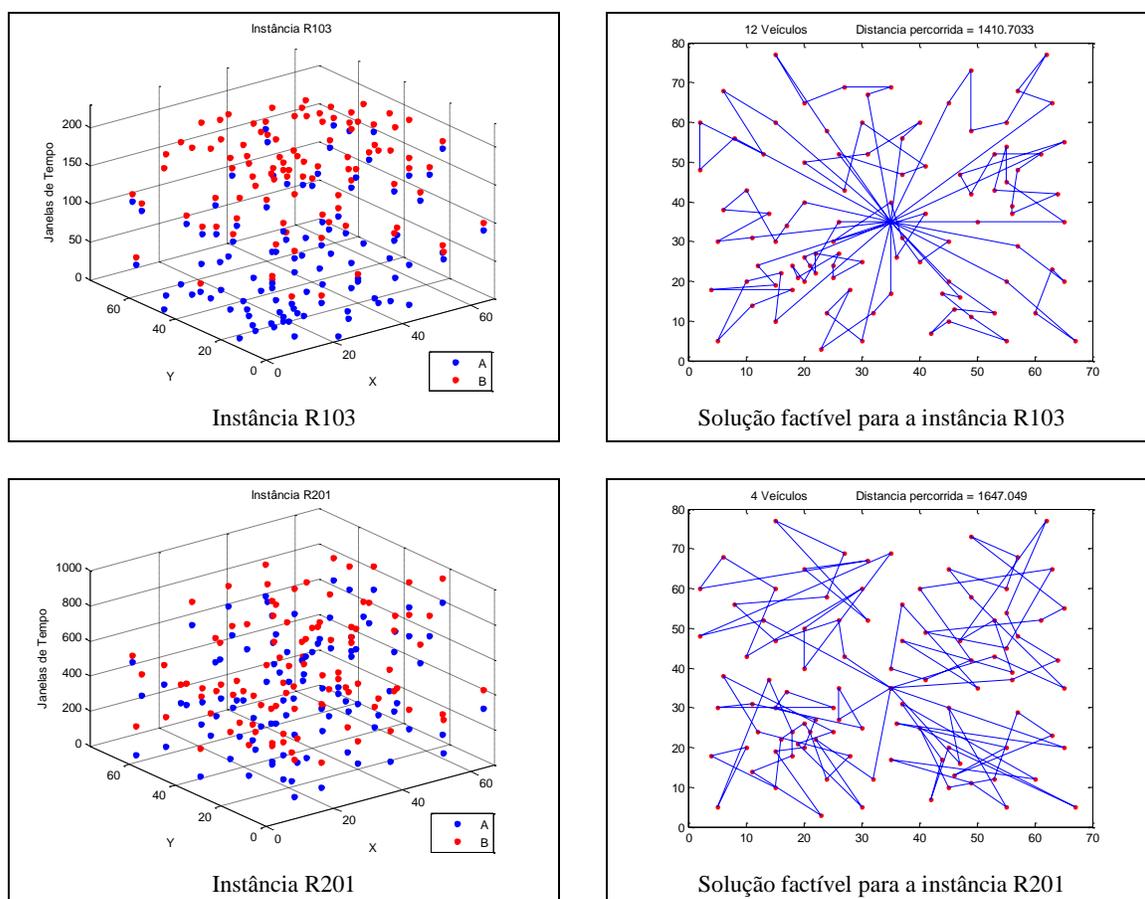


Figura 5.4: Representação gráfica das instâncias R103 e R201 com as respectivas soluções factíveis

No contexto do conjunto R1, os resultados apresentados pela estratégia proposta neste trabalho foram, na média, ligeiramente superiores aos alcançados pelos estudos realizados por CUNHA(1997), sendo que as soluções factíveis encontradas necessitaram de um número menor de veículos para atender à demanda dos clientes.

A ampliação da capacidade dos veículos no contexto do conjunto R2 refletiu negativamente na capacidade da estratégia proposta em obter soluções factíveis no mesmo nível das demais, uma vez que as soluções alcançadas necessitaram de um número de veículos superior, que não resultaram na diminuição das distâncias percorridas.

