UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

CENTRO DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE MESTRADO EM LOGISTICA E PESQUISA OPERACIONAL

CÉSAR AUGUSTO CHAVES E SOUSA FILHO

ALGORITMO GENÉTICO PARA O PROBLEMA DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS COM FROTA HETEROGÊNEA E COLETA E ENTREGA SEPARADAS: ESTUDO DE CASO NA SECRETARIA DO TRABALHO E DESENVOLVIMENTO SOCIAL DO ESTADO DO CEARÁ

FORTALEZA – 2014

CESAR AUGUSTO CHAVES E SOUSA FILHO

ALGORITMO GENÉTICO PARA O PROBLEMA DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS COM FROTA HETEROGÊNEA E COLETA E ENTREGA SEPARADAS: ESTUDO DE CASO NA SECRETARIA DO TRABALHO E DESENVOLVIMENTO SOCIAL DO ESTADO DO CEARÁ

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Acadêmico em Logística e Pesquisa Operacional, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Logística e Pesquisa Operacional.

Linha de Pesquisa: Tomada de Decisão e Pesquisa Operacional

Orientador: Prof. Dr. José Lassance Castro

Fortaleza - 2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Pós Graduação em Engenharia

S696a Sousa Filho, César Augusto Chaves e.

Algoritmo genético para o problema de roteirização de veículos com frota heterogênea e coleta e entrega separadas: estudo de caso na Secretaria do Trabalho e Desenvolvimento Social do Estado do Ceará / César Augusto Chaves e Sousa Filho. – 2014.

104 f. : il. color., enc. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós – Graduação em Logística e Pesquisa Operacional, Fortaleza, 2014.

Área de Concentração: Pesquisa Operacional.

Orientação: Prof. Dr. José Lassance de Castro Silva.

1. Logística. 2. Pesquisa operacional. 3. Otimização. I. Título.

CDD 658.78

CESAR AUGUSTO CHAVES E SOUSA FILHO

ALGORITMO GENÉTICO PARA O PROBLEMA DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS COM FROTA HETEROGÊNEA E COLETA E ENTREGA SEPARADAS: ESTUDO DE CASO NA SECRETARIA DO TRABALHO E DESENVOLVIMENTO SOCIAL DO ESTADO DO CEARÁ

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Logística e Pesquisa Operacional, da Universidade Federal do Ceará em 31/07/2014, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Logística e Pesquisa Operacional.

Aprovado em: 31/07/2014

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Lassance de Castro Silva (Orientador)

Profa. Dra. Silvia Maria de Freitas (Membro Interno)

Prof. Dr. Michael Ferreira de Souza (Membro Externo)

Aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, irmã e cunhado que me apoiaram em todos os momentos e me deram forças para completar mais essa jornada.

Aos meus amigos e familiares que não me deixaram desanimar frente às dificuldades, deram-me forças e compreenderam minha ausência durante o curso.

Ao Prof. José Lassance de Castro Silva, que foi além do papel de professor-orientador e se dedicou para que a conclusão deste trabalho fosse possível.

À Universidade Federal do Ceará (UFC), pela oportunidade dupla de aprendizado, na graduação e pós-graduação.

Ao corpo docente do programa de mestrado de Logística e Pesquisa Operacional (GESLOG).

Aos meus colegas e amigos do GESLOG pelo companheirismo nos momentos difíceis e nos momentos alegres.

"O essencial da guerra é a destruição, não necessariamente de vidas humanas, mas de produtos do trabalho humano. A guerra é um meio de despedaçar, ou de libertar na estratosfera, ou de afundar nas profundezas do mar, materiais que de outra forma teriam de ser usados para tornar as massas demasiado confortáveis e, portanto, com o passar do tempo, inteligentes".

George Orwell

RESUMO

Uma das preocupações da gestão logística é a correta e eficiente utilização da frota disponível. O foco central da gestão da frota está em determinar as rotas que serão utilizadas no atendimento aos clientes e a alocação eficiente dos recursos (veículos) disponíveis. A gestão correta da frota pode gerar um diferencial competitivo. Existe na Pesquisa Operacional um problema dedicado a trabalhar este tipo de situação, denominado Problema de Roteamento de Veículos (*PRV*). O PRV procura gerar a rota mais econômica com utilização eficiente da frota disponível. No estudo de caso, realizado neste trabalho, foi abordada uma situação particular do PRV onde há uma frota heterogênea e as coletas e entregas de passageiros são realizadas em momentos separados. Para a resolução deste problema foi desenvolvido e implementado um Algoritmo Genético (*AG*). Adicionalmente, três operadores de cruzamento diferentes foram testados na busca dos melhores resultados encontrados pelo AG. Ao final, o Algoritmo Genético conseguiu se mostrar capaz de resolver o problema em tempo hábil e de maneira a gerar rotas mais econômicas, utilizando eficientemente a frota e atendendo todas as solicitações.

Palavras-Chave: Problema de Roteamento de Veículos, Frota Heterogênea, Coleta e Entrega Separadas, Algoritmo Genético, Logística, Pesquisa Operacional.

ABSTRACT

A concern of logistics management is the correct and efficient use of the available fleet. The central focus of fleet management is determining the routes that will be used in customer service and the efficient allocation of available resources (vehicles). The correct fleet management can generate a competitive advantage. There is a problem in the Operations Research dedicated to working this type of situation, the Vehicle Routing Problem (VRP). The VRP tries to generate the most economical route to efficient use of the available fleet. The case study discussed in this work was a particular situation VRP where there is a heterogeneous fleet and where the collections and deliveries of passengers are carried at separate times. To solve this problem we designed a Genetic Algorithm. Additionally, three different crossover operators were tested in the search for better results. At the end of the study, the Genetic Algorithm was capable of solving the problem in a short time and finding the most economical way to generate routes, using efficiently the fleet and fulfilling all requests.

Keywords: Vehicle Routing Problem, Heterogeneous Fleet, Pickup and Delivery Separated, Genetic Algorithm, Logistics, Operational Research.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de ciclo do Caixeiro Viajante. 21
Figura 2 – Exemplo de rota gerada pelo PRV 25
Figura 3 – Método do Vizinho Mais Próximo 31
Figura 4 – Exemplo de uma iteração do método *Swap* 32
Figura 5 – Movimentos do tipo 2-opt e 3-opt 33
Figura 6 – Exemplo de uma fila, de tamanho *t*, da meta-heurística Fila Tabu 35
Figura 7 – Exemplo de SA homogênea 37
Figura 8 – Exemplo de alguns termos do AG 39
Figura 9 – Operador genético *crossover* de uma posição 45
Figura 10 – Exemplo de um AG híbrido 46
Figura 11 – Estrutura organizacional da STDS 50
Figura 12 – Tela de Solicitação de Veículos 53
Figura 13 – Trecho do relatório de solicitação de veículos 54
Figura 14 – Exemplo de solicitações do dia 09/03/2010 56
Figura 15 – Rotas do veículo 6 para instância de 09/03/2010 59
Figura 16 – Rotas do veículo 7 para instância de 09/03/2010 60
Figura 17 – Exemplo de código na Linguagem C\C++ 63
Figura 18 – Prompt de Comando 64
Figura 19 – Apresentação do resultado do AG 65
Figura 20 – Instância – Solicitações de visitas 66
Figura 21 – Entrada de dados no AG 67
Figura 22 – Movimento com ordem alternada simétrica 68
Figura 23 – Operador de Cruzamento 1P 70
Figura 24 – Operador de Cruzamento 2P 71
Figura 25 – Operador de Cruzamento PM 72
Figura 26 – Operador de mutação 4-opt 73
Figura 27 – Tela de resultado do AG 78
Figura 28 – Mapa de solicitações 84

LISTA DE TABELA

Tabela 1 – Custo Logístico nos EUA (em bilhões de US$) de 1974 a 1994 20
Tabela 2 – Exemplos de problemas derivados do PRV 26
Tabela 3 – Resultado do AG para Cruzamento 1P 79
Tabela 4 – Resultado do AG para Cruzamento 2P 80
Tabela 5 – Resultados do AG para Cruzamento PM 81
Tabela 6 – Comparativo dos resultados do AG 82

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Pseudocódigo de um AG genérico 42
Quadro 2 – Dados de uma instância do problema 55
Quadro 3 – Dados da Instância do dia 09/03/2010 57

Sumário

Resumo 7
Abstract 8
Lista de figuras 9
Lista de tabela 10
Lista de quadros 11
Sumário 12
Capítulo 1 – Introdução 15
1.1 – Considerações iniciais 15
1.2 – Justificativa 16
1.3 – Objetivos 16
1.4 – Estrutura do trabalho 17
Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica 18
2.1 – Logística e Logística de Transportes 18
2.2 – Pesquisa Operacional e Logística de Transporte 21
2.2.1 – O Problema do Caixeiro Viajante 22
2.2.2 – Problema de Roteamento de Veículos 25
2.2.3 – Problema de Roteamento de Veículos com Frota Heterogênea e Janela de Tempo 28
2.3 – Métodos de solução 29
2.3.1 – Método Simplex 29
2.3.2 – Heurísticas 30
2.3.2.1 – Heurística do Vizinho Mais Próximo 31
2.3.2.2 – Swap 32
2.3.2.3 – λ-OPT 33
2.3.2.4 – Heurística Permutacional 34
2.3.3 – Meta-heurísticas 35
2.3.3.1 – Busca Tabu 35
2.3.3.2 – Simulated Annealing 37
2.3.3.3 – Algoritmo Genético 39
2.4 – Considerações finais 40
Capítulo 3 – Algoritmos Genéticos 41

3.1 – Modo de Operação 42
3.2 – Representação do AG 43
3.3 – Estratégia geracional 44
3.4 – Operadores genéticos 46
3.5 – Critério de parada e outros parâmetros 48
Capítulo 4 – Estudo de Caso 49
4.1 – Secretaria do Trabalho e Desenvolvimento Social 49
4.2 – Frota da STDS 52
4.3 – Solicitação de veículos 53
4.4 – O modelo proposto 55
4.4.1 – As variáveis do modelo 56
4.4.2 – Descrição do modelo 57
4.5 – Considerações finais do capítulo 62
Capítulo 5 – AG para o Problema de Roteamento de Veículos 63
5.1 – Construção do Algoritmo 63
5.2 – Entrada de dados e Instâncias do problema 66
5.3 – Geração da População Inicial 68
5.4 – Operadores de cruzamento e de mutação 70
5.4.1 – Operadores de cruzamento 70
5.4.1.1 – Cruzamento com um ponto de corte 70
5.4.1.2 – Cruzamento com dois pontos de corte 71
5.4.1.3 – Cruzamento *PartiallyMapped* 73
5.4.2 – Operador de mutação 74
5.5 – Custo da Solução 75
5.5.1 – Cálculo das distâncias e tempo médio de viagem 75
5.5.2 – Alocação de veículos e custo da solução 76
5.6 – Considerações finais 77
Capítulo 6 – Testes computacionais e analise dos resultados 78
6.1 – Testes do AG 78
6.1.1 – Apresentação dos resultados 79
6.2 – Análise dos resultados 82
6.2.1 – Comparação entre os resultados dos operadores 1P, 2P e PM 82

6.2.2 – Relevância dos resultados para o estudo de caso **84**
Capítulo 7 – Conclusões e Recomendações para trabalhos futuros **87**
7.1 – Conclusões **87**
7.2 – Recomendações para trabalhos futuros **87**
Anexo I **94**

Capítulo 1 – Introdução

1.1 – Considerações iniciais

O Brasil encontra-se numa fase de transição e mudanças de conceito no que diz respeito à logística, pois ao mesmo tempo em que há empresas dando importância da aplicação dos conceitos de gerenciamento da logística, de uma forma geral, eles são pouco utilizados.

A falta de planejamento e de investimentos em infraestrutura no país tem causado grandes problemas nas empresas, como um todo, que não só compromete a saúde financeira das empresas e sua eficiência operacional, como também, e principalmente, o desenvolvimento econômico e social do país.

Muitas das organizações, públicas e privadas, sabem sobre a importância de uma gestão eficiente das atividades logísticas. Esta questão se torna especialmente importante por estar diretamente relacionada aos resultados da organização, pois as atividades logísticas estão diretamente ligadas aos prazos de entrega, níveis de serviço e abrangência do público atendido.

Este trabalho trata do problema de designação de veículos para o transporte de funcionários públicos, sujeitos às restrições operacionais e temporais.

A questão implica na determinação de roteiros econômicos destinados a atender um conjunto de clientes (funcionários), respeitando-se as restrições operacionais e temporais. A estratégia de solução proposta diz respeito à utilização de um modelo matemático, capaz de otimizar a rota de veículos utilizados no setor público.

Porém, para atender aos requisitos pertinentes, não só o setor público, mas qualquer outra organização atuante, necessita desenvolver um meio de desempenho logístico eficiente, implementando, para tanto, seus escopos.

Por isso, trabalhos nesse sentido são importantes para as organizações públicas e privadas, pois apontam para a necessidade de aplicação de ferramentas adequadas objetivando a melhoria dos procedimentos administrativos, estimulando a transparência nas atividades públicas.

O modelo de designação de veículos, que ora se constrói, baseia-se em determinações centradas na proposta de minimização do conjunto de solicitações

não atendidas pelo setor de transporte. No estudo de caso, realizado neste trabalho, foi abordada uma situação particular do Problema de Roteamento de Veículos (PRV), onde há uma frota heterogênea e as coletas e entregas de passageiros são realizadas em momentos separados. Na literatura, este problema específico é pouco estudado, pois a particularidade de realizar as coletas e entregas de passageiros em momentos separados aumenta imensamente a complexidade da obtenção de uma solução viável.

Para obter as soluções do problema abordado serão utilizados Algoritmos Genéticos (AG), uma técnica da computação evolutiva bastante utilizada na resolução de problemas de Pesquisa Operacional.

1.2 – Justificativa

Distribuir de maneira eficiente mercadorias e serviços é uma atividade logística de grande importância e que não pode ser negligenciada na administração da organização, sob pena de perda de competitividade frente ao mercado. A distribuição afeta diretamente o preço dos produtos ou serviços.

Segundo dados de Delaney (1995), *apud* Boersox e Closs (2001), entre 1974 e 1994 os custos de transporte representaram cerca de 51% dos custos logísticos totais.

As técnicas baseadas em Pesquisa Operacional (PO) podem auxiliar um tomador de decisão a tornar um serviço mais eficiente e competitivo. Quando há a aplicação eficiente de uma destas técnicas numa situação real é possível obter uma considerável minimização de custos.

É sob esta ótica, que o presente trabalho visa desenvolver um método para utilização mais eficiente de uma frota de veículos na Secretaria do Trabalho e Desenvolvimento Social do Estado do Ceará (STDS).

1.3 – Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é a resolução do problema logístico de roteirização de uma frota de veículos através da elaboração de um algoritmo baseado na meta-heurística Algoritmo Genético.

Como objetivos específicos têm-se:

a) Pesquisar e apresentar abordagens existentes para os problemas de roteamento;
b) Elaborar, testar e validar o algoritmo de resolução do problema;
c) Implementar o método desenvolvido para atacar o problema prático e analisar os resultados obtidos.

1.4 – Estrutura do trabalho

O presente trabalho está organizado em sete capítulos. No primeiro capítulo são apresentadas as considerações iniciais, a justificativa, os objetivos, a metodologia e a estrutura do trabalho.

O segundo capítulo faz uma breve revisão bibliográfica sobre o papel do transporte para a logística, a abordagem da Pesquisa Operacional (PO) para este problema, bem como sobre o Problema do Caixeiro Viajante (PCV) e o Problema de Roteirização de Veículos (PRV) clássicos, algumas de suas variações e, mais especificamente, o Problema de Roteirização de Veículos com Frota Heterogênea e Janela de Tempo (PRVFHJT). Este capítulo abordará também conceitos sobre as heurísticas e meta-heurísticas de resolução destes problemas.

O terceiro capítulo abordará de maneira mais detalhada os Algoritmos Genéticos (AG), dando mais ênfase à sua construção e seu modo de funcionamento, além de expor algumas de suas principais características.

O quarto capítulo apresentará o estudo de caso, descrevendo o problema que será abordado. Ainda neste capítulo, será apresentado o modelo proposto para atacar o problema, expondo o seu modo de funcionamento.

O quinto capítulo abordará o AG. Este capítulo tratará do seu funcionamento e de como ele é executado, suas funções internas e os cálculos realizados.

O sexto capítulo irá expor os resultados obtidos, discutindo-os e analisando a sua relevância para o caso estudado.

O sétimo e último capítulo trará as conclusões do trabalho e as conclusões para trabalhos futuros.

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica que aborda os conceitos de logística de transporte, pesquisa operacional e como ela pode ser utilizada para otimizar as atividades de transporte interno em uma planta industrial ou entre dois pontos de origem e destinos distantes.

2.1 – Logística e Logística de Transportes

Segundo Bowersox e Closs (2001), a logística envolve a integração de informações, transporte, estoque, armazenamento, manuseio de materiais e embalagens.

Para Gomes e Ribeiro (2004)

> A logística é o processo de gerenciar estrategicamente a aquisição, a movimentação e o armazenamento de materiais, peças e produtos acabados (e os fluxos de informação correlatos) por meio da organização e dos seus canais de *marketing*, de modo a poder maximizar as lucratividades presentes e futuras com o atendimento dos pedidos a baixo custo.

Segundo a definição do *Council of Logistics Management* (CLM) a

> logística é a parte do gerenciamento de cadeias de suprimento responsável pelo planejamento, implementação e controle, de modo eficiente e eficaz, do fluxo e armazenagem de produtos (bens e serviços) e informações relacionadas, do ponto de origem até o ponto de consumo, com vistas ao atendimento das necessidades dos clientes.