FONSECA (2002) informa que os clientes frequentes e os clientes ocasionais se utilizam de sistema telefônico ou de comunicação escrita do tipo correio eletrônico (e-mail) para solicitar seus serviços, e que em um dia de operação padrão, os clientes regulares respondem a aproximadamente 23% do total de coletas diárias, enquanto os clientes frequentes e ocasionais representam 77% do total de coletas.

Em contextos nos quais a distribuição geográfica dos clientes for aleatória e que a capacidade de carga dos veículos for pequena, como é o caso da maior parcela de atendimentos realizados pelos serviços de entregas expressas, a estratégia proposta apresentou resultados efetivos.

Nos conjuntos RC1 e RC2 os resultados obtidos pela estratégia proposta foram superiores aos comparativos no que se refere às distâncias percorridas pelos veículos.

O contexto dos problemas RC1 e RC2 tem uma proximidade ainda maior com o contexto do serviço de remessas expressas do que o apresentado no contexto dos problemas R1 e R2, haja vista que o semi-agrupamento dos clientes relativamente à localização geográfica pode ser interpretado da seguinte forma quanto à programação dos veículos: os clientes regulares representam aqueles que podem e devem ser agrupados conforme sua localização geográfica, permitindo uma programação prévia dos veículos; enquanto os clientes frequentes ou ocasionais representam a parcela cuja localização é dita aleatória para o contexto, e que devem ser inseridos na programação dos veículos que estão em campo.

A estrutura semi-agrupada apresentada por esses conjuntos favoreceu a estratégia proposta, em especial para o conjunto RC1, no qual foi observada uma redução das distâncias, assim como

uma redução na quantidade de veículos utilizados. Na Figura 5.5 podem ser observadas as representações gráficas das instâncias RC101 e RC201, assim como soluções factíveis encontradas.

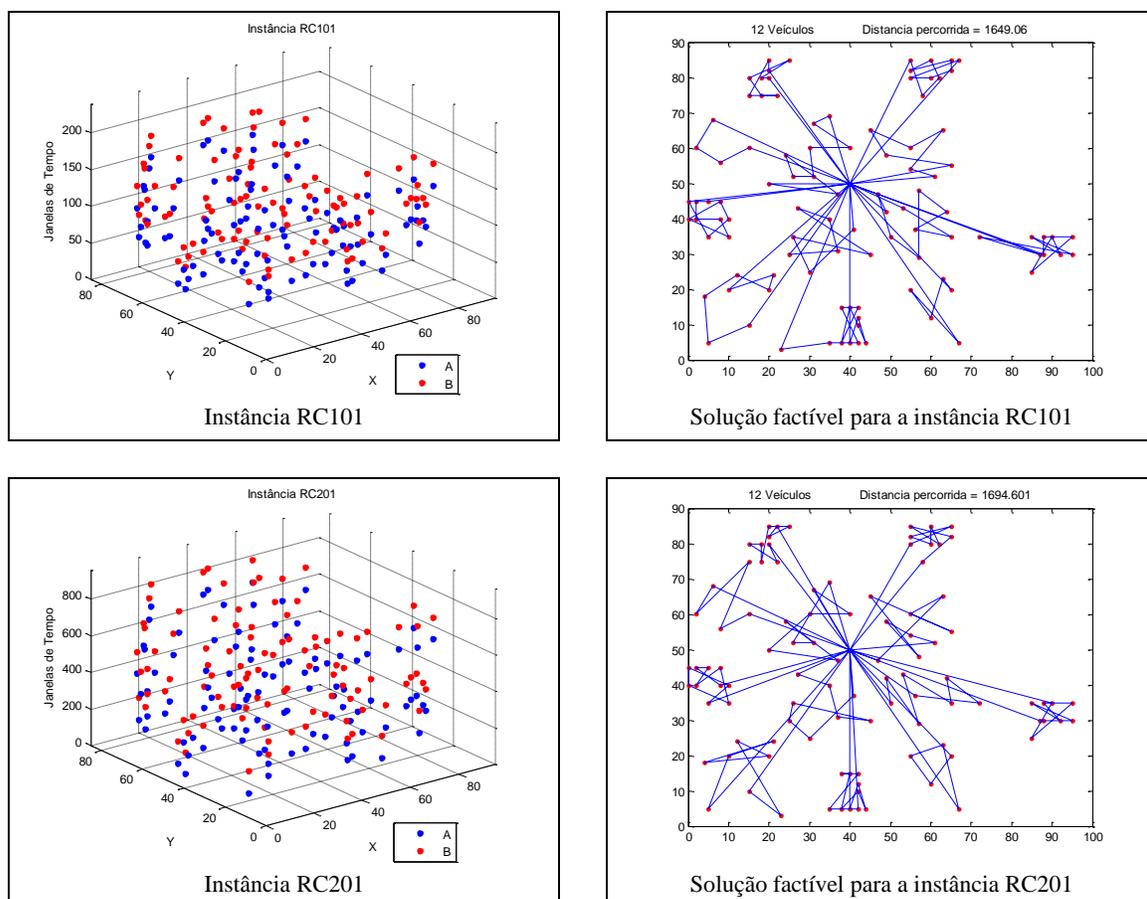


Figura 5.5: Representação gráfica das instâncias RC101 e RC201 com as respectivas soluções factíveis

No conjunto RC2 foi verificada uma redução nas distâncias percorridas, mas o modelo não foi capaz de obter tais resultados mediante a redução da quantidade de veículos para atender aos clientes. Assim, em todas as instâncias estudadas a ampliação das capacidades dos veículos resultou em diminuição da qualidade das soluções apresentadas pela estratégia proposta.

Para esse tipo de serviço de remessas expressas, nas quais a maior parcela de clientes é ocasional e, portanto, possuem localização geográfica aleatória no contexto da programação dos veículos, a estratégia proposta nesse trabalho também apresenta resultados efetivos.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho foi proposta a estratégia composta pelo uso mapa Auto-Organizável de Kohonen combinado com uma heurística alternativa ao Algoritmo de Etiquetamento Permanente para resolver Problemas de Roteamento e Programação de Veículos com Janelas de Tempo, cuja validação foi realizada em problemas-teste de SOLOMON (1987), utilizados como *benchmarking* na literatura.

A primeira conclusão obtida foi de que a contribuição do mapa Auto-Organizável na solução da estratégia adotada está associada ao agrupamento dos clientes em função das coordenadas dos problemas-teste, cabendo à heurística alternativa ao AEP o papel de determinar a programação dos veículos.

A partir dos resultados apresentados é possível concluir que para conjuntos de problemas cujos dados apresentem padrões aleatório ou semi-agrupado de localização geográfica, como é o caso dos serviços transporte expresso, a estratégia proposta se mostrou efetiva, quando comparados aos resultados alcançados por CUNHA (1997) que também utilizou o AEP em problemas relaxados como estratégia de solução em problemas PRPJT.

No contexto do conjunto R1, os resultados apresentados pela estratégia proposta neste trabalho foram superiores aos alcançados pelos estudos comparativos, pois as soluções factíveis encontradas necessitaram de um número menor de veículos, percorrendo distâncias menores, para atender à demanda dos clientes.

Com a ampliação da capacidade dos veículos no contexto do conjunto R2, diminuiu a capacidade da estratégia proposta em obter soluções no mesmo nível das demais, uma vez que as soluções alcançadas necessitaram de um número de veículos superior, que não resultaram na diminuição das distâncias percorridas.

Isto ocorreu devido ao fato de que nos agrupamentos decorrentes do mapa Auto-Organizável de Kohonen, parte dos clientes apresentou proximidade nas respectivas janelas de tempo, implicando em concorrência no atendimento por parte dos veículos. Nesse contexto, o aumento do número de veículos foi necessário para garantir o atendimento a todos os clientes.

O contexto dos problemas RC1 e RC2 tem uma proximidade ainda maior com o contexto do serviço de transporte expresso, quando comparado ao contexto dos problemas R1 e R2, dado que o semi-agrupamento dos clientes relativamente à localização geográfica remete à seguinte analogia: os clientes regulares representam aqueles que podem e devem ser agrupados conforme sua localização geográfica quando da programação prévia, permitindo uma programação prévia dos veículos; enquanto os clientes frequentes ou ocasionais representam a parcela cuja localização é dita aleatória para o contexto, e que devem ser inseridos na programação dos veículos que estão em campo.