Isto implica que uma gestão logística eficiente deve se preocupar com todos estes aspectos logísticos, agindo de maneira a alcançar uma maior eficiência e efetividade dos processos logísticos. A competência na gestão desta área está diretamente ligada ao desempenho da organização e seu nível de serviço.

Boersox e Closs (2001) advertem que o termo *logística* não é específico dos setores privados ou públicos. A gestão logística deve ser uma preocupação tanto no setor público quanto no setor privado.

Apesar da gestão pública e da gestão privada ter objetivos diferentes (a gestão privada tem como objetivo o lucro, já a gestão pública deve ter como objetivo o desenvolvimento social), a preocupação com uma eficiente gestão logística não deve ser descartada em nenhum destes ramos.

Para Novaes (2004) a logística está diretamente relacionada a cinco aspectos da interface entre fornecedor e cliente:

- Produto;
- Informação;
- Momento desejado;
- Gratificação ou Prazer;
- Confiança e Parceria;
- Continuidade.

Novaes (2004) explica que um foco muito importante da logística é o produto, pois é com a intenção de fornecer o produto da maneira mais adequada e com o menor custo possível que a logística se desenvolve. Deste modo os demais aspectos estão diretamente ligados ao produto ou as vantagens que este produto apresenta decorrente do bom desempenho logístico.

Ainda segundo o mesmo autor, a disseminação da informação é de vital importância no decorrer de todos os processos da organização. Um bom funcionamento desta função pode representar um diferencial positivo no que diz respeito a alcançar as metas definidas, assim como uma má gestão de informações pode prejudicar o desempenho organizacional.

Segundo Novaes (2004), o bem ou serviço que dispõe de uma logística eficiente tem seu valor ampliado ao ser disponibilizado no momento desejado pelo cliente e no local onde for mais conveniente. Deste modo a logística de transporte faz uso de um eficiente sistema de gestão da informação para que atenda as necessidades dos clientes no momento adequado.

Ainda de acordo com este autor, quanto à interferência da logística na gratificação do cliente ao usufruir de seu produto vemos aspectos que também estão diretamente ligados a uma gestão eficiente das informações durante toda a cadeia de suprimento. Um erro no processo logístico que leve um produto com características diferentes ou que cause atraso na entrega pode produzir um impacto negativo na percepção do cliente e prejuízos para a organização, uma vez que será necessário executar uma nova operação para a correção do erro.

Novaes (2004) explica ainda que a logística também influencie na confiança entre varejista e consumidor. Caso haja alguma falha perceptível em algum dos elos

da cadeia de suprimentos, isto pode levar a uma perda da confiança do consumidor. Esta falha pode ser um atraso injustificável ou até mesmo uma falta de cortesia do responsável pela entrega ou pela instalação.

Por fim, Novaes (2004) diz que a continuidade está ligada à pós-venda. A logística contribui neste quesito dando suporte aos serviços de pós-venda (como os relacionados à garantia do produto, ou à logística reversa do recolhimento de alguns produtos após o seu período de consumo) e tornando a parceria entre fornecedor e cliente mais duradoura.

Ao analisar estes fatores, expostos por Novaes (2004), é possível perceber o papel fundamental desempenhado pela logística de transportes frente à gestão da cadeia de suprimentos como um todo.

A logística de transportes é importante não só para o bom desempenho geral da organização, como também para o seu desempenho financeiro. Um dos fatores de maior impacto no custo logístico é o custo de transporte.

Gomes e Ribeiro (2004) afirmam que “o custo de transporte representa a maior parcela dos custos logísticos na maioria das empresas; em muitos casos, supera o lucro operacional”.

Segundo Ballou (2008) os custos com transporte absorvem de um a dois terços do custo logístico total.

Na Tabela 1 a seguir são expostos os custos logísticos do EUA, em bilhões de dólares. Baseado nos dados do período de 1974 a 1994 observa-se que, em média, cerca de 50,89% dos custos logísticos totais dos EUA no período de 1974 a 1994 foram relativos aos custos com transporte.

Uma forma de trabalhar a redução dos custos logísticos e, em especial, da logística de transporte, é a utilização de técnicas especializadas na roteirização e no gerenciamento de frota.

A Pesquisa Operacional pode ser de grande ajuda neste cenário, uma vez que apresenta várias técnicas que vêm sendo desenvolvidas especialmente para a área de roteirização. Os próximos tópicos darão maiores enfoques às tais técnicas, seu funcionamento e suas características.

Tabela 1 – Custo Logístico nos EUA (em bilhões de US$) de 1974 a 1994

Ano	Custo de Manutenção de estoque		Custo de Transporte		Custo Administrativo		Custo Total	
1974	US$ 119	48,77%	US$ 116	47,54%	US$ 9	3,69%	US$ 244	100%
1975	US$ 110	46,81%	US$ 116	49,36%	US$ 9	3,83%	US$ 235	100%
1976	US$ 116	44,79%	US$ 133	51,35%	US$ 10	3,86%	US$ 259	100%
1977	US$ 126	43,90%	US$ 150	52,26%	US$ 11	3,83%	US$ 287	100%
1978	US$ 155	45,19%	US$ 175	51,02%	US$ 13	3,79%	US$ 343	100%
1979	US$ 200	48,90%	US$ 193	47,19%	US$ 16	3,91%	US$ 409	100%
1980	US$ 243	52,15%	US$ 205	43,99%	US$ 18	3,86%	US$ 466	100%
1981	US$ 283	52,41%	US$ 236	43,70%	US$ 21	3,89%	US$ 540	100%
1982	US$ 255	49,51%	US$ 240	46,60%	US$ 20	3,88%	US$ 515	100%
1983	US$ 228	46,44%	US$ 244	49,69%	US$ 19	3,87%	US$ 491	100%
1984	US$ 257	48,77%	US$ 250	47,44%	US$ 20	3,80%	US$ 527	100%
1985	US$ 240	45,71%	US$ 265	50,48%	US$ 20	3,81%	US$ 525	100%
1986	US$ 233	44,47%	US$ 271	51,72%	US$ 20	3,82%	US$ 524	100%
1987	US$ 243	44,02%	US$ 288	52,17%	US$ 21	3,80%	US$ 552	100%
1988	US$ 266	44,19%	US$ 313	51,99%	US$ 23	3,82%	US$ 602	100%
1989	US$ 311	46,56%	US$ 331	49,55%	US$ 26	3,89%	US$ 668	100%
1990	US$ 298	44,08%	US$ 352	52,07%	US$ 26	3,85%	US$ 676	100%
1991	US$ 270	41,22%	US$ 360	54,96%	US$ 25	3,82%	US$ 655	100%
1992	US$ 243	37,56%	US$ 379	58,58%	US$ 25	3,86%	US$ 647	100%
1993	US$ 250	37,31%	US$ 394	58,81%	US$ 26	3,88%	US$ 670	100%
1994	US$ 277	37,95%	US$ 425	58,22%	US$ 28	3,84%	US$ 730	100%
Média	-	45,27%	-	50,89%	-	3,84%	-	-

Fonte: DELANEY (1995) *apud* BOERSOX (2001)

2.2 – Pesquisa Operacional e Logística de Transporte

A Pesquisa Operacional (PO) surgiu no cenário da Segunda Guerra Mundial (1939 – 1945) para auxiliar nos problemas de natureza logística. Com o final da guerra e o sucesso na utilização destas técnicas, os estudiosos que haviam trabalhado com elas começaram a empregar seus conhecimentos na indústria (SOBRAPO).

Uma aplicação bastante recorrente das técnicas de PO ocorre no roteamento de veículos para entrega ou coleta de mercadorias, visitas de assistência técnica, rotas de entregas de encomendas, entre outros.

A seguir serão apresentados alguns dos modelos mais utilizados para a resolução destes problemas.

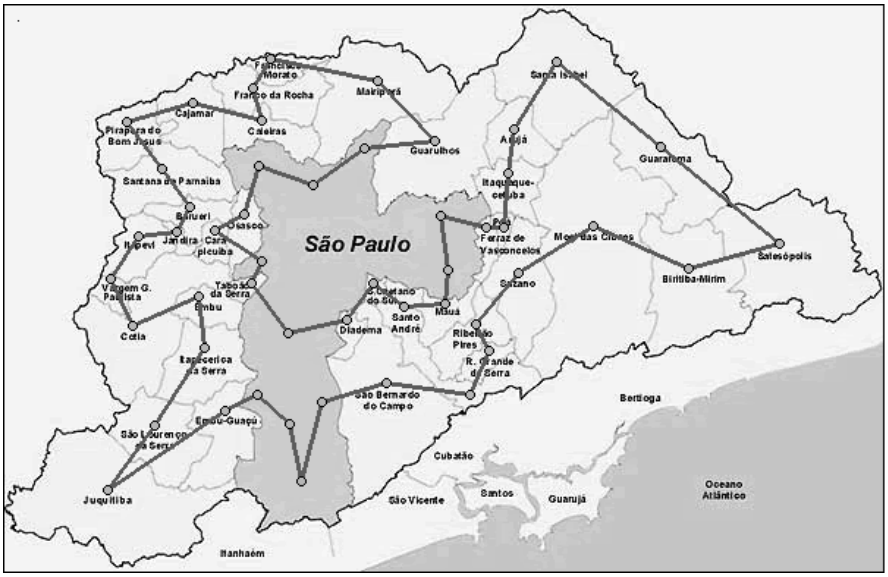
2.2.1 – O Problema do Caixeiro Viajante

Segundo Goldbarg e Luna (2005), o Problema do Caixeiro Viajante (PCV) é um dos mais conhecidos problemas de PO. Este tipo de problema consiste geralmente em traçar uma rota que deve passar por uma determinada quantidade de pontos. Estes pontos podem representar cidades, clientes, depósitos, etc.

Sua origem vem de um jogo desenvolvido por Willian Rowan Hamilton que propôs um problema onde se deveria encontrar uma rota, através dos vértices de um dodecaedro, onde a origem e o final da rota ficassem no mesmo ponto e nenhum outro ponto fosse visitado mais de uma vez. As soluções para este problema ficaram conhecidas como ciclos hamiltonianos (APPLEGATE *et al.*).

O PCV é um problema de otimização onde se deve determinar um ciclo hamiltoniano que forneça a rota de menor custo, ou menor distância percorrida.

Figura 1 – Exemplo de ciclo do Caixeiro Viajante.



Fonte: Google Imagens (2013)

Na Figura 1, acima, observa-se o exemplo de um trajeto do modelo obtido pelo PCV, onde há uma quantidade determinada de pontos a serem visitados na região conhecida como Grande São Paulo, e esta rota é determinada de modo que

todos os pontos sejam visitados e que nenhum dos pontos seja visitado mais de uma vez.

O PCV pode ser matematicamente representado segundo a formulação abaixo:

minimizar $$z = \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} c_{ij} x_{ij} \qquad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^{n} x_{ij} = 1 \qquad \forall j \in N \qquad (2)$$

$$\sum_{j=1}^{n} x_{ij} = 1 \qquad \forall i \in N \qquad (3)$$

$$\sum_{i,j \in S}^{n} x_{ij} \leq |S| - 1 \ \forall S \subset N \qquad (4)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \qquad \forall i, j \in N, i \neq j \qquad (5)$$

Esta formulação, conhecida como formulação de Dantzig-Fulkerson-Johnson, propõe uma função que deve ser minimizada e uma série de restrições. Para que a solução encontrada seja considerada válida todas as restrições devem ser atendidas.

A variável binária x_{ij} assume valor igual a 1, se o arco $(i, j) \in A$ for escolhido para integrar a rota e, 0 em caso contrário. S é um subgrafo de N, em que $|S|$ representa o número de vértices desse subgrafo (GOLDBARG e LUNA, 2005).

Nesta formulação do PCV as equações (2), (3) e (4) são as restrições e a equação (5) determina os valores possíveis para as variáveis x_{ij}. As equações do tipo (2) e (3) garantem que cada ponto será visitado apenas uma vez. Já a equação (4) nos garante que o ciclo gerado será hamiltoniano, ou seja, passará por todos os pontos, não permitindo que a rota gerada seja formada por dois ciclos menores.

Ainda segundo Goldbarg e Luna (2005), além da aplicação na determinação de rotas para veículos, existem diversas aplicações possíveis para o PCV como, por exemplo, determinação de acesso a arquivos computacionais, manipulação de itens

em estoque, análise de estruturas cristalinas, fabricação de Chips VLSI, testes citológicos, entre outros.

Além do PCV clássico existem diversos problemas derivados dele. Alguns desses problemas, descritos por Goldbarg e Luna (2005) são descritos a seguir:

- *PCV Simétrico*: Caso particular do PCV onde a matriz de custos é simétrica. É amplamente utilizado no roteamento de veículos, onde se assumem as distâncias de ida e volta como iguais.
- *PCV com Janelas de Tempo*: Para este caso do PCV é adicionada uma variável t_{ij} que representa o tempo do percurso entre os nós *i* e *j*. Deste modo é gerada uma matriz $T = \left[t_{ij} \right]$. Assim o tempo de chegada a cada vértice *i* estaria associado a um intervalo de tempo $\left[a_i, b_i \right]$ chamado de janela de tempo.
- *PCV Estocástico*: Neste modelo, as janelas de tempo, os vértices, os tempos e os custos das arestas são elementos aos quais poderemos associar distribuições de probabilidades que lhes definirão a existência ou o valor. Podemos ressaltar o PCV com clientes estocásticos, o PCV com tempo de viagem estocástico e o PCV múltiplo com tempo de viagem estocástico como os seus principais desdobramentos.
- *PCV Periódico*: Este problema consiste em programar uma visita diária do caixeiro em um horizonte de *m* dias. O caixeiro pode visitar um ponto mais de uma vez nestes *m* dias, mas não em um mesmo dia. Também não são permitidos dias com rotas vazias. O objetivo é minimizar a rota total dos *m* dias.
- *PCV com Coleta*: Considerando que o veículo do caixeiro viajante possua uma determinada capacidade e que o caixeiro deva entregar e recolher produtos de seus clientes. Considerando ainda que os produtos coletados possam ser entregues a outros clientes na rota, o PCV com Coleta consiste em programar um trajeto que, atendendo ao todos os clientes de demanda e oferta dentro da capacidade do veículo minimize a distância percorrida.

- *PCV com Alvos Móveis*: Dado um conjunto de alvos móveis s_i com velocidade v_i constante e posição inicial p_i, o problema consiste em determinar uma trajetória que inicie e termine em uma posição com velocidade $V > |v_i|$ e intercepte todos os alvos.
- *PCV Bipartido*: O problema consiste em determinar um circuito hamiltoniano de custo mínimo sobre um grafo ponderado que possui *n* nós vermelhos e *n* nós azuis, de modo que o circuito inicie em um nó azul e os nós vizinhos no circuito possuem sempre cores diferentes.

2.2.2 – Problema de Roteamento de Veículos

Os Problemas de Roteamento de Veículos (PRV) estão entre os mais estudados e mais complexos da área te otimização combinatória devido a grande quantidade de variáveis e diversidade de suas restrições. Gendreau (1994) afirma que o PRV é o coração da gestão de distribuição e tem sido estudado extensivamente nos últimos trinta anos.

Este problema possui uma enorme quantidade de aplicações em situações reais, principalmente ligadas à indústria, ao comércio, ao setor de serviços, à segurança e à saúde pública.

Laporte (1992) define o PRV como sendo o problema de projetar rotas ótimas de coleta ou entrega de um ou vários depósitos para uma série de cidades ou clientes geograficamente dispersos, sujeitos a restrições laterais.

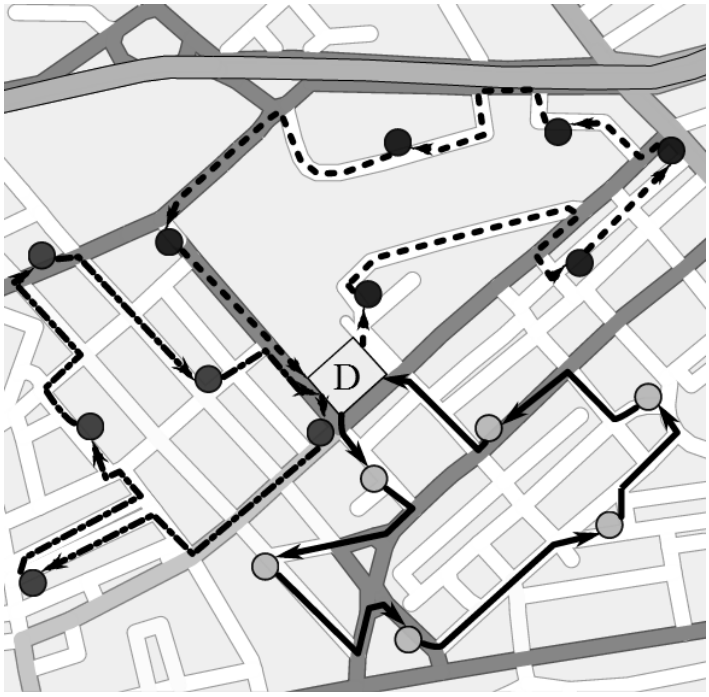
Segundo Goldbarg e Luna (2005), as decisões que dizem respeito à operação da frota de veículos são deixadas a encargo do nível operacional, e este se preocupará principalmente em providenciar planos econômicos e flexíveis para o atendimento da rede de demanda. É neste contexto que define-se o PRV.

Ainda de acordo com Goldbarg e Luna (2005), os elementos de entrada mais prováveis dos PRV tradicionais são:

- ✓ Os clientes servidos pelos depósitos
- ✓ A demanda dos clientes
- ✓ O tamanho da frota alocada a cada depósito
- ✓ O tipo de veículo empregado (capacidade, velocidade, etc)

Na Figura 2 a seguir há o exemplo de uma possível rota gerada por um PRV com três veículos que atendem a dezessete diferentes clientes. Observa-se que nenhum dos clientes é visitado mais de uma vez pelo mesmo veículo durante o trajeto e nenhum dos clientes é visitado por mais de um veículo.

Figura 2 – Exemplo de rota gerada pelo PRV



Fonte: Google Imagens (2013)

O PRV clássico apresenta a seguinte formulação matemática:

minimizar $$z = \sum_{v=1}^{m} \sum_{i=0}^{n} \sum_{j=1}^{n+1} c_{ij} x_{ijv} \qquad (6)$$

sujeito a:

$$\sum_{v=1}^{m} \sum_{j=1}^{n+1} x_{ijv} = 1; \qquad \forall i \in C \qquad (7)$$

$$\sum_{i=1}^{n} q_i \sum_{j=1}^{n} x_{ijv} = k; \qquad \forall v \in V \qquad (8)$$

$$\sum_{j=1}^{n} x_{0jv} = 1; \qquad \forall v \in V \qquad (9)$$

$$\sum_{j=1}^{n} x_{jhv} - \sum_{j=1}^{n} x_{hjv} = 0 \ ; \qquad \forall v \in V \ ; \ \forall h \in C \qquad (10)$$

$$\sum_{i=1}^{n} x_{i(n+1)v} = 1 \ ; \qquad \forall v \in V \qquad (11)$$

$$x_{ijv} \in \{0,1\} \ ; \ \forall i, j \in C \ ; \ i \neq j \ ; \ \forall v \in V \qquad (12)$$

No PRV a função de minimização pode tratar diversos objetivos. Pode-se buscar a redução: dos prazos de entrega; dos caminhos a percorrer; da alocação de mão de obra; dos riscos de acidentes; ou do número de veículos utilizados.

Nesta formulação apresentada observa-se que a função objetivo (Equação 6) está descrita como sendo o somatório dos custos de trajeto de todos os ciclos, para todos os veículos da frota, logo temos que a solução do problema deve minimizar o valor desta função objetivo.

A seguir têm-se as restrições do modelo matemático. A Equação (7) garante que cada cliente terá sua demanda atendida por somente um único veículo. A Equação (8) garante que nenhum veículo seja carregado com uma carga além de sua capacidade. A Equação (9) obriga todos os veículos a iniciarem sua rota no depósito (ponto 0). A Equação 10 faz com que os veículos sejam forçados a fazer uma rota completa, sem que um ciclo seja deixado em aberto. E, por fim, a Equação 11 garante que as rotas terminem no depósito (ponto n+1, que é o mesmo ponto 0).

Devido a sua aplicação em diversos tipos de problemas reais, nas mais diversas situações, existe uma enorme quantidade de problemas derivados do PRV clássico.

Tabela 2 – Exemplos de problemas derivados do PRV

Problemas de roteamento em arco	**Problemas de roteamento em nós**
Problema do Carteiro Chinês	Problema de roteamento de veículos com múltiplos depósitos
Problema do Carteiro Chinês não-direcionado	Problema de roteamento de veículos com janelas de tempo
Problema da Empilhadeira	Problema de roteamento estocástico de veículos

Problema do k-Carteiro Chinês	Problema de roteamento dinâmico de veículos
Problema do Carteiro ao Vento	Problema de Roteamento periódico de Veículos

Fonte: Adaptado de GOLDBARG e LUNA (2005)

Maganti (1981), *apud* Goldbarg e Luna (2005), e Letchford (1996), *apud* Goldbarg e Luna (2005), afirmam que os problemas de roteamento podem ser divididos em duas classes principais: problemas de roteamento em nós, que são associados aos ciclos hamiltonianos, e problemas de roteamento em arcos, que são associados aos ciclos eulerianos.

Na Tabela 2 foram apresentados alguns dos exemplos de problemas derivados do PRV clássico. A seguir será dada uma maior atenção ao caso especial do Problema de Roteamento de Veículos com Frota Heterogênea e Janela de Tempo.

2.2.3 – Problema de Roteamento de Veículos com Frota Heterogênea e Janela de Tempo

Este caso particular do PRV, onde há frota heterogênea e a restrição da janela de tempo, apresenta semelhança com uma grande gama de situações reais da logística de transporte, na distribuição de produtos e serviços.

Em Dell'Amico *et al.* (2007), Bräysy *et al.* (2008), Pourghaderi, Torabi e Sekhavat (2009) observam-se exemplos de aplicações do PRVFHJT onde sua utilização foi bem sucedida.

Por ser um problema derivado do PRV, o PRFHJT apresenta uma formulação matemática bastante semelhante ao problema clássico, salvo algumas pequenas alterações.

A característica da frota heterogênea do PRVFHJT obriga que haja mudança na segunda restrição do PRV (Equação 8), para garantir que a carga transportada não exceda a capacidade total do veículo. Assim, ela passa a apresentar o seguinte formato:

$$\sum_{i=1}^{n} q_i \sum_{j=1}^{n} x_{ijv} \leq k_v \; ; \qquad \forall v \in V \qquad (13)$$

Deste modo será necessário especificar as informações em uma matriz onde estarão alocadas as capacidades de cada veículo, uma vez que cada veículo pode ter uma capacidade única associada a ele.

Já para a característica da janela de tempo do PRVFHJT é necessário que sejam acrescentadas duas novas equações que irão tratar esta restrição.

$$r_{iv} + t_{Si} + t_{ij} - W(1 - x_{ijv}) \leq r_{jv} \; ; \qquad \forall i, j \in C, v \in V \qquad (14)$$

$$a_i \leq r_{iv} \leq b_i \; ; \qquad \forall i \in C, v \in V \qquad (15)$$

A Equação 14 restringe o atendimento, de modo que o veículo v só chegue ao cliente j (variável r_{jv}) após ter passado em i (r_{iv}), para realizar o serviço ou descarga neste ponto (t_{Si}) e completar o trajeto do arco $\widehat{ij}$ (t_{ij}).

Já a Equação 15 garante que o tempo de chegada do veículo v ao ponto i esteja no intervalo $[a_i, b_i]$, denominado de janela de tempo.

2.3 – Métodos de solução

Existem diversos métodos para se chegar a uma boa solução dos problemas de roteamento através da PO. É possível obter a solução exata, também conhecida por solução ótima, ou a uma solução aproximada dependendo de qual método de resolução for utilizado. Gendreau (1994) afirma que apenas problemas relativamente pequenos podem ser resolvidos de modo a encontrar a solução ótima. A seguir serão apresentados alguns dos principais métodos de resolução do problema, ressaltando suas características, vantagens e desvantagens.

2.3.1 – Método Simplex

O Método Simplex é um algoritmo desenvolvido por George Dantzig que tem por objetivo viabilizar a solução de problemas de programação linear.

Goldbarg e Luna (2005) definem: “Algoritmo é um procedimento que termina em um número finito de operações (passos)”. Isto implica que o Método Simplex será capaz de encontrar uma solução em um número finito de iterações.

Segundo Ehrlich (1991), o método simplex é um algoritmo iterativo convergente, que pesquisa os vértices do poliedro formado a partir das restrições com o valor associado à função objetivo. Em um número finito de iterações o algoritmo fornece a solução ótima ou a indicação da inexistência de solução.

Este método trabalha de modo a encontrar a solução ótima de um Problema de Programação Linear. Ele usa as restrições do modelo matemático do problema como sendo as equações de um sistema e, a partir daí, testa suas soluções. Partindo de uma solução inicial viável ele anda de vértice em vértice sempre procurando por soluções iguais ou melhores que as já encontradas anteriormente.

2.3.2 – Heurísticas

Nos casos onde o tempo para chegar à solução ótima torna-se inviável, existem métodos que fazem uso de soluções aproximadas. Alguns deles são conhecidos como métodos de otimização combinatória. Atualmente já existem métodos capazes de produzir solução bem próxima da solução ótima.

Dois métodos de abordar esses métodos de otimização combinatória são as heurísticas e as meta-heurísticas. O desenvolvimento destes métodos deu-se principalmente em decorrência da dificuldade de encontrar soluções exatas nos problemas de grande porte em tempo hábil.

Segundo Souza (2008), o termo heurística tem origem na palavra grega *heuriskein*, que significa encontrar ou descobrir. Ainda segundo o mesmo autor, estes métodos heurísticos propõem solução com base nas informações da função objetivo a ser otimizada. Estes métodos buscam a solução através de regras de probabilidade, operando de maneira randômica e às vezes orientada.

Segundo Reeves (1995), *apud* Gomes (2012), heurística é uma técnica que procura boas soluções em um tempo computacional razoável sem garantir viabilidade ou otimalidade e, em muitos casos, sem definir o quão próxima uma solução viável está da solução ótima do problema.

Sousa (2009) destaca as seguintes vantagens da utilização dos métodos heurísticos:

- Possibilitam a flexibilização para manejar as variáveis ou características do problema;

- Podem apresentar mais de uma solução, possibilitando ao analista verificar qual tem a melhor qualidade para o problema analisado;
- A maioria dos métodos consegue alcançar soluções de boa qualidade sem recorrer ao formalismo matemático

A seguir serão apresentadas algumas heurísticas de grande utilização na resolução de problemas como o PCV e o PRV. Estas heurísticas apresentam um funcionamento simples e um baixo esforço computacional, o que permite a elas obter soluções viáveis em tempos relativamente pequenos.

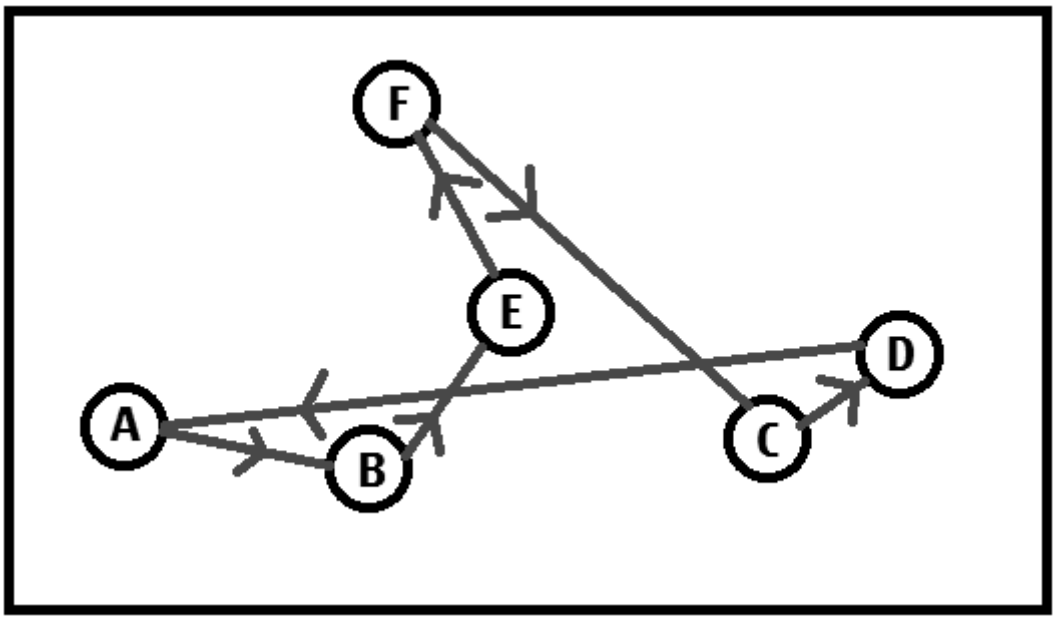
2.3.2.1 – Heurística do Vizinho Mais Próximo

A heurística do vizinho mais próximo foi inicialmente descrita por Solomon (1987). Este se trata de um método simples e com baixo esforço computacional e, justamente por isso, é capaz de retornar soluções em pequenos intervalos de tempo, mesmo para problemas de grandes dimensões.

O funcionamento deste método se dá através da escolha da ordem dos pontos a serem visitados pelo caixeiro viajante a partir da análise da matriz de distâncias. Uma vez que seja escolhido o ponto inicial da trajetória, todos os demais pontos serão analisados de modo a obter aquele cuja distância entre ele e o ponto atual é a menor possível, ou seja, o ponto vizinho que está mais próximo. Em seguida o próximo ponto será escolhido utilizando-se desta mesma regra. Este método de escolha do próximo ponto visitado se repete até que todos os pontos tenham sido visitados.

Na Figura 3 abaixo há um exemplo de PCV composto por seis pontos (A, B, C, D, E, F). A rota foi elaborada de tal modo que começasse no ponto A e seguisse o Método do Vizinho Mais Próximo para que fosse selecionado o ponto seguinte. Deste modo a rota teve a seguinte configuração: A → B → E → F → C → D → A.

Figura 3 – Método do Vizinho Mais Próximo



Fonte: Elaborado pelo autor.

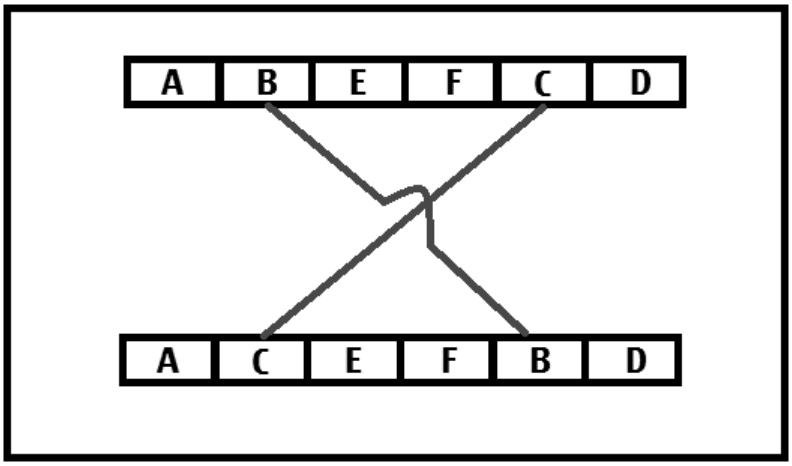
No entanto, esta heurística apresenta limitações, uma vez que sua única fonte de análise é a matriz de distâncias. Este método dificilmente consegue fornecer a solução ótima, pois deixa as maiores distâncias para o final de sua rota.

2.3.2.2 – Swap

O método *swap* foi descrito por Corberán (2000), *apud* Gomes (2012), e se apoia no conceito de permutas. Uma vez sendo encontrada uma solução inicial viável, o método consiste em realizar a permuta na ordem dos clientes visitados um-a-um e analisar se o resultado obtido é melhor ou pior que o anterior. Caso o novo resultado apresente melhor desempenho, este será guardado como solução do problema até que um novo melhor resultado seja encontrado. Este processo se repete até que um critério de parada, como número de iterações ou tempo de processamento, seja atingido.

A Figura 4 abaixo exemplifica uma iteração a partir do método *swap*. Supondo que este método fosse aplicado na solução obtida através da rota elaborada na Figura 3, pode haver um *swap* na sequência A → B → E → F → C → D que se tornará A → C → E → F → B → D, e então será testada, a fim de saber se esta nova solução é ou não melhor que a anterior.

Figura 4 – Exemplo de uma iteração do método *Swap*



Fone: Elaborado pelo autor

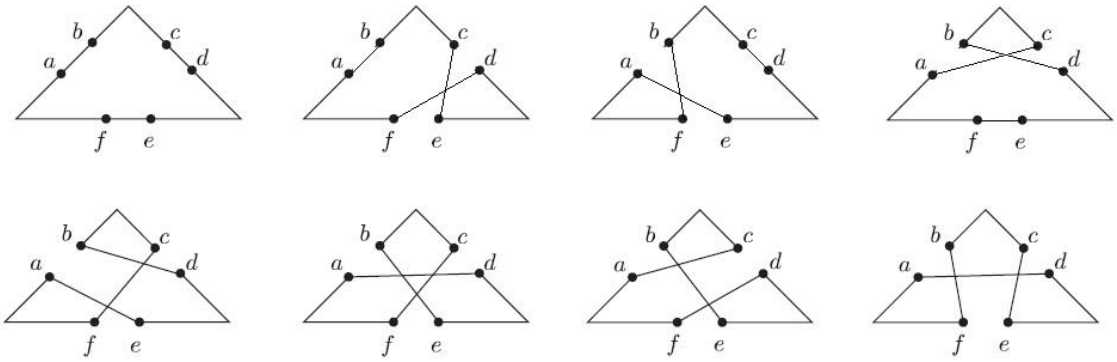
2.3.2.3 – λ-OPT

Segundo Helsgaun (1999), este método foi originalmente implementado por Lin e Kernighan em 1971 e trata-se de um dos mais eficientes algoritmos aproximativos para a solução de um PCV simétrico. Este algoritmo se mostrou capaz de resolver de maneira ótima muitos dos problemas com 100 ou menos cidades.

O algoritmo básico, 2-opt, é uma variação do λ-opt onde, a cada iteração, duas arestas não consecutivas da rota serão permutadas. Caso o custo total da nova rota seja menor que o anterior, esta nova rota será mantida e a anterior descartada. Este procedimento se repete até que algum critério de parada seja atingido.

Para Helsgaun (1999), em geral, quanto maior o valor de λ, mais provável é que se chegue ao valor ótimo para o trajeto completo. No entanto, o número de operações para que se testem todas as λ-combinações aumenta rapidamente, com o aumento do número de cidades. Devido a isto, os valores de λ = 2 e λ = 3 são os mais utilizados. Ainda assim, existem estudos para λ = 4 e λ = 5, como em Christofides e Eilon (1972).