Por outro lado, para conjuntos de problemas cujos dados apresentem padrões de localização geográfica de agrupamento a estratégia proposta não se mostrou efetiva. Para explicar esse fato é necessário voltar à natureza do mapa Auto-Organizável, a qual busca estabelecer uma estrutura de vizinhança, ou de agrupamento, a partir de uma medida de proximidade. O que em princípio deveria favorecer o processo de ajuste do modelo devido à proximidade da localização geográfica dos clientes, não se mostrou efetivo na medida em que outros fatores, tais como, janelas de tempo e limitação de carga dos veículos, foram inseridos no contexto.

Neste caso, a proximidade de agrupamentos deixa de ser um fator favorável à estratégia proposta na medida em que grupos vizinhos tornem-se competidores quanto à janela de tempo. Por outro lado, se o número de neurônios (veículos) for menor do que a quantidade de agrupamentos geograficamente definidos pelo problema-teste, a limitação de carga aos veículos passa a ser outro fator de ineficiência, na medida em que implique no retorno dos veículos à estação base quando o limite da carga for alcançado.

Assim, a proximidade geográfica associada à proximidade de janela de tempo não favorece no alcance de soluções efetivas da estratégia proposta, pelo simples fato de serem concorrentes.

Em virtude dos resultados apresentados pela estratégia proposta, alguns estudos podem ser realizados para dar solução às limitações encontradas:

- Encontrar alternativa de composição dos dados de entrada que permita à Rede de Kohonen um mapeamento que não incorra em clientes concorrentes quanto às janelas de tempo relacionados nos mesmos grupos.
- Verificar a efetividade da Rede de Kohonen fazendo uso de um número maior de neurônios e de centróides (agrupamentos) para a designação dos clientes.
- Desenvolvimento de estratégia que permita o atendimento clientes de um mesmo grupo nos casos em que os veículos apresentarem limitação de carga. Uma alternativa a ser testada seria a transferência de clientes não atendidos para agrupamentos de neurônios vizinhos, que não implicassem em não atendimento a clientes do agrupamento vizinho por ocasião dessa transferência.
- Aperfeiçoamento da heurística alternativa proposta ao AEP no que se refere à otimização da programação dos veículos.

BIBLIOGRAFIA

- [1] ARAS, N.; OOMMEN, B.J.; ALTINEL, I.K. 1999. The Kohonen network incorporating explicit statistics and its application to the traveling salesman problem. *Neural Networks*, v. 12, n. 9, p. 1273-1284.
- [2] ASSAD, A. A. 1988. Modeling and implementation issues in vehicle routing. In: *Vehicle Routing: Methods and Studies*, B. L. Golden, A. A. Assad (eds), North Holland, Amsterdam, p. 7-46.
- [3] BALLOU, R. H. 1993. Logística empresarial. São Paulo: Atlas.
- [4] BAKER. B. M. 1982. Further improvements to vehicle routing heuristics. *Journal of the Operational Research Society*, v.43, n.10, p. 1009-1012.
- [5] BAKER. B. M. 1983. An exact algorithm for the time-constrained traveling salesman problem. *Operational Research Society*, v.43, n.10, p. 1009-1012.
- [6] BARROS, W. L. S. 2005. Metodologia para Previsão da Necessidade de Recursos de Transportes de Carga Urbana Baseado no CEP. Brasília: UnB, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. 103p. (Dissertação de Mestrado).
- [7] BECHARA, J. J. B., GALVÃO, R. D. 1984. O uso de sistemas computacionais na solução de problemas de roteamento de veículos. In: XVII Simpósio da SOBRAPO, Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro. p. 279-293.
- [8] BODIN, L., GOLDEN, B., ASSAD, A., BALL, M. 1983. Routing and Scheduling of Vehicles and Crews: The State of the Art. *Computers and Operations Research*, v. 10, n. 2, p. 63-212.
- [9] BODIN, L., GOLDEN. 1990. Twenty years of routing and scheduling. *Operations Research*, v. 38, n. 4, p. 571-570.
- [10] CHRISTOFIDES, N., MINGOZZI, A., TOTH, P. 1979. The vehicle routing problem. John Wiley & Sons, New York.