Figura 5 – Movimentos do tipo 2-opt e 3-opt



Fonte: Bezerra (2012)

A Figura 5 acima mostra os exemplos de trocas realizadas nos casos de 2-opt e 3-opt. Os exemplos realizados, utilizando-se destes seis pontos, servem para ilustrar as trocas de trechos não consecutivos, como por exemplo o 2-opt ilustrado onde a rota A → B → C → D → E → F passa a ser A → B → C → E → D → F e em seguida A → E → D → C → B → F e, por fim, A → C → B → D → E → F.

2.3.2.4 – Heurística Permutacional

A Heurística Permutacional (HP) é um método de otimização combinatória, desenvolvida por Silva e Soma (2001), e pode ser aplicado a diversos problemas de PO, dentre eles o PCV e o PRV, além dos problemas derivados destes.

O Método HP consiste em dividir o conjunto de soluções viáveis S em n vizinhanças $N(S_i)$ distintas entre si, onde para cada $1 \leq i \leq n$, s_i é uma permutação que inicia com o ponto i, e cada uma destas vizinhanças será particionada em quatro subvizinhanças $N(S_{ij}) \subset (S_i), 1 \leq j \leq 4$. O número total de soluções (permutações) geradas pela HP é $[2n(n-1)(n-2)+4n]$.

Silva *et al.* (2005) elaboraram uma reformulação do HP, tratada como HP*, que tem por objetivo expandir o número de diversificações e consequentemente tentar diminuir os desvios percentuais entre as soluções obtidas e a solução ótima. Com isto o número de permutações passa de $[2n(n-1)(n-2)+4n]$ para $[12n(n-1)(n-2)+24n]$.

2.3.3 – Meta-heurísticas

Segundo Hillier e Liberman (2010), meta-heurística é um método de resolução geral que fornece tanto uma estrutura quanto diretrizes de estratégia gerais para desenvolver um método heurístico específico para determinado tipo de problema.

Gomes (2011) afirma que:

> "A característica fundamental de uma meta-heurística é sua habilidade de diversificar o campo de soluções e "escapar" de um ótimo local. No processo iterativo de busca de soluções, as meta-heurísticas ao atingirem ótimos locais executam mecanismos de "fuga" dessa região de soluções de diversas maneiras diferentes, dentre as quais se destacam a permissão de soluções inferiores em casos de maximização ou superiores em caso de funções-objetivo de minimização".

As mais conhecidas e utilizadas meta-heurísticas são a Busca Tabu (BT), o *Simulated Annealing* (SA) e o Algoritmo Genético (AG). A seguir uma breve descrição de cada uma destas meta-heurísticas.

2.3.3.1 – Busca Tabu

Busca Tabu (BT) é uma meta-heurística que guia um algoritmo de busca local dentro de um espaço de busca. Este método foi desenvolvido na década de 1970 por Fred Glover e Manuel Laguna. Segundo Glover e Laguna (1997) uma característica que distingue a BT dos demais métodos está incorporada em sua exploração de forma adaptativa de memória, o que o possibilita a enfrentar complexidades que confundiriam outros métodos.

Osman (1993) afirma que a BT tem a habilidade de realizar uma busca iterativa de solução que é capaz de escapar de ótimos locais através de uma função de avaliação que escolhe a melhor avaliação em termos de função objetivo e restrição tabu.

A partir de uma solução inicial esta meta-heurística tenta avançar a uma solução melhor que a anterior dentro de sua vizinhança até que certo critério de parada seja atingido.

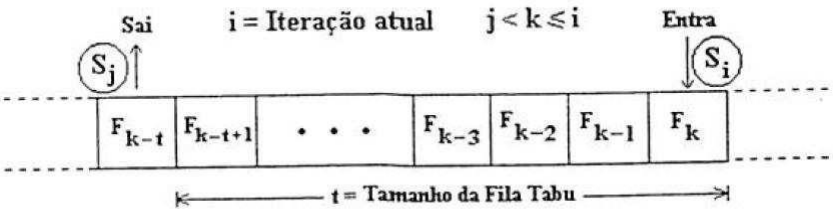
Ainda segundo Glover e Laguna (1997), a BT tem base na premissa de que, para resolver o problema, deve-se incorporar uma memória adaptativa e uma

exploração sensível. O recurso de memória adaptativa da BT permite a implementação de procedimentos que são capazes de buscar uma boa solução de maneira econômica e eficiente.

Gomes (2011) explica que, a partir de uma solução inicial viável, a BT opera realizando movimentos em um determinado espaço de busca ou vizinhança, e avaliando os resultados destes movimentos. Alguns destes movimentos avaliados são utilizados para a formação de uma *fila tabu*, que representa aquelas soluções que não poderão ser utilizadas por uma quantidade determinada de iterações. Existe, entretanto, uma função chamada de *Função de Aspiração* onde, caso um determinado movimento obedeça a seus critérios, este não irá compor a *fila tabu*. Normalmente a *Função de Aspiração* compara as diversas soluções com a melhor já encontrada e guarda aquela que produzir o melhor resultado. A *fila tabu* é dinâmica durante o procedimento de resolução do problema, de modo que a cada iteração alguns elementos são retirados dela e outros acrescentados.

A Figura 6, abaixo, exemplifica o que é uma *fila de soluções* de tamanho *t*. Para que seja formada a *fila de soluções*, deve-se definir o tamanho *t* desta fila e, a cada iteração, a solução gerada pelo movimento será testada e adicionada a fila, desde que não obedeça aos critérios da *função de aspiração*. Uma vez que esta solução participe da composição da *fila de soluções* não poderá mais ser testada durante *t* iterações. Ao final da *t*-éssima iteração, a solução em questão não fará mais parte da *fila de movimentos*.

Figura 6 – Exemplo de uma fila, de tamanho *t*, da meta-heurística Fila Tabu



Fonte: Viana (1998)

2.3.3.2 – Simulated Annealing

Simulated Annealing (SA) pode ser traduzido como “têmpera simulada” ou “arrefecimento simulado”. Este termo faz referência a um procedimento físico, largamente utilizado no ramo da metalurgia, também conhecido como recozimento. Neste processo de recozimento, a temperatura do material é elevada e, depois, gradualmente o material é resfriado para que os átomos possam rearranjar-se em posições de menor energia.

É seguindo esta lógica do processo físico de têmpora que funciona o algoritmo SA. Segundo Campelo (2010), o algoritmo SA permite a movimentação dentro do espaço de busca, de modo que inicialmente se atinja um ponto com maior (ou menor) custo, visando evitar mínimos locais e, em seguida, partindo em direção ao ótimo global da função objetivo.

Osman (1993) afirma que o SA impõe uma busca aleatória local a fim de escapar de resultados ruins. Esta busca faz uso de métodos que não aceitam movimentos sem melhoras de resultado em nenhuma iteração.

Osman (1993) afirma ainda que SA compartilha com a BT a característica de ser capaz de escapar dos ótimos locais, evitando assim resultados ruins.

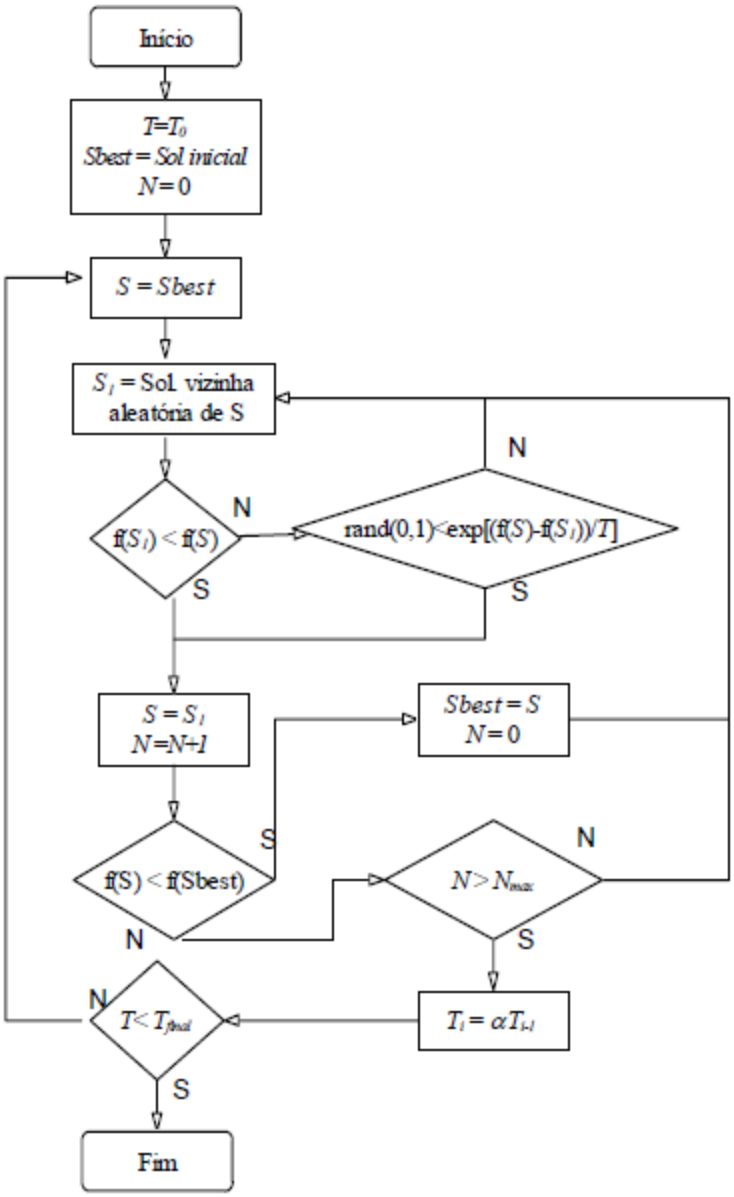
Ribas (2003) afirma que neste algoritmo, a quantidade de energia é representada pela função objetivo que se deseja minimizar, assim a solução ótima seria encontrado no estado de energia mínima. Ele informa que SA pode escapar de mínimos locais, pois há a probabilidade de aceitar soluções piores. Esta probabilidade depende da temperatura (quanto maior a temperatura, maior a probabilidade) e da variação em direção a solução ótima (quanto menor essa variação, maior a probabilidade), sendo a temperatura um parâmetro de controle que ajuda a atingir este estado mínimo de energia, que não tem nenhuma correspondência real no sistema.

Ainda segundo Ribas (2003), SA pode apresentar a variação em sua temperatura de duas formas: de maneira homogênea ou de maneira heterogênea. A variação homogênea significa que a temperatura permanecerá constante durante *n* iterações. Ao final das *n* iterações a temperatura poderá ser automaticamente alterada. No entanto há autores que optam por realizar um teste para medir a

variação da função objetivo. Caso haja uma grande variação, isto significa que esta temperatura ainda poderá contribuir para a obtenção de um melhor resultado e será alterada novamente e testada, ao final de mais um ciclo de *n* iterações. Já a forma heterogênea apresenta variações na temperatura a cada iteração.

A Figura 7 a seguir representa o funcionamento de SA homogênea, onde pode-se observar a busca pela solução de menor energia ($f(S) < f(S_{best})$) e o critério de parada que é a temperatura do algoritmo ($T < T_{final}$).

Figura 7 – Exemplo de SA homogênea



Fonte: Ribas (2003)

2.3.3.3 – Algoritmo Genético

O Algoritmo Genético (AG) é um método aproximado para a resolução dos problemas de PO. Foi criado por Holland (1975) e consolidado por trabalhos como os de Grefenstette (1986), Davis (1989) e Goldberg (1989).

Goldbarg e Luna (2005) informam que os AGs são métodos de busca baseados em mecanismos de seleção e evolução natural, ou seja, pertencem a classe dos algoritmos evolutivos, que usam técnicas baseadas na biologia evolutiva como hereditariedade, mutação, seleção natural e cruzamento (*crossover*).

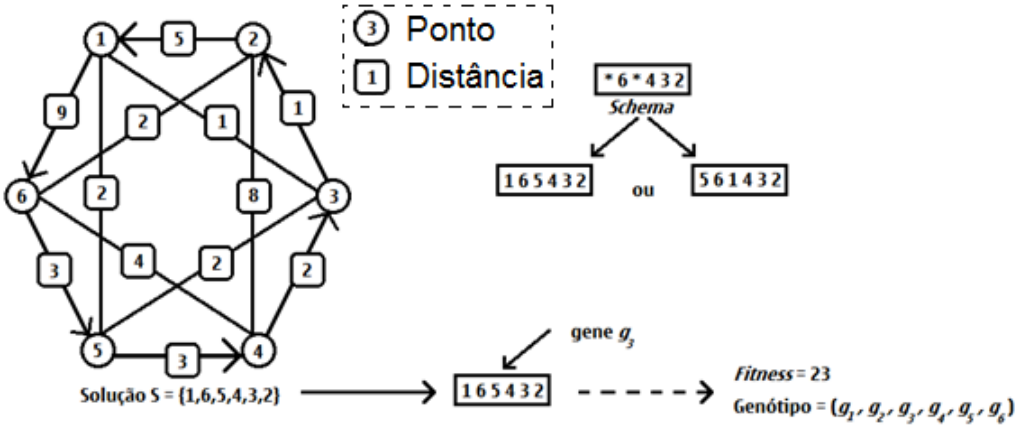
Os AGs são largamente utilizados na busca de soluções para problemas de PO, em especial os problemas de roteirização. Em Goldbarg e Luna (2005) encontram-se várias definições para os termos mais utilizados na aplicação destes algoritmos:

- **População**: conjunto de indivíduos, ou seja, conjunto de soluções do problema.
- **Cromossomo**: representa um indivíduo (ou solução) na população.
- ***Fitness***: medida de aptidão de um indivíduo, normalmente associada ao valor da função objetivo para uma dada solução.
- **Gene**: representa uma componente do cromossomo, ou seja, um ator do problema.
- **Alelo**: descreve os possíveis estados de um indivíduo, ou seja, os possíveis valores de uma variável do problema.
- ***Locus***: representa a posição do atributo no cromossomo.
- **Operadores genéticos**: são as regras que permitem a manipulação do cromossomo, que pode ser de dois tipos:
    - ***crossover***: operador que permite a obtenção de cromossomos filhos a partir da combinação dos cromossomos pais.
    - **mutação**: operador que permite a obtenção de cromossomos filhos a partir de alterações diretas no cromossomo pai.
- **Fenótipo**: denota o cromossomo decodificado.
- **Genótipo**: representa a estrutura do cromossomo codificado

- ***Schema***: é um modelo de representação para uma família de cromossomos, normalmente é representado por símbolos “*” dentro do cromossomo.

A Figura 8, abaixo, exemplifica alguns termos utilizados no AG como *schema*, gene, *fitness* e genótipo numa situação com uma rota entre seis pontos distintos. Nesta figura pode se observar um exemplo de *schema* { * 6 * 4 3 2 }, a partir do qual foi possível gerar dois diferentes cromossomos { 1 6 5 4 3 2 } e { 5 6 1 4 3 2 }. Observam-se também o gene g_3, que corresponde ao ponto 5 na solução dada, e o *fitness* relacionado a esta solução.

Figura 8 – Exemplo de alguns termos do AG



Fonte: Adaptado de Goldbarg e Luna (2005)

2.4 – Considerações finais

Neste capítulo de referencial teórico, foram abordados os conceitos mais relevantes para a formação de um embasamento teórico capaz de permitir o desenvolvimento da pesquisa e a elaboração do algoritmo que atacará o problema aqui especificado. Assim como proporcionar conhecimentos para que o leitor consiga compreender as fases seguintes deste trabalho.

Este capítulo abordou conceitos que dizem respeito à logística, e em especial à logística de transporte; aos problemas PCV e PRV e alguns de seus problemas derivados que são estudados na PO; algumas técnicas utilizadas na resolução dos problemas de roteamento, dando maior atenção ao AG, que será a técnica utilizada nesta pesquisa.

Capítulo 3 – Algoritmos Genéticos

Os AGs são parte da computação evolutiva, ou seja, buscam imitar procedimentos biológicos em seus algoritmos como forma de chegar a um resultado desejado.

Segundo Goldbarg e Luna (2005), quando foram desenvolvidos, os AGs apresentaram bastante eficiência para a obtenção do máximo ou mínimo de uma função e esta característica foi o que possibilitou uma rápida aplicabilidade e grande popularização da técnica.

Ainda segundo Goldbarg e Luna (2005) as características gerais do AG são:

- Operam em um conjunto de pontos (denominados população) e não a partir de pontos isolados;
- Operam em um espaço de soluções codificadas e não diretamente no espaço de busca;
- Como informação necessita somente o valor de uma função objetivo (denominada função de adaptabilidade ou *fitness*);

Adicionalmente, Goldbarg e Luna (2005) também citam como características básicas do funcionamento de um AG:

- Usam transições probabilísticas e não regras determinísticas;
- Os indivíduos são representados por cromossomos e competem por recursos e possibilidade de reprodução;
- Os indivíduos que tiverem mais sucesso nas competições terão maior probabilidade de reprodução do que aqueles de menor performance;
- Os genes dos indivíduos avaliados como bons se propagam através das populações, de modo que possam ser aperfeiçoados e gerem proles cada vez mais adequadas.

Com base no que foi exposto por Baker (2003) e Goldbarg e Luna (2005) é possível perceber que os AGs se diferenciam das demais meta-heurísticas, a partir de duas características principais que são as soluções representadas por cromossomos e a evolução da população de soluções a partir dos indivíduos mais aptos.

3.1 – Modo de Operação

Para que um problema como o PRV possa ser tratado utilizando-se um AG é necessário que alguns procedimentos sejam executados. Baker (2003) cita que a primeira tarefa a ser executada para a aplicação de um AG é a escolha da representação das possíveis soluções.

Bezerra (2012) afirma que estas possíveis soluções formarão a população de indivíduos e que são a base de todo o trabalho do AG.

Baker (2003) explica que após ser escolhida a representação dos indivíduos, deve ser gerada uma população inicial de soluções. Esta população inicial pode ser desenvolvida de duas maneiras distintas: aleatoriamente ou de maneira estruturada. Ainda segundo Baker (2003), a expectativa é de que populações geradas através de processos estruturados evoluam mais rapidamente, porém apresentem uma variabilidade menor do que aquelas geradas de maneiras aleatórias.

Segundo Baker (2003) e Bezerra (2012), estes indivíduos, chamados de cromossomos, serão avaliados por uma função de aptidão de modo a verificar seu desempenho perante a função objetivo.

Ainda segundo Baker (2003) e Bezerra (2012), uma vez que haja esta avaliação, as soluções-filho consideradas mais aptas, ou seja, com melhores resultados terão mais chance de permanecer na população ou de gerar novas soluções.

A partir desta seleção dos indivíduos mais aptos espera-se que a adequação da população como um todo aumente a cada geração e resultados cada vez melhores sejam obtidos.

A cada nova geração de indivíduos é aplicada a função de avaliação para medir a sua aptidão. Como o AG é um método aproximativo, espera-se que a cada geração, a função se aproxime do valor ótimo, seja um máximo ou um mínimo da função.

É necessário também que se estabeleça um critério de parada para as iterações, que pode ser a convergência para o indivíduo mais apto ou solução dominante (que representaria a solução com melhor aptidão para o problema estudado) ou a imposição de um limite de tempo ou de iterações. Ao atingir o critério

de parada, será considerado como solução do AG, o indivíduo que obtiver o melhor resultado na função de avaliação em todo o processo.

Quadro 1 – Pseudocódigo de um AG genérico

```
Início
        gera população
        avalia população
        Enquanto critério de parada não for atingido faça
                executa cruzamento
                executa mutação
                avalia novos indivíduos
                seleciona indivíduos para formar a nova população
                atualiza o critério de parada
        Fim
        apresenta a melhor solução
Fim.
```

Fonte: Bezerra (2012)

O Quadro 1 acima exemplifica o funcionamento de um AG através do seu pseudocódigo, mostrando cada fase de sua execução: A Geração da população inicial e sua avaliação, o *loop* das iterações e a sua conclusão após o critério de parada ser atingido.

3.2 – Representação do AG

A representação de um AG é a forma como as possíveis soluções serão codificadas para que sejam aplicados os operadores genéticos.

Normalmente a representação das possíveis soluções se dá por meio de um cromossomo e cada uma das posições do cromossomo é conhecida como gene. (BAKER, 2003)

Gomes (2008) afirma que a representação adotada está diretamente ligada ao tipo de problema. Geralmente, o problema pode ser representado de duas maneiras distintas: binária ou permutacional.

Segundo Baker (2003), inicialmente as representações binárias eram amplamente usadas, porém é possível utilizar representações não-binárias com sucesso.

Representação binária é aquela onde o indivíduo será representado numa base binária, ou seja, dentro do cromossomo haverá apenas caracteres 0 e 1. Este tipo de representação é muito utilizado, no entanto, quando se trabalha com variáveis contínuas, a precisão dependerá do tamanho da *string* do cromossomo e quanto maior esta *string*, maior o esforço computacional necessário.

O outro tipo de representação é conhecido como não binária ou permutacional. Nesta representação os alelos assumirão valores inteiros e positivos, e o cromossomo representará uma solução baseada na ordem dos alelos. Gomes (2008) explica que este tipo de representação é utilizada especialmente em problemas do tipo PCV, PRV, Problema de Sequenciamento, entre outros.

3.3 – Estratégia geracional

A estratégia geracional é o modo como as populações, ou grupos de soluções, serão tratados durante o processo do AG. A estratégia geracional decide quais e quantos indivíduos serão eliminados ou acrescentados à população com o passar das gerações.

Bezerra (2012) cita duas diferentes estratégias para a renovação da população: a estratégia de *steady-state* e a estratégia de elitismo. *Steady-state* é uma estratégia onde cada novo indivíduo gerado é adicionado à população ao mesmo passo que um indivíduo menos apto é eliminado, mantendo-se assim uma população constante. O elitismo é uma estratégia que favorece a manutenção de uma determinada quantidade de indivíduos mais aptos de uma geração para a seguinte.

É importante ressaltar que deve haver uma estratégia também de seleção dos indivíduos para que estes sejam avaliados e possam ser classificados para que o AG decida se tal indivíduo deve ser eliminado ou preservado. A seleção deve ser capaz de separar os indivíduos com a maior aptidão de modo que a próxima geração seja composta por uma população com maior aptidão.

Mitchell (1998) afirma que no processo de seleção há uma relação de compensação, quanto maior a pressão de seleção, mais rapidamente a população convergirá para um ótimo local. Pressão de seleção pode ser entendida como a preferencia por indivíduos de maior aptidão.

Gomes (2008) afirma que o primeiro método de seleção criado foi o método de roleta, criado por Holland (1975). Neste método, a probabilidade de seleção de cada indivíduo é diretamente proporcional a sua aptidão em relação a população. Segundo este autor, a maneira mais comum de aplicação deste método de seleção consiste em atribuir um número real a cada indivíduo igual a sua aptidão dividida pela aptidão total da população, assim cada indivíduo terá um número entre 0 e 1 representando sua probabilidade e o somatório do valor atribuído a todos os indivíduos será 1. Após cada indivíduo ter sido numerado, *n* números aleatórios serão gerados entre 0 e 1, onde *n* é o tamanho da população. Caso o indivíduo esteja dentro do intervalo de probabilidades acumuladas selecionado, este será escolhido.

Bezerra (2012) cita também outros três métodos de seleção: torneio, *ranking* e dinâmica.

A seleção por torneio funciona de forma similar a seleção por roleta, no entanto os indivíduos são escolhidos aleatoriamente e formam grupos de tamanhos fixos. Um parâmetro *k* é definido como a probabilidade de se escolher o melhor indivíduo do grupo e então para cada grupo é gerado um número aleatório entre 0 e 1. Se este número for menor que *k*, o melhor indivíduo do grupo será escolhido, caso contrário, um indivíduo será escolhido aleatoriamente.

A seleção por *ranking* trabalha de modo a evitar a convergência prematura da população, que pode ocorrer na seleção por roleta. Na seleção por *ranking* os indivíduos são ordenados de acordo com a sua aptidão, e a probabilidade da escolha de certo indivíduo está diretamente relacionada a sua posição nesta ordem, e não ao valor absoluto de sua aptidão. Este método é capaz de manter alta pressão de seleção em casos onde a variabilidade é baixa. Ainda segundo Bezerra (2012), a seleção dinâmica usa o mesmo processo de classificação como base, no entanto, este tipo de processo é capaz de fornecer diferentes pressões de seleção em diferentes fases do processo.

3.4 – Operadores genéticos

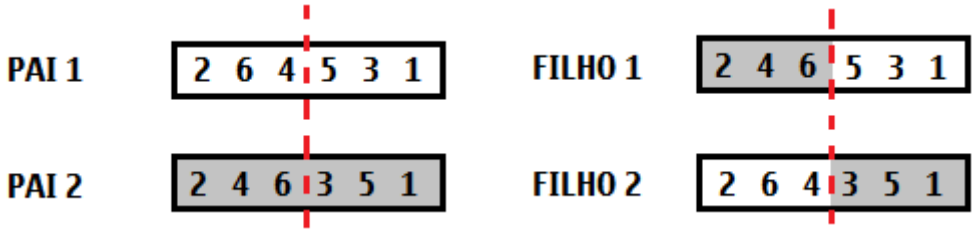
Os operadores genéticos têm a função de gerar novos indivíduos a partir de indivíduos já existentes na população. Mitchell (1998) afirma que o recurso que mais distingue um AG dos outros métodos é o operador genético *crossover*.

Operadores de *crossover* são aqueles que geram novos indivíduos a partir do cruzamento de dois indivíduos que se combinam para formar um descendente. Já operadores de mutação são aqueles que formam um indivíduo que descende de um único indivíduo pai, sem que haja cruzamento. Gomes (2008) afirma que a mutação tem a função de evitar que a população convirja prematuramente para ótimos locais. A mutação tem também a função de garantir que a probabilidade de se chegar a qualquer ponto do espaço de busca seja diferente de zero.

Mitchell (1998) afirma que o mais simples método *crossover* é o de uma posição, ou de um corte. Ele consiste em escolher aleatoriamente um ponto do cromossomo, realizar o corte e então permutar as partes de um cromossomo pai com outro cromossomo pai para que sejam gerados dois cromossomos filhos.

A Figura 9 abaixo exemplifica um operador genético de uma posição que, a partir de dois cromossomos pais, gera dois novos indivíduos.

Figura 9 – Operador genético *crossover* de uma posição



Fonte: Elaborado pelo autor

Além do operador de uma posição, Goldbarg e Luna (2005) citam outros operadores de *crossover* como:

- Operador *Partially-Mapped Crossover* (PMX)
- Operador *Order Crossover* (OX)
- Operador *Cycle Crossover* (CX)
- Operador *Edge Recombination Crossover* (ERX)

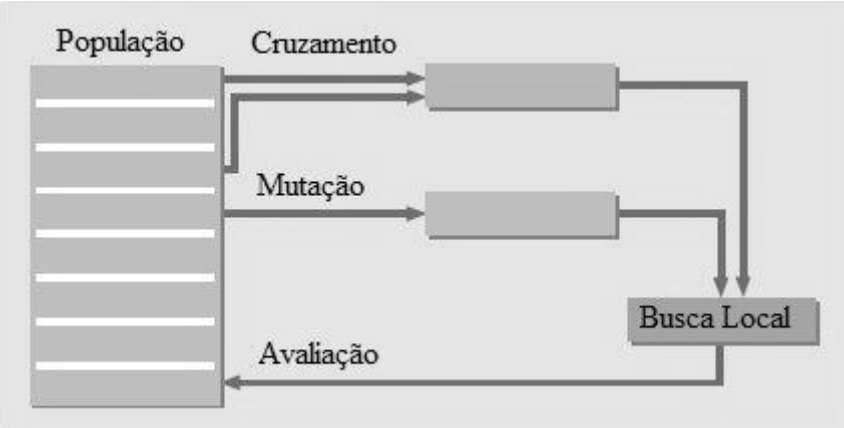
Bezerra (2012) afirma que os operadores de mutação têm um papel menor no AG, no entanto podem atuar tanto na diversificação quanto na intensificação de um algoritmo. Uma forma simples de mutação é a heurística de *swap* que foi anteriormente apresentada. Outro operador que pode ser utilizado na mutação de um indivíduo é o λ-opt, uma vez que esta heurística também necessita de apenas um cromossomo pai para obter um cromossomo filho.

Mitchell (1998) afirma que o sistema deve buscar o equilíbrio entre o uso dos bons resultados obtidos com indivíduos com alta aptidão e a busca por novas possibilidades no espaço de busca. Devido a esta dualidade e ao caráter generalista dos AGs, suas buscas são consideradas superficiais e a hibridização com outras heurísticas faz-se útil em ajudar neste aspecto.

Bezerra (2012) afirma que a hibridização aborda técnicas de otimização local para cada novo cromossomo filho. Assim o AG é usado para explorar a população, enquanto o método heurístico é usado para explorar indivíduos. Gen (2006), *apud* Bezerra (2012), afirma que por possuírem características complementares, normalmente algoritmos híbridos apresentam melhores resultados que AG ou heurísticas trabalhando individualmente.

A Figura 10, abaixo, exemplifica um caso de hibridização de um AG onde há o operador *crossover*, o operador mutação e há ainda uma busca local.

Figura 10 – Exemplo de um AG híbrido



Fonte: Gen (2006) *apud* Bezerra (2012)

Blum e Roli (2003) afirmam que métodos baseados em população, como o AG, são melhores em identificar áreas com a possibilidade de melhores resultados dentro do espaço de busca, já heurísticas de busca local apresentam melhor desempenho em analisar tais áreas. Daí surge o sucesso da hibridização dos algoritmos.

3.5 – Critério de parada e outros parâmetros

Uma vez que o AG é uma meta-heurística aproximativa, onde o ideal desejado não é a obtenção da solução ótima e sim da melhor solução viável em tempo hábil, torna-se necessário que se estabeleça um critério de parada.

Gomes (2008) afirma que ao trabalhar com AG, os critérios de parada mais utilizados são:

- Número de gerações
- Tempo de execução
- Diversidade da população

O número de gerações e o tempo de execução podem ser contados a cada iteração dentro do próprio algoritmo. Já a diversidade da população é estabelecida a partir da comparação entre a média do *fitness* de seus indivíduos. Uma vez que haja muita semelhança entre os indivíduos (por exemplo, 90% da população formada por indivíduos semelhantes), este critério de parada entra em ação.

Além do critério de parada, há outros parâmetros que devem ser definidos para a execução do AG. Mitchel (1998) afirma que estes parâmetros incluem tamanho da população, taxa de *crossover* e taxa de mutação. Afirma ainda que normalmente estes parâmetros não interagem entre si linearmente, não sendo possível otimizar os três ao mesmo tempo.

Capítulo 4 – Estudo de Caso

Este capítulo dedica-se a apresentar o estudo de caso que será desenvolvido. Serão abordados nesta seção os detalhes referentes à instituição estudada e serão apresentados o problema proposto e o modelo utilizado na sua resolução.

4.1 – Secretaria do Trabalho e Desenvolvimento Social

O presente trabalho abordará um caso da Secretaria do Trabalho e Desenvolvimento Social (STDS) do estado do Ceará. A STDS é um órgão estadual e está presente nas seis regionais da cidade de Fortaleza além das 20 regiões que compõe o estado do Ceará.

Dentre as competências da STDS estão:

- coordenar a formulação, implementação e avaliação, no Estado, de Políticas do Trabalho, em conformidade com a legislação vigente e tendo como princípio a intersetorialidade;
- ampliar as oportunidades de acesso a geração de trabalho e renda, mediante o fortalecimento do Sistema Público de Emprego, Trabalho e Renda - SPETR, do programa de desenvolvimento do artesanato e do fomento às micros e pequenas empresas;
- preservar e difundir os aspectos artísticos e culturais do artesanato cearense, como fator de agregação de valor e melhoria nas condições de vida da população artesã;
- apoiar a comercialização dos produtos artesanais e das micros e pequenas empresas;
- promover a organização de microfinanças e da economia solidária;
- monitorar o mercado de trabalho, subsidiando o governo e a sociedade na formulação de políticas sociais e econômicas;
- elevar o nível de qualificação dos trabalhadores, potencializando as suas condições de inserção no mercado de trabalho;
- implementar projetos de iniciação profissional para jovens com foco na aprendizagem e inserção no mercado de trabalho, em conformidade com a Lei Federal nº10.097/2000;

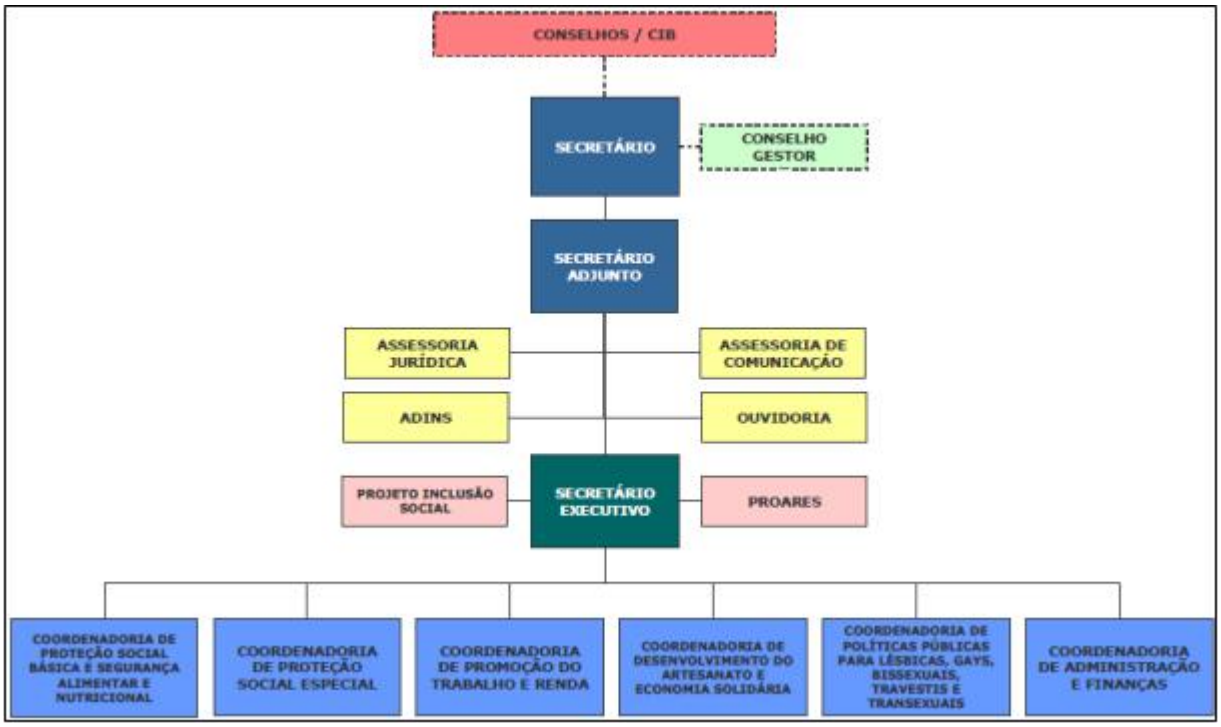
- garantir o desenvolvimento de ações de inclusão social e produtiva e de segurança alimentar de pessoas e grupos em situação de vulnerabilidade, contribuindo para diminuição dos índices de pobreza e desigualdade social no Ceará;
- articular a realização de estudos e pesquisas relacionados à geração de trabalho e renda;
- assessorar o Conselho Estadual do Trabalho;
- estimular o controle social e a participação efetiva no processo de desenvolvimento da sociedade;
- coordenar, no âmbito do Estado, a formulação, a execução, o monitoramento e a avaliação da Política de Assistência Social, observando a consonância com a legislação vigente e efetivando a construção e consolidação do Sistema Único de Assistência Social - SUAS, de modo que as ações sócio-assistenciais tenham centralidade na família, caráter intersetorial, e, nesta perspectiva, assegurem a provisão de serviços, programas, projetos e benefícios de proteção social básica e ou proteção social especial de média e alta complexidade a famílias, indivíduos e grupos vulnerabilizados pela condição de pobreza e exclusão social além de outras competências;
- coordenar e executar programas de medidas sócio-educativas voltadas ao atendimento ao adolescente em conflito com a Lei;
- coordenar e executar a nível estadual o Sistema Nacional de Atendimento Sócioeducativo - SINASE;
- viabilizar oportunidade de estágio em órgãos públicos e privados aos adolescentes alunos de escolas públicas e encaminhados por programas sociais;
- assessorar, viabilizar recursos humanos e infraestrutura necessária aos conselhos estaduais relacionados às funções de competência da Secretariado Trabalho e Desenvolvimento Social (CEAS, CEDCA, CET, CEDI), com a gestão dos fundos estaduais respectivos e efetivo controle social por meio da participação de setores organizados da sociedade;
- coordenar e garantir o funcionamento da Comissão Intergestora Bipartite, em conformidade com a Norma Operacional Básica de Assistência Social;

- coordenar a Política de Segurança Alimentar;
- coordenar as ações do Programa Fome Zero no Ceará, promovendo a intersetorialidade das ações nas 3 esferas de governo;
- viabilizar estudos e pesquisas no âmbito da Assistência Social e exercer outras atribuições necessárias ao cumprimento de suas finalidades, nos termos do Regulamento.