- [11] CLARKE, G. e WRIGHT, J. W. 1963. Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points . *Operations Research*, v. 12, p. 568-581.
- [12] COCHRANE, E.M., BEASLEY, J.E. 2003. The Co-Adaptive Neural Network Approach to the Euclidean Travelling Salesman Problem. *Neural Networks*, v. 16, n. 10, p. 1499-1525.
- [13] CORDEAU, J.-F., LAPORTE, G. 2005. Tabu Search Heuristics for the Vehicle Routing Problem », dans *Metaheuristic Optimization via Memory and Evolution: Tabu Search and Scatter Search*, C. Rego, B. Alidaee (eds), Kluwer, Boston, p. 145-163.
- [14] CORDEAU, J.-F., LAPORTE, G., MERCIER, A. 2003. An Improved Tabu Search Algorithm for the Handling of Route Duration Constraints in Vehicle Routing Problems with Time Windows. CRT-2003-25.
- [15] CRÉPUT, Jean-Charles, KOUKAM, A. e HAJJAM K. 2007. Self-Organizing Maps in Evolutionary Approach for the Vehicle Routing Problem with Time Windows. *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, v. 7, n. 1, p. 103-110.
- [16] CUNHA, C. B. 1991. Algoritmos para roteamento e programação de veículos no contexto da distribuição física. São Paulo: EPUSP, Departamento de Engenharia de Transportes. 178p. (Dissertação de Mestrado).
- [17] CUNHA, C. B. 1997. Uma contribuição para o problema de roteirização de veículos com restrições operacionais. São Paulo: EPUSP, Departamento de Engenharia de Transportes. 222p. (Tese de Doutorado).
- [18] CUNHA, C. B. 2000. Aspectos práticos da aplicação de modelos de roteirização de veículos a problemas reais. Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET. *Transportes*. v. 8, n. 2, p. 51-74.
- [19] CUNHA, C. B., GUALDA, N. F. 1999. Heurísticas baseadas em relaxação lagrangiana para o problema de roteirização de veículos com restrições

- operacionais. Transporte em Transformação II. São Paulo: Makron Books/CNT, p. 81-95.
- [20] DASKIN, M. S. 1985. Logistics: Na overview of the state of the art and perspectives on future research. *Transportation Research*. v. 19A, n. 5/6, p. 383-398.
- [21] DEJAX, P., HAOUARI, M. 1991. La résolution des problèmes complexes de tournées de véhicules. *Actes du 3^o Congrès International de Génie Industriel*. Tours, p. 897-906.
- [22] DESROCHERS, M., SOUMIS, F. 1988. A generalized permanent labelling algorithm for the shortest path problem with time windows. *INFOR*, v. 26, n. 3, p. 191-212.
- [23] DESROSIERS, J. DUMAS, Y. SOUMIS, F. 1986a. A dynamic programming solution of the large-scale single-vehicle dial-a-ride problem with time windows. *American Journal os Mathematical and Management Sciences*, v. 6, p. 301-325.
- [24] DESROSIERS, J. SOUMIS, F. DESROCHERS, M. SAUVÉ, M. 1986b. Routing and Scheduling by Branch-and-Bound on Time Windows. Montreal: Université de Montreal. Centre de Recherche sur les Transports. École de Hautes Edudés Commerciales (Publication # 278).
- [25] DESROSIERS, J. DUMAS, SALIVÉ, M., SOUMIS, F. 1988. Lagrangian Relaxation Methods for Solving the Minimum Fleet Size Multiple Traveling Salesman Problem with Time Windows. *Management Science*, v. 34, n. 8, p. 1005-1022.
- [26] DESROSIERS, J. DUMAS, SALIVÉ, M., SOUMIS, F. 1989. A column generation approach to the urban transit crew scheduling problem. *Transportation Science*, v. 23, n. 1, p. 1-13.
- [27] FAUSETT, L. 1994. *Fundamentals of Neural Networks*. New Jersey: Prentice Hall.