A STDS tem por missão "Coordenar e executar as políticas do Trabalho, Assistência Social e Segurança Alimentar, voltadas para a elevação da qualidade de vida da população, sobretudo dos grupos socialmente vulnerabilizados auxiliando direta e indiretamente o Governador nas suas Políticas de Governo".

A Figura 11, abaixo, mostra como se dá a estrutura organizacional da STDS com as secretarias e coordenadorias que compõe o órgão e integram a instituição.

Figura 11 – Estrutura organizacional da STDS



Fonte: Queiroz (2010)

A sede da STDS fica localizada na rua Soriano Albuquerque, 230, no bairro Joaquim Távora, Fortaleza – CE. Além dos trabalhos desenvolvidos na sede da STDS, ainda há outras instituições sob a sua responsabilidade, que auxiliam no

desenvolvimento das atividades citadas anteriormente, dentre as quais podemos citar:

- Oito Centros Comunitários
- Dez ABCs Comunitários
- Quatro Centros de Iniciação Profissional
- Dois Circos-Escolas
- Quatro Espaços Socio Educacionais
- Seis Centros Educacionais
- Cinco Centros de Semiliberdade
- Cinco Unidades de Abrigo em gestão direta
- Sete Unidades de Abrigo em co-gestão
- Programa Criança Fora da Rua, Dentro Da Escola
- Centro de Referência Especializado da Assistência Social
- Unidade de recepção Luís Barros Montenegro
- Centro Integrado de Atenção e Prevenção à Violência contra a Pessoa Idosa

Além da estrutura acima citada, a STDS também é responsável pela gestão da manutenção da estrutura das unidades do SINE – IDT, o qual é composto por 39 unidades de atendimento, sendo 9 na capital e 30 no interior, 23 balcões de emprego, 45 postos de atendimento conveniados com as prefeituras, além de 2 unidades móveis, totalizando uma rede de 109 pontos de atendimento em todo o estado.

A secretaria é composta por 1.410 servidores públicos, 91 comissionados, 241 terceirizados, 124 são estagiários do Projeto Primeiro Passo e 111 estagiários de ensino superior. Totalizando 1.977 funcionários trabalhando na STDS.

4.2 – Frota da STDS

A STDS utiliza um sistema de transporte de caráter eventual. O transporte de caráter eventual ocorre quando as saídas não podem ser ajustadas às de caráter sistemático, por conta de sua urgência, ou porque o destino é incompatível.

O sistema de transportes da STDS funciona por meio de solicitações de visitas. Estas solicitações devem ser realizadas até o final do expediente do dia

anterior, somente sendo possível a solicitação no mesmo dia, caso seja comprovada a urgência da solicitação e esta seja aprovada pelo gerente administrativo.

Estas solicitações devem acontecer por meio de um sistema web da própria STDS e podem atender solicitações de visitas que ocorram em dias de serviço, no horário compreendido entre 06h e 17h, devendo ser recolhidos até às 18h, exceto para o desempenho de serviços excepcionais do órgão estrutural e de que seja devidamente autorizada por pessoa competente.

A frota da STDS dispõe de 9 automóveis, 5 caminhões, 1 ônibus e 7 motocicletas. Os veículos da frota da STDS devem ser conduzidos preferencialmente por servidores designados para esta função e é proibida a utilização dos veículos oficiais para:

a) Transporte a casas de diversões, supermercados, estabelecimentos comerciais e de ensino, exceto quando em objeto de serviço;
b) Em excursões ou passeios;
c) No transporte de familiares do servidor ou de pessoas estranhas ao serviço público.

Outra limitação quanto aos veículos utilizados pela STDS é a restrição em se transpor os limites estaduais. Os veículos solicitados não podem ter como destino locais fora dos limites do estado do Ceará, exceto em casos especiais e com a devida autorização.

4.3 – Solicitação de veículos

As solicitações de veículos devem ser agendadas até o final do expediente do dia anterior. Esses veículos podem ser solicitados via web intra-STDS, pelo Sistema de Frota de Veículos (SFV). As solicitações serão então processadas no SFV e os veículos serão cedidos de acordo com a disponibilidade.

A designação dos veículos para cada uma das solicitações é feita com base no relatório expedido pelo SFV, no entanto há uma considerável parcela das solicitações que não são atendidas por diversos motivos.

Um dos motivos mais frequentes para o não-atendimento de alguma solicitação é a indisponibilidade de veículos, ou seja, não haver veículos suficientes para atender as solicitações, seja pelo motivo de algum veículo está parado para a

realização de manutenção ou de todos os veículos disponíveis já terem sido alocados para outras solicitações.

O modelo proposto tentará alocar as solicitações aos veículos de maneira eficiente para que o maior número possível de solicitações seja atendido.

A Figura 12, abaixo, mostra a tela do sistema com a interface web onde é realizada a solicitação de um veículo. Nesta tela, um usuário cadastrado é capaz de fazer a solicitação sendo necessário que se preencha os seguintes campos:

- Data
- Hora de saída
- Hora de retorno
- Origem
- Destino
- Quantidade de ocupantes
- Motivo da visita

Figura 12 – Tela de Solicitação de Veículos

Fonte: Queiroz (2010)

Um relatório de todas as solicitações é gerado pelo sistema para que estas possam ser gerenciadas e atendidas. Depois, o sistema marca as solicitações atendidas e as que não foram atendidas.

A Figura 13, abaixo, mostra um trecho do relatório de solicitação de veículos. Observando esta figura é possível perceber algumas das informações fornecidas pelo solicitante bem como o marcador de status que indica se as solicitações foram ou não atendidas, e o campo de observações, normalmente utilizado para registrar o motivo de uma solicitação não ter sido atendida.

Figura 13 – Trecho do relatório de solicitação de veículos

Dt. Age	Hr Sai	Hr Retor	Situac	Origem	Destino	Motivo	Observação	Nº Ocupan
01/03/2010	07:30:00	16:30:00	Atendido	STDS	MARANGUAPE	ACOMPANHAR CAPACITAÇÃO		1
01/03/2010	08:30:00	16:00:00	Atendido	STDS	PRIMEIRO PASSO	TREINAMENTO		1
01/03/2010	13:30:00	15:00:00	N. Atend.	STDS	ABC JOSÉ WALTER	DILIGÊNCIA DE IM	MOTORISTA NOVATO	1
01/03/2010	09:15:00	10:30:00	Atendido	STDS	UNIDADE - VIVA GENTE	VISITA		1
02/03/2010	13:00:00	16:00:00	Atendido	STDS	ALMOXARIFADO	REALIZAR TOMBAMENTOS		2
02/03/2010	13:30:00	17:00:00	Atendido	STDS	CEPOD	REUNIÃO		1
02/03/2010	08:00:00	11:00:00	Atendido	STDS	UNIDADE - ABRIGO IDOSOS	VISITA		1
02/03/2010	08:30:00	12:00:00	N. Atend.	STDS	CESM E CECAL	REUNIÃO	Falta de carro	2
02/03/2010	09:00:00	13:00:00	Atendido	STDS	CECAL	REUNIÃO		2

Fonte: Elaborado pelo autor

Para os testes deste trabalho foram colhidos dados do SFV a respeito das solicitações do período de 01/03/2010 a 31/03/2010.

Dentre todas as solicitações, foram separadas aquelas que tinham como ponto de origem a sede da STDS. Em seguida, as solicitações foram separadas por dia e, para cada dia com pelo menos três solicitações de veículos foi criada uma instância do problema para ser executada no AG.

4.4 – O modelo proposto

O problema estudado consiste na designação de veículos da frota da STDS, que é limitada, para o atendimento das solicitações realizadas diariamente pelos funcionários.

Dado que há a ocorrência de soluções que não são atendidas, o modelo visa utilizar a frota disponível da maneira mais eficiente possível para que o não-atendimento de solicitações possa ser sanado.

4.4.1 – As variáveis do modelo

Para que se possa chegar ao resultado desejado foi necessário que se definissem as variáveis do modelo.

Por se tratar de um problema derivado do PRV, necessita-se primeiramente de dados sobre o ponto de origem, os pontos de destino e sobre os veículos utilizados. Adicionalmente, para que sejam atendidas as restrições deste problema em particular, é necessário que haja informações sobre a hora de saída e a hora de retorno de cada veículo.

O Quadro 2, abaixo, apresenta o exemplo dos dados de uma instância do problema, ou seja, as informações das solicitações de um dia do SFV.

Quadro 2 – Dados de uma instância do problema

Data	Saída	Retorno	Status	Origem	Destino	Motivo	Passageiros
04/03/2010	13:35	16:00	Atendido	STDS	CIB	REUNIÃO	1
04/03/2010	14:00	16:00	Atendido	STDS	TCE	REUNIÃO	1
04/03/2010	09:00	11:00	Atendido	STDS	UNIDADE - ABRIGO TIA JÚLIA	VISITA	1
04/03/2010	09:00	11:00	Atendido	STDS	SUPERM. PINHEIRO	COLETA DE PREÇO	1
04/03/2010	08:30	12:00	Atendido	STDS	CEPA	REUNIÃO	2
04/03/2010	13:30	17:00	N. Atend.	STDS	IDT	REUNIÃO	1

Fonte: Adaptado do SFV da STDS

Observando o Quadro 2 é possível obter os dados relativos à quantidade de pontos a serem visitados, à origem e aos pontos que devem ser visitados. Neste exemplo serão visitados seis pontos. Há também a quantidade de passageiros, horário de saída e horário de retorno. A quinta solicitação, por exemplo, tem como destino o Centro Educacional Patativa do Assaré (CEPA), irá transportar dois passageiros, deverá sair da sede da STDS às 08h30min e retornar às 12h.

Ainda do Quadro 2 podemos obter mais duas informações, o motivo da solicitação, que não é relevante para o modelo proposto, e o status que diz se a solicitação foi ou não atendida, como é o caso da sexta solicitação. Este status será utilizado durante a análise de resultados com a finalidade de comparar o modelo criado com a situação atual.

4.4.2 – Descrição do modelo

O modelo proposto busca alocar as solicitações aos veículos disponíveis da forma mais eficiente possível, ou seja, seu objetivo é que todas as solicitações sejam atendidas e que o custo total da rota seja o menor possível.

Para executar o modelo é preciso fornecer informações sobre as solicitações bem como sobre a frota. A partir do Quadro 2, por exemplo, são obtidas informações sobre os destinos, horários de coleta e entrega e quantidade de passageiros. As informações sobre a frota foram disponibilizadas pela STDS.

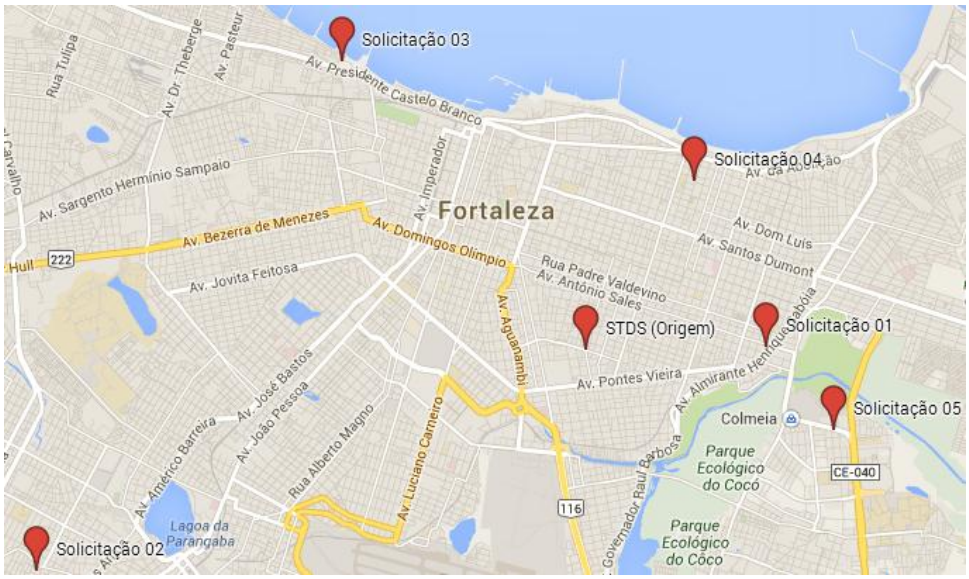
Cada instância selecionadas a partir das solicitações do relatório extraído do SFV foi elaborada seguindo dois critérios:

- Solicitações que tivessem como origem a sede da STDS;
- Dias com pelo menos três solicitações

Uma vez que a instância tenha sido elaborada o modelo pode buscar a melhor forma de alocar as solicitações aos veículos disponíveis. Uma rota será definida para cada um dos veículos necessários, deixando ociosos os veículos restantes.

A Figura 14, abaixo, mostra o exemplo da instância criada a partir das solicitações do dia 09/03/2010. O mapa ilustra as cinco solicitações de visitas que foram reportadas pelo SFV.

Figura 14 – Exemplo de solicitações do dia 09/03/2010



Fonte: Elaborado pelo autor

Após a entrada de todas as informações necessárias, o modelo iniciará o processamento.

Sua primeira tarefa é a criação de dois vetores ordenados, onde o primeiro vetor colocará em ordem crescente todas as solicitações por horário de coleta, ou seja, da coleta que deverá acontecer mais cedo até a coleta que deverá acontecer mais tarde.

O segundo vetor ordenado colocará em ordem crescente as solicitações por horário de entregas.

Desse modo cada solicitação irá gerar duas viagens dentro do modelo, uma viagem de ida (coleta) e uma viagem de retorno (entrega).

De modo a não confundir quais viagens são de coleta e quais são de entrega, as mesmas são numeradas de maneira tal que, numa instância com n solicitações, as viagens de 1 a n são viagens de coleta e as viagens de $n+1$ a $2n$ são viagens de entrega. O ponto zero é reservado exclusivamente para a origem das rotas, ou seja, a sede da STDS. Todas as rotas geradas sempre terão inicio e término na sede da STDS.

O Quadro 3 apresenta as solicitações do dia 09/03/2004. Utilizando as informações deste quadro como exemplo, o vetor de coletas teria a ordem “segunda solicitação; primeira solicitação; terceira solicitação; quarta solicitação; quinta solicitação”. Similarmente, o vetor de entregas teria a ordem “segunda solicitação; primeira solicitação; terceira solicitação; quarta solicitação; quinta solicitação”.

Quadro 3 – Dados da Instância do dia 09/03/2010

Data	Saída	Retorno	Status	Origem	Destino	Motivo	Passageiros
09/03/2010	08:30:00	12:00:00	Atendido	STDS	NORMATEL	COLETA DE PREÇO	1
09/03/2010	08:00:00	11:00:00	Atendido	STDS	UNIDADE - ALBERGUE	REUNIÃO	2
09/03/2010	13:00:00	15:00:00	Atendido	STDS	CC PIRAMBU	Visita técnica	1
09/03/2010	13:00:00	16:00:00	Atendido	STDS	PRIMEIRO PASSO	MANUTENÇÃO	1
09/03/2010	15:30:00	17:00:00	Atendido	STDS	Gab do Governador / Palácio Iracema	REUNIÃO	1

Fonte: Adaptado do SFV da STDS

As equações (16) e (17) mostram como são representados os vetores de coleta e entrega para a instância do dia 09/03/2010, respectivamente, após a

aplicação da notação anteriormente apresentada, com coletas estando no intervalo de *1* a *n* e entregas no intervalo de *n+1* a *2n*.

$$vetor_coleta = [02, 01, 03, 04, 05] \tag{16}$$

$$vetor_entrega = [07, 06, 08, 09, 10] \tag{17}$$

Uma vez que os vetores ordenados estão prontos, o passo seguinte para a resolução do problema é a alocação de cada viagem, de coleta e de entrega aos veículos disponíveis.

As viagens serão alocadas respeitando a ordem dos vetores criados de modo que o vetor de coletas é usado depois de feita toda a alocação do vetor de entregas nos carros.

Para forçar o modelo a alocar todas as viagens enquanto busca pelo menor custo da solução, cada coleta ou entrega que não seja alocada gera uma penalidade de 100.000km para a solução final. Esta penalidade faz com que o modelo evite soluções que não contemplem todas as viagens.

$$veiculo_6 = \{01,\ 06,\ 03,\ 05,\ 0,\ 09,\ 0,\ 10\} \tag{18}$$

$$veiculo_7 = \{02,\ 07,\ 04,\ 0,\ 08\} \tag{19}$$

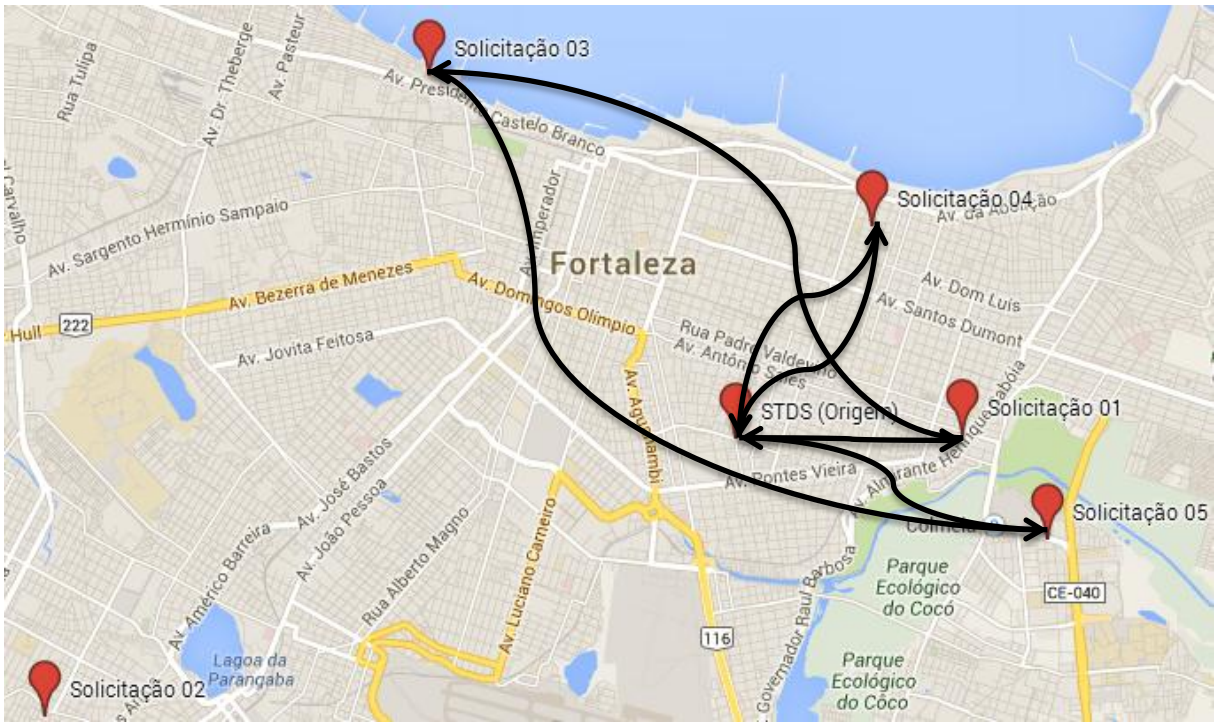
As Equações (18) e (19) mostram a alocação de todas as viagens da instância criada para as solicitações do dia 09/03/2010. Este resultado mostra que apenas os veículos 06 e 07 foram utilizados, permitindo que os demais veículos da frota sejam poupados.

A Figura 15, abaixo, mostra as rotas sugeridas pelo modelo para o veículo 6. Observando a sequência do vetor veículo_6={01, 06, 03, 05, 0, 09, 0, 10}, lembrando que a instância do dia 09/03/2010 é composta por cinco solicitações e com a ajuda da Figura 15 pode-se concluir que o veículo 6 fez os seguintes passos:

- Levou o passageiro ao destino 01;
- Esperou e buscou o passageiro do destino 01 (trecho identificado como 06);
- Levou o passageiro ao destino 03;
- Levou o passageiro ao destino 05;

- Retornou à sede da STDS;
- Buscou o passageiro do destino 04 (trecho identificado como 09);
- Retornou à sede da STDS;
- Buscou o passageiro do destino 05 (trecho identificado como 10).

Figura 15 – Rotas do veículo 6 para instância de 09/03/2010

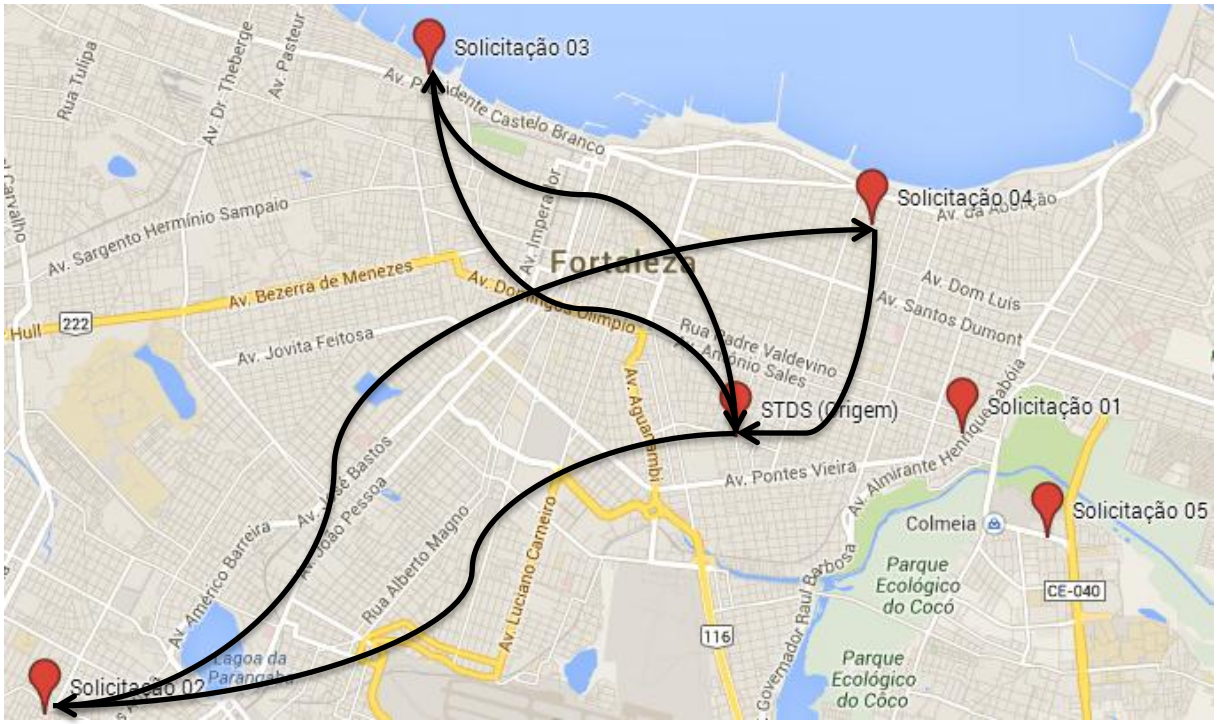


Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 16, abaixo, mostra as rotas sugeridas pelo modelo para o veículo 7 para a mesma instância. Observando a sequência do vetor veículo_7={02, 07, 04, 0, 08} juntamente com a Figura 16 percebe-se que os seguintes movimentos foram realizados pelo veículo 7:

- Levou o passageiro ao destino 02;
- Esperou e buscou o passageiro do destino 02 (trecho identificado como 07);
- Levou o passageiro ao destino 04;
- Retornou a sede da STDS;
- Buscou o passageiro do destino 03 (trecho identificado como 08);

Figura 16 – Rotas do veículo 7 para instância de 09/03/2010



Fonte: Elaborada pelo autor

No exemplo apresentado foram necessários somente dois veículos para atender a todas as cinco solicitações.

Como cada solicitação gera duas viagens distintas para o modelo, o passageiro não fará necessariamente a viagem de ida e de volta no mesmo veículo. Percebe-se esta situação no caso do destino 03, onde a ida (trecho 03) foi realizada no veículo 6 e a volta (trecho 08) foi realizada no veículo 7.

Além das informações provenientes do SFV, o modelo também necessita de parâmetros que tornem a solução obtida uma solução viável para a aplicação real.

Um desses parâmetros que foi considerado durante a elaboração do modelo é o tempo de permanência de um passageiro dentro do veículo. Foi definido que um passageiro não pode permanecer por mais de três horas dentro do veículo.

Esse parâmetro garante que um passageiro não desperdice tempo desnecessariamente dentro do veículo, por exemplo, se ausentando da sede da STDS cedo demais ou retornando muito tarde à sede depois de realizada a visita.

Outra consequência deste parâmetro que limita o tempo de permanência dentro do veículo é a possibilidade de inserir retornos à sede da STDS para coletar

ou entregar passageiros antes do final da rota, como, por exemplo, nas rotas mostradas nas equações (18) e (19), onde os veículos 6 e 7 passam pelo ponto zero antes do término da viagem.

Um segundo parâmetro levado em consideração foi a velocidade média da viagem. Este parâmetro foi definido levando em conta as possíveis variações do trânsito, como congestionamentos, semáforos e vias com tráfego mais intenso. A média de velocidade adotada para os veículos da frota foi de 20 km/h.

A importância deste parâmetro está em evitar que o modelo crie uma rota impraticável por assumir um veículo que percorra o trajeto muito longo em um tempo demasiadamente curto.

4.5 – Considerações

Neste capítulo foram apresentados detalhes sobre a instituição estudada, STDS. Também foram apresentados detalhes sobre o problema abordado e sobre o modelo utilizado para atacar este problema.

O modelo que será utilizado para atacar o problema foi apresentado, onde suas características foram expostas e o modo de funcionamento foi descrito através de dois exemplos práticos.

Capítulo 5 – AG para o Problema de Roteamento de Veículos

Este capítulo será dedicado a detalhar o funcionamento do algoritmo desenvolvido para atacar o problema estudado. Nas sessões seguintes será dada mais ênfase à como o AG funciona, quais as etapas do calculo e como se obtém o resultado final.

5.1 – Construção do Algoritmo

O algoritmo utilizado neste trabalho foi desenvolvido utilizando as linguagens de programação C e C++. C é uma linguagem de programação compilada de propósito geral, estruturada, imperativa, procedural, padronizada pela ISO, criada em 1972, por Dennis Ritchie. Já o C++ foi desenvolvido por Bjarne Stroustrup em 1983, inicialmente como um adicional ao C, porém com a sua evolução acabou tornando-se uma linguagem completa.

As linguagens C e C++ são amplamente utilizadas tanto no meio acadêmico como para fins comerciais, por seu grande desempenho e sua sintaxe de fácil compreensão.

A Figura 17, abaixo, mostra o exemplo de um mesmo programa escrito nas linguagens C e C++ em (a) e (b), respectivamente. As linguagens C e C++ apresentam algumas diferenças em sua sintaxe e algumas das funções utilizadas são diferentes.

Figura 17 – Exemplo de código na Linguagem C\C++

```
1  //Exemplo de código em
2  //linguagem C
3
4  #include <stdio.h>
5
6  int main()
7  {
8
9  printf("Hello World! \n");
10 return 0;
11
12 }
13
```

(a)

```
1  //Exemplo de código em
2  //linguagem C ++
3
4  #include <iostream>
5
6  using namespace std;
7
8  int main()
9  {
10
11 cout << "Hello World! \n" << endl;
12
13 return 0;
14
15 }
16
```

(b)

Fonte: Elaborado pelo autor

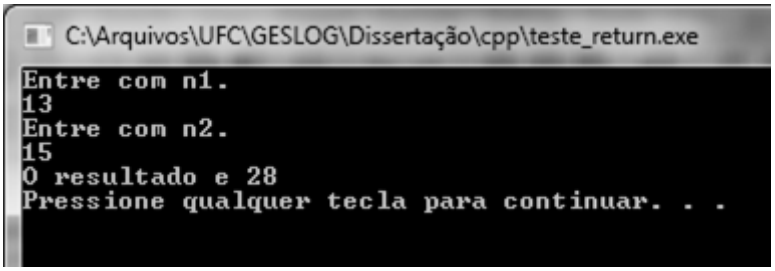
No exemplo da Figura 17 observa-se que as funções *printf()* e *cout* são utilizadas com a mesma funcionalidade de imprimir informações na tela, ou seja, são operadores diferentes usados com a mesma utilidade.

Adicionalmente, as linguagens C e C++ são compatíveis entre si, deste modo um código-fonte de um programa pode ter declarações de C e de C++ ao mesmo tempo, como é o caso do AG desenvolvido para este trabalho.

O algoritmo foi construído para ser utilizado sem a necessidade de uma interface gráfica (*Graphical User Interface* – GUI), ou seja, todos os dados de entrada e resultados são apresentados em uma tela de *prompt*, ou linhas de comando.

A Figura 18, abaixo, mostra o exemplo de um programa escrito em C++ sendo executado em uma tela de *prompt* de comando. O programa pede ao usuário para entrar com dois números, *n1* e *n2* e retorna o resultado da soma destes números.

Figura 18 – Prompt de Comando



Fonte: Elaborado pelo autor

O algoritmo tem a função de calcular a rota ótima para um PRV com restrições de capacidade e quantidade de veículos na frota e de janelas de tempo com a particularidade de horários distintos para coletas e entregas. Esta particularidade do problema estudado faz com que ele se diferencie do PRVFHJT tradicional, onde normalmente as coletas e entregas acontecem simultaneamente.

O AG é composto por cinco etapas básicas que devem ser executadas até que seja obtido o resultados final. O resultado é composto por três informações: o custo total da solução, a rota a ser percorrida por cada veículo utilizado e o tempo de processamento desta solução.

A primeira das cinco etapas é a entrada de dados. É nesta etapa que o AG é alimentado com as informações referentes à instância que está sendo trabalhada para que os cálculos possam ser realizados.

A seguir, na segunda etapa, é iniciado o AG. Esta é a etapa onde é gerada a população inicial de soluções. Esta população então é iniciada e seu desempenho é avaliado.

As terceira e quarta etapas são a execução dos operadores de cruzamento e de mutação respectivamente. Estas etapas são executadas em *loop* até que o ponto de parada seja atingido.

A quinta e ultima etapa é a apresentação do resultado, onde o AG imprime na tela do *prompt* o melhor resultado obtido pela população inicial, o melhor resultado obtido pelo operador de cruzamento e o melhor resultado obtido pelo operador de mutação. O AG imprime também nesta etapa o custo da solução, que é o menor dentre os três apresentados anteriormente, o tempo total de processamento e a rota de cada veículo utilizado.

A Figura 19 apresenta o exemplo de um resultado exibido pelo AG na tela de *prompt*. O exemplo acima mostra o resultado calculado para uma instância com sete solicitações.

Figura 19 – Apresentação do resultado do AG

```
Melhor desempenho da Populacao Inicial : 85.458886
Melhor desempenho do Operador Crossover: 85.458886
Melhor desempenho do Operador Mutacao  : 3400000.000000


  AG gastou 1.80 seg. e foi:   85.458886
Rota dos veýculos usados com partida e chegada na empresa:
Veýculo 2:  4 11 2 0 9
Veýculo 4:  7 14
Veýculo 5:  1 6 13
Veýculo 6:  5 12 3 10
Veýculo 7:  8
```

Fonte: Elaborado pelo autor

O tempo de processamento é calculado utilizando uma função externa à função do AG. Esta função de tempo é iniciada logo antes do AG começar a processar as informações e para de contar o tempo logo após o resultado final do AG ser obtido.

5.2 – Entrada de dados e Instâncias do problema

A geração das rotas é baseada num sistema de solicitação de veículos dos usuários. Cada solicitação deve conter as seguintes informações:

- Destino;
- Horário de saída;
- Horário de retorno;
- Quantidade de passageiros;

Adicionalmente a estas informações o algoritmo também necessita de informações a respeito da frota disponível para atender as solicitações dos usuários, ou seja, quantidade de veículos disponíveis e capacidade de cada um destes veículos.

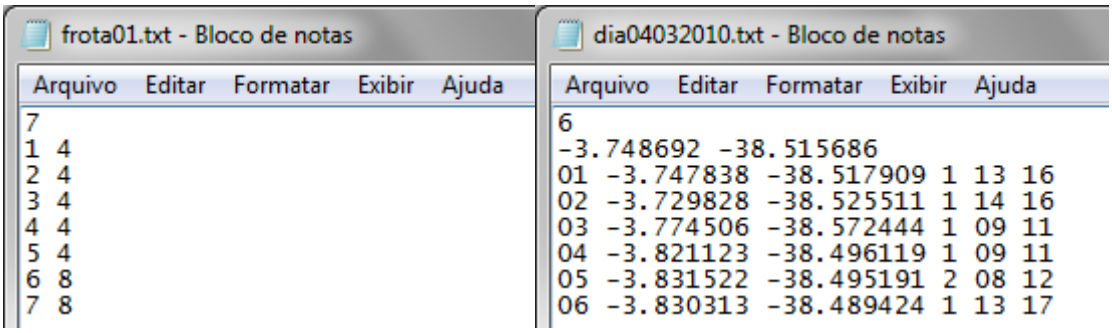
A primeira etapa para realizar o roteamento dos veículos através do AG é a entrada dos dados relativos às solicitações.