- [28] FERREIRA, A. B. H. 1982. Novo dicionário da língua portuguesa. Rio de Janeiro: Nova Fronteira.
- [29] FISHER, M. L. 1985. An applications oriented guide to lagrangian relaxation. *Interfaces*, v. 15, n. 2, p. 10-21.
- [30] FONSECA, C. H. F. 2002. Alocação de atendimentos de coleta no transporte de remessas expressas em grandes centros urbanos. São Paulo: EPUSP, Departamento de Engenharia de Transportes. 91p. (Dissertação de Mestrado).
- [31] FONSECA, C. H. F. e CUNHA, C. B. 2004. Alocação de atendimentos de coleta no transporte de remessas expressas em grandes centros urbanos. XVIII ANPET – Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, v. 2, p. 1062-1073.
- [32] FU, L. 2001. An adaptive routing algorithm for in-vehicle route guidance systems with real-time information. *Transportation Research*, v. 35B, p. 749-765.
- [33] GALVÃO, R. D., BARROS NETO, J. F. FERREIRA FILHO, V. J. M., HENRIQUES, H. B. S. 1997. Roteamento de veículos com base em sistemas de informação geográfica. *Revista Gestão & Produção*, v. 4, n. 2, p. 159-173.
- [34] GENDREAU, M. HERTZ, A., LAPORTE, G. 1994. A tabu search heuristic for the routing problem. *Management Science*, v. 40, n. 10, p. 1276-1290.
- [35] GENDREAU, M., IORI, M., LAPORTE, G., MARTELLO, S. 2004. A Tabu Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Two-Dimensional Loading Constraints. CRT-2004-20.
- [36] GENDREAU, M., POTVIN, J.-Y. 2005. Tabu search, dans *Search Methodologies: Introductory Tutorials in Optimization and Decision Support Techniques*. E.K. Burke, G. Kendall (eds). p. 165-168. Springer.
- [37] GOLDEN, B. L. e SKISCIM, C. C. 1986. Using simulated annealing to solve routing and location problems. *Naval Research Logistics Quarterly*, v. 33, p. 262-279.

- [38] GOUVÊA, M. T. 1992. Algoritmos para a resolução de um problema geral de roteamento de múltiplos veículos. São Paulo: EPUSP, Departamento de Engenharia Naval. 185p. (Dissertação de Mestrado).
- [39] GRANEMANN, S. R., MOREIRA DE SÁ, R. 2000. Um modelo de roteirização para atendimento dos serviços nas empresas de energia elétrica. Anais do III Simpoi, São Paulo, FGV.
- [40] GRANEMANN, S. R., MOREIRA DE SÁ, R. 2001. Um modelo de roteirização para atendimento de serviços nas empresas de energia elétrica. Revista Estudos Empresariais, v. 6, n. 2.
- [41] HAYKIN, S. 1999. Neural Networks: A Comprehensive Foundation. New Jersey: Prentice Hall.
- [42] HALL, R. W. e PARTYKA, J. G. 2000. On the road to service. OR/MS Today, www.lionhrtpub.com, Agosto.
- [43] HALL, R. (2006) On the Road to Integration. OR/MS Today. Junho, 2006. Disponível em: www.lionhrtpub.com/orms/surveys/Vehicle_Routing/vrss.html. Acesso em: 22/09/2007.
- [44] HALLAL, R., PUREZA V. 2004. Desenvolvimento e aplicação de algoritmos adaptativos de busca tabu para a resolução de problemas de roteamento de veículos periódico (PRVP). Anais do Panorama Nacional da Pesquisa em Transportes 2004, XVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Florianópolis, SC, v. 2, p. 1074-1085.
- [45] HALL, R.W e PARTYKA, J.G. 2008. On the Road Mobility. OR/MS Today. Fevereiro, 2000. Disponível em: <http://www.lionhrtpub.com>. Acesso em: 04/06/2008.
- [46] HELD, M., KARP, Richard M. 1970. The traveling-salesman problem and minimum spannig trees. Operations Research, v. 18. p. 1138-1162.

- [47] HELD, M., KARP, Richard M. 1971. The traveling-salesman problem and minimum spanning trees: Part II. *Mathematical Programming*, v. 6, p. 62-88.
- [48] HU, T. e MAHMASSANI, H. S. 1997. Day-to-day evolution of network flows under real-time information and reactive signal control. *Transportation Research*, v. 5, n. 1, p. 51-69.
- [49] HU, Y.C.; CHEN, R.S.; HSU, Y.T.; TZENG, G.H. 2002. Grey self-organizing feature maps. *Neurocomputing*, v. 48, n. 3, p. 863-877.
- [50] JAILLET, P. 1998. The probabilistic vehicle routing problem, in GOLDEN, B. L. e ASSAD, A. A. (edit.), *Vehicle routing: methods and studies*, Elsevier, Reino Unido, 1998.
- [51] JAW, J. J., ODoni A. R., PARAFITS, H. N., WILSON, N. H.M. 1986. A heuristic algorithm for the multi-vehicle advance request dial-a-ride problem with time windows. *Transportation Research B*, v. 20, n. 3, p. 243-257.
- [52] JAIN, A.K., MURTY, M.N. e FLYNN, P.J. 1999. *Data Clustering: A Review*. *ACM Computing Surveys*, New York, v. 31, n. 3, p. 264-323.
- [53] LAPORTE, G. 1992. *The Vehicle Routing Problem: An overview of Exact and Approximate Algorithms*. Centre de Recherche sur les Transports, Université de Montréal, Publication 745.
- [54] LAPORTE, G. 1993. *Recent Algorithmic Developments for the Travelling Salesman Problem and the Vehicle Routing Problem*. Centre de Recherche sur les Transports, Université de Montréal, Publication 932.
- [55] LAPORTE, G., GENDREAU, M., POTVIN, J. Y. e SEMET, F. 2000. Classical and modern heuristics for the vehicle routing problem. *International Transactions in Operational Research*, v. 7, n. 4/5, p. 285-300.
- [56] LOURENÇO, H. R. 2001. *Supply Chain Management: An Opportunity for Metaheuristics*. Grup de Reserca en Logística Empresarial DEE, Universitat

Pompeu Fabra, Barcelona, Spain, 2001.
<<http://econpapers.hhs.se/paper/upfupfgen/538.htm>>, acesso em: 27 de julho de 2002.

- [57] LO, H. K., CHANG, E. e CHAN, Y. C. 2001. Dynamic network traffic control. *Transportation Research*, Vol 35A, p. 721-744.
- [58] MELO, A. C. S. 2000. Avaliação do Uso de Sistemas de Roteirização de Veículos. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 162p. (Dissertação de Mestrado).
- [59] NOVAES, A. G. N. e ALVARENGA, A. C. 1994. Logística aplicada: suprimento e distribuição física. São Paulo: Pioneira. 267p.
- [60] NOVAES, A. G. N. and GRACIOLLI, O. D. 1999. Designing multi-vehicle delivery tours in a grid-cell format. *European Journal of Operational Research*, v. 119, p. 613-634.
- [61] NOVAES, A. G. 1989. Sistemas logísticos: transporte, armazenagem e distribuição física de produtos. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda.
- [62] NOVAES, A. G. 2001. Logística e gerenciamento da cadeia de distribuição. Rio de Janeiro: CAMPUS.
- [63] OLIVEIRA, A. C. M. 2004. Algoritmos Evolutivos Híbridos com detecção de regiões promissoras em espaços de busca contínuos e discretos. Tese de Doutorado em Computação Aplicada. INPE. São José dos Campos.
- [64] POTVIN, J. Y., ROSSEAU, J. M. 1993. A parallel route building algorithm for the vehicle routing and scheduling problem with time windows. *European Journal of Operational Research*, v. 66, p. 331-340.
- [65] POTVIN, J. Y., ROSSEAU, J. M. 1995. An exchange heuristic for routing problems with time windows. *Journal of Operational Research Society*, v. 46, n. 12 p. 1433-1446.

- [66] POTVIN, J. Y. 2008. A Review of Bio-Inspired Algorithms for Vehicle Routing. Centre interuniversitaire de recherche sur les réseaux d'entreprise, la logistique et le transport, CIRRELT-2008-30.
- [67] PSARAFITS, H. N. 1980. A dynamic programming solution to the single vehicle many-to-many immediate request dial-a-ride problem. *Transportation Science*, v. 14, n. 2, p. 130-402.
- [68] PUREZA, V. e FRANÇA, P. 2001. Uma abordagem adaptativa de Busca Tabu aplicada ao problema de roteamento de veículos. *Revista do Transporte Público*, v. 9, p. 28-47.
- [69] REEVES, C. R. 1993. *Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems*. John Wiley & Sons, Inc. New York, Toronto.
- [70] ROMARIZ, A. R. S., A. 2005. *Sistemas Inteligentes*. Apostila desenvolvida para curso de Introdução aos Sistemas Inteligentes, UnB.
- [71] RONEN, D. 1988. Perspectives on practical aspects of truck routing and scheduling. *European Journal of Operational Research*. V.35, p. 137-145.
- [72] SANTOS, R. L. e LEAL, J. E. 2007. Solução de um problema de roteirização com janelas de tempo através de um algoritmo de múltiplas colônias de formigas. *TRANSPORTES*, v. XV, n. 2, p. 5-16.
- [73] SANTOS, E. M. 2008. *Contribuição à Gestão da Distribuição de Cargas em Áreas Urbanas sob a Ótica do Conceito City Logistics*. Brasília: UnB. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. 202p. (Dissertação de Mestrado).
- [74] SAINT-MLEUX, Y. e LANGEVIN, A. 1995. Optimisation de la livraison à l'aide d'un système d'informations géographiques. *Actes du Congrès International de génie industriel de Montréal, Montreal, Québec*.

- [75] SIQUEIRA, P. H. 2005. Uma nova abordagem na resolução do problema do caixeiro viajante. Curitiba: UFPR, Setor de Ciências Exatas. 116p. (Tese de Doutorado).
- [76] SOLOMON, M. M. 1986. The minimum spanning tree problem with time windows Constraints. American Journal of Mathematical and Management Sciences. v.6, n.3 & 4, p. 399-421.
- [77] SOLOMON, M. M. 1987. Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time windows constraints. Operations Research, v. 35, n. 2, p. 254-265.
- [78] SOUZA, A. T. P. e NASSI, C. D. 1995. Uma contribuição à solução do problema de roteamento com múltiplos objetivos. Revista Transportes, Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Pesquisa, Rio de Janeiro, v. 3, n. 1.
- [79] SOUZA, E. C. de, BRINATI, M. A. 1999. Modelagem e resolução de um problema de transporte do tipo: carga única-coleta e entrega (CUCE) com janelas de tempo. Anais do XIII Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes, São Carlos, v. I, p. 371-382.
- [80] SOUZA, P. S. 1993. Asynchronous organizations for multi-algorithms problems. Pittsburg: Carnegie Mellow University, Department of Electrical and Computer Engineering. 139 p. (Tese de Doutorado).
- [81] STEWART JR., W.R. GOLDEN, B. .L. 1984. A lagragian relaxation heuristic for vehicle routing. European Journal of Operational Research. v. 15, p. 84-88.
- [82] STOJKOVIC, G., SOUMIS, F., DESROSIERS, J. e SOLOMON, M. M. 2002. An optimization model for a real-time flight scheduling problem, Transportation Research, Part A, v. 36, p. 779-788.
- [83] TAILLARD, É., D., LAPORTE, G. e GENDREAU, M. 1996. Vehicle routing with multiple use of vehicle. Journal of Operatinal Research Society. v. 47, n. 8, p. 1065-1070.

- [84] WITUCKI, M., DEJAX, P., TOUATI, N. 1994. Le problème des tournées de véhicules dans une entreprise de transport et distribution: un exemple de modelisation. Actes du Congrès International de Génie Industriel de Montréal, Montréal, p. 1885-1894.
- [85] YEUN, L. C., ISMAIL, W. R., OMAR K. e ZIROUR M. 2008. Vehicle Routing Problem: Models and Solutions. Journal of Quality Measurement and Analysis – JQMA, v. 4(1), p. 205-218.