Para que haja a entrada de dados no algoritmo cada instância deve ter os dados relativos a destino, horários, quantidade de passageiros, quantidade de

veículos e capacidade dos veículos deve ser organizada em dois arquivos distintos, um contendo informações sobre as solicitações de visitas e outro contendo informações sobre a frota.

A Figura 20, abaixo, exemplifica o arquivo de solicitação de visitas de uma das instâncias testadas neste problema.

Figura 20 – Instância – Solicitações de visitas



(a) (b)

Fonte: Elaborada pelo autor

O primeiro arquivo, representado na Figura 20 (a) é o arquivo que contém as informações sobre a frota de veículos. Este arquivo de texto deve conter em sua primeira linha a quantidade de veículos disponíveis para a utilização e nas linhas seguintes a numeração de cada veículo (utilizada para identificá-lo) e a capacidade de cada um dos veículos. Neste exemplo há sete veículos disponíveis na frota e cada um dos veículos apresenta sua própria capacidade.

A Figura 20 (b) apresenta as informações sobre as solicitações realizadas pelos funcionários. A primeira linha contém a informação de quantas solicitações estão contidas no arquivo. A seguir, na segunda linha, há a informação da latitude (coordenada X) e longitude (coordenada Y) do ponto de origem das rotas. As demais linhas do arquivo contêm informações sobre a solicitação da visita, sendo elas número da solicitação (que servirá para identificar cada solicitação), latitude e longitude do destino, quantidade de ocupantes e horário de saída e retorno.

A Figura 21 mostra como são organizados os dados depois que eles são inseridos no AG para o seu posterior processamento. Na tela de *prompt* são exibidas as informações sobre o ponto de origem, sobre os pontos de destino, com suas

coordenadas, quantidade de passageiros e horários, e são exibidas também as informações sobre a quantidade de veículos e a capacidade de cada um deles.

Figura 21 – Entrada de dados no AG

```
Dados dos 6 pontos e coordenadas do ponto 0 (Empresa): -3.75 -38.52
 1 : -3.75, -38.52  1  13  16
 2 : -3.73, -38.53  1  14  16
 3 : -3.77, -38.57  1   9  11
 4 : -3.82, -38.50  1   9  11
 5 : -3.83, -38.50  2   8  12
 6 : -3.83, -38.49  1  13  17

Problema com 7 veiculos: 1 (4), 2 (4), 3 (4), 4 (4), 5 (4), 6 (8), 7 (8).
```

Fonte: Elaborado pelo autor

5.3 – Geração da População Inicial

A segunda etapa do processamento do AG é gerar a população inicial de indivíduos (um conjunto de soluções do problema).

A criação da população inicial se da pela criação de dez indivíduos (permutações de *m* representando as soluções do problema) dada pela ordem decrescente da capacidade de cada tipo de veículo, onde *m* é a quantidade de veículos existentes na frota.

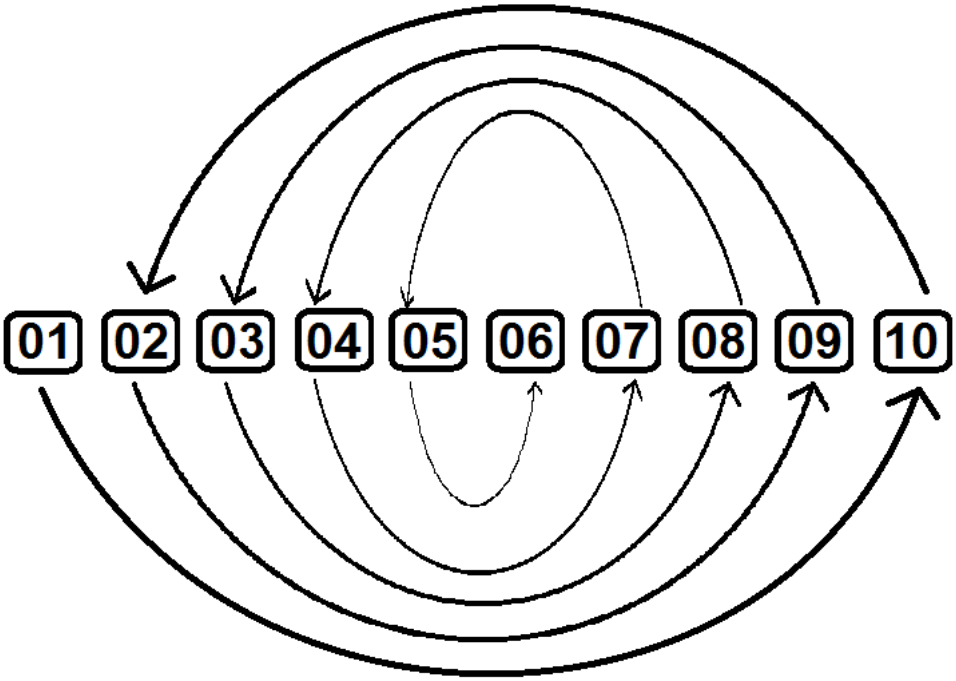
Cada uma das dez permutações obedece a uma regra de criação diferente. A seguir são apresentadas as dez regras de criação das permutações:

- 1ª permutação – Ordem decrescente da capacidade dos veículos;
- 2ª permutação – Ordem inversa da ordenação inicial, ou seja, ordem crescente de capacidade;
- 3ª permutação – Ordem alternada simétrica, 1 a 1, começando pelo de maior capacidade da primeira permutação;
- 4ª permutação – Ordem alternada simétrica, 1 a 1, começando pelo de menor capacidade da primeira permutação;
- 5ª permutação – Ordem alternada simétrica, 1 a 1, começando pelo elemento central da primeira permutação, com o segundo elemento sendo aquele a direita do elemento central;
- 6ª permutação – Ordem alternada simétrica, 1 a 1, começando pelo elemento central da primeira permutação, com o segundo elemento sendo aquele a esquerda do elemento central;

- 7ª permutação – Ordem alternada simétrica, 1 a 1, dos elementos da sexta permutação, começando pelo primeiro elemento;
- 8ª permutação – Ordem alternada simétrica, 1 a 1, dos elementos da sexta permutação, começando pelo ultimo elemento;
- 9ª permutação – Ordem alternada simétrica, 1 a 1, dos elementos da sexta permutação, começando pelo elemento central, com o segundo elemento sendo aquele a direita do elemento central;
- 10ª permutação – Ordem alternada simétrica, 1 a 1, dos elementos da sexta permutação, começando pelo elemento central, com o segundo elemento sendo aquele a esquerda do elemento central;

A Figura 22 mostra o exemplo de um movimento para a obtenção de uma ordem alternada, 1 a 1, a partir de uma sequência numérica crescente.

Figura 22 – Movimento com ordem alternada simétrica



Fonte: Elaborado pelo autor

Ao aplicar este movimento à sequência apresentada na Figura 22, [01, 02, 03, 04, 05, 06, 07, 08, 09, 10], obtém-se a sequência [01, 10, 02, 09, 03, 08, 04, 07, 05,

06]. Esta ilustração exemplifica como seria uma permutação obtida a partir da regra da terceira permutação.

5.4 – Operadores de cruzamento e de mutação

Uma das principais características dos AG é a sua capacidade de combinar boas soluções na busca de soluções ainda melhores. Esta característica é o que dá nome ao algoritmo e é alcançada através de operadores especiais.

Estes operadores especiais são os operadores de cruzamento e mutação. Eles são responsáveis por gerar novas soluções através da combinação de soluções distintas ou ainda através de permutações dentro de uma única solução.

5.4.1 – Operadores de cruzamento

Os cruzamentos são utilizados para que as soluções existentes possam gerar novas soluções que herdarão algumas de suas características. Neste algoritmo foram utilizados três métodos de cruzamento. Os cruzamentos utilizados foram cruzamento com um ponto de corte (1P), cruzamento com dois pontos de corte (2P) e cruzamento *partially mapped* (PM). Estes três métodos de cruzamento foram usados separadamente para que seu desempenho pudesse ser comparado e aplicados em cada uma das instâncias elaboradas. Os três tipos de cruzamento utilizados no AG serão descritos a seguir.

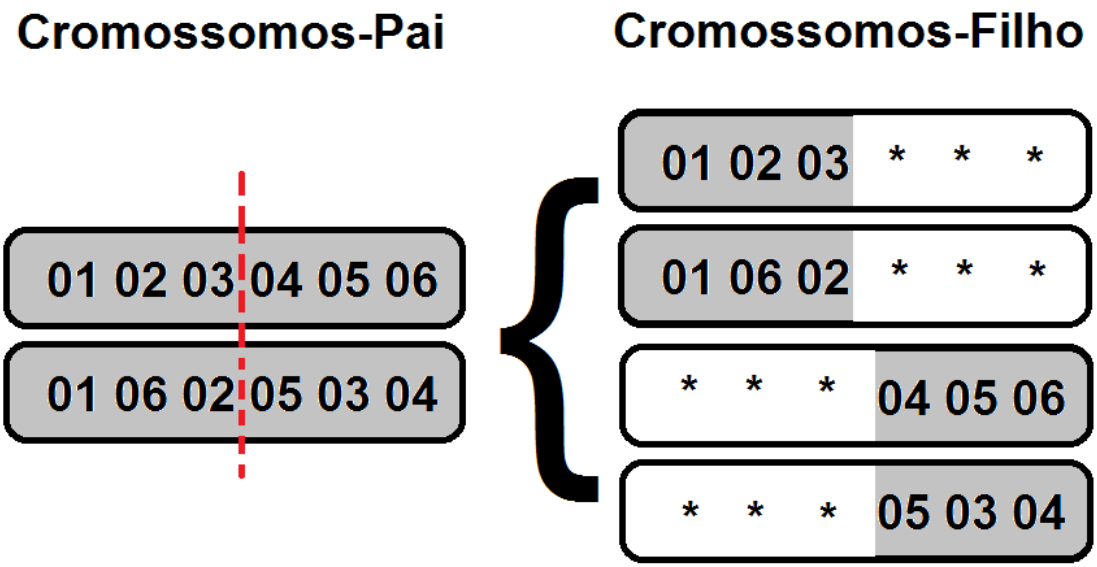
5.4.1.1 – Cruzamento com um ponto de corte

O cruzamento 1P trata-se de um tipo de cruzamento onde cada um dos dois cromossomos originais serão divididos em um ponto único ponto resultando em duas partes cada. Cada uma dessas partes irá gerar um cromossomo-filho da seguinte maneira:

- A primeira parte de um cromossomo Pai vai para um cromossomo Filho;
- O restante de cada cromossomo Filho é preenchido com os genes que faltam, dada a ordem em que eles se encontram no outro cromossomo Pai;
- Este processo se repete com a outra parte do cromossomo Pai.

A Figura 23 exemplifica o procedimento de geração de cromossomos do operador de cruzamento 1P. Os genes representados por asteriscos são aqueles que serão preenchidos por elementos que estejam faltando no cromossomo para que este forme uma solução viável.

Figura 23 – Operador de Cruzamento 1P



Fonte: Elaborado pelo autor

5.4.1.2 – Cruzamento com dois pontos de corte

O cruzamento 2P é bastante similar ao cruzamento com um ponto de corte, porém neste tipo o cromossomo é dividido em duas partes, ou seja, cada um dos dois cromossomos-pai irá resultar em três partes que serão utilizadas para gerar os cromossomos filhos. A geração dos filhos se dará da seguinte maneira:

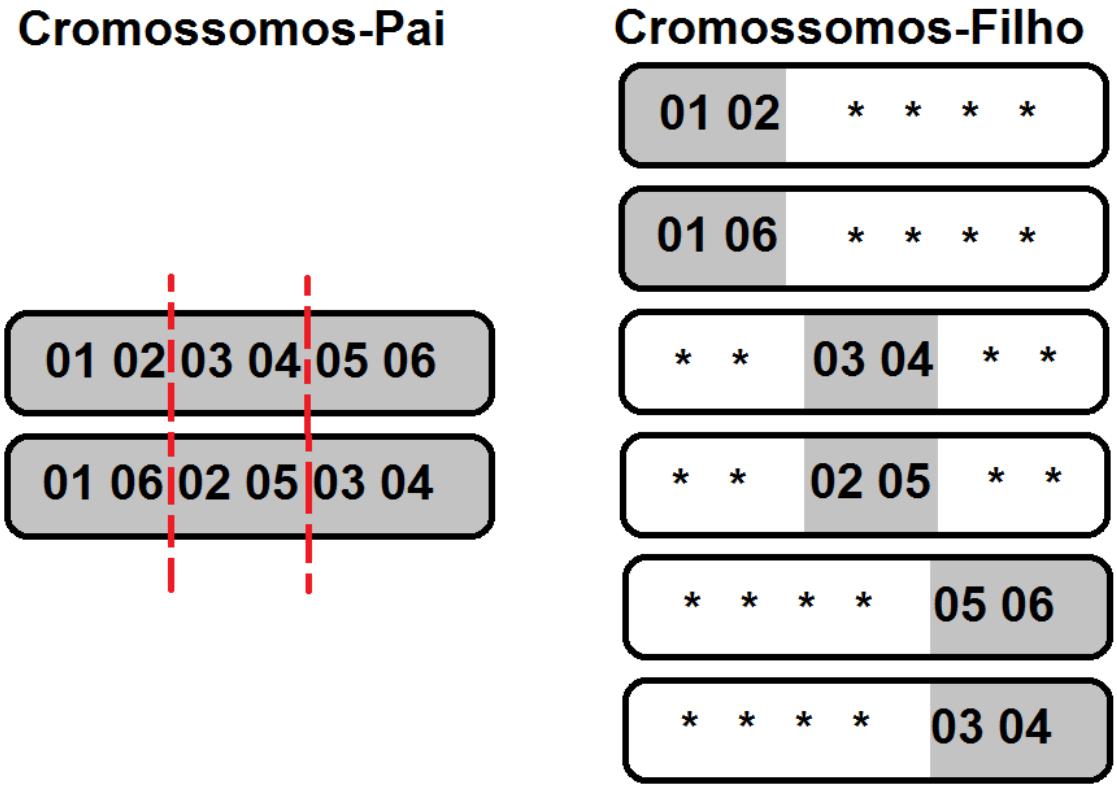
- Coloca a primeira parte de cada cromossomo em cada um dos filhos
- Preenche o restante do cromossomo de cada filho
- Coloca a segunda parte de cada cromossomo em cada um dos filhos
- Preenche o restante do cromossomo de cada filho
- Coloca a terceira parte de cada cromossomo em cada um dos filhos
- Preenche o restante do cromossomo de cada filho
- Coloca a primeira e segunda partes de cada cromossomo em cada um dos filhos

- Coloca a primeira e terceira partes de cada cromossomo em cada um dos filhos
- Preenche o restante do cromossomo de cada filho
- Coloca a segunda e terceira partes de cada cromossomo em cada um dos filhos
- Preenche o restante do cromossomo de cada filho

Podemos observar que ao final do cruzamento com dois pontos de corte entre dois cromossomos-pai serão gerados seis cromossomos-filhos.

A Figura 24 mostra como atua o operador de cruzamento 2P. Por apresentar dois pontos de corte em cada cromossomo, seis novos cromossomos serão gerados.

Figura 24 – Operador de Cruzamento 2P



Fonte: Elaborado pelo autor

5.4.1.3 – Cruzamento *Partially Mapped*

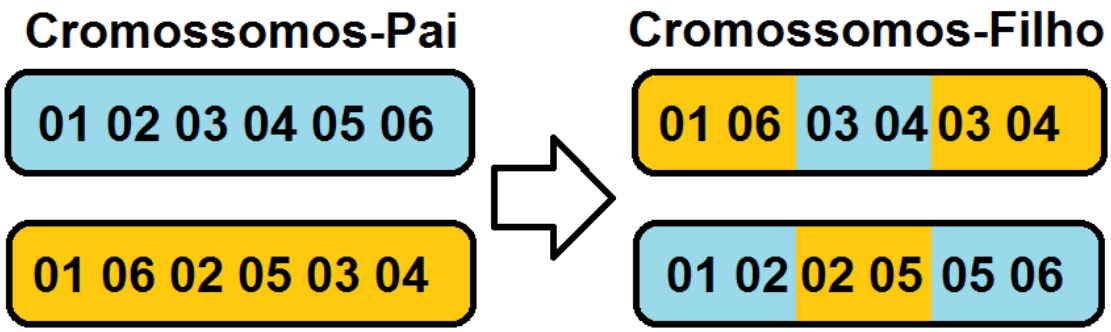
Por fim, o cruzamento PM trata-se também de um método de cruzamento que utiliza dois pontos de corte. Porém neste método os dois pontos de corte são escolhidos aleatoriamente. Os cromossomos-filhos são gerados através da junção da primeira e terceira partes de um cromossomo-pai e da segunda parte de outro. Após essa junção alguns ajustes são realizados para que a solução seja viável.

O operador de cruzamento PM segue os seguintes passos:

- Os dois cromossomos-pai são divididos em dois pontos;
- A segunda parte (parte do meio) de cada cromossomo-pai forma um cromossomo-filho;
- A primeira e terceira partes do cromossomo-pai 1 são colocados no cromossomo filho 2;
- A primeira e terceira partes do cromossomo-pai 2 são colocados no cromossomo-filho 1;
- São realizados os ajustes necessários para que os cromossomos resultantes possam ser soluções viáveis.

A Figura 25 ilustra o processo de corte e recombinação do operador de cruzamento PM. Percebe-se que o cromossomo formado imediatamente após a recombinação não forneça uma solução viável. Por isso existe uma etapa onde são realizados ajustes para formar uma solução viável, ou seja, sem genes repetidos.

Figura 25 – Operador de Cruzamento PM



Fonte: Elaborado pelo autor

5.4.2 – Operador de mutação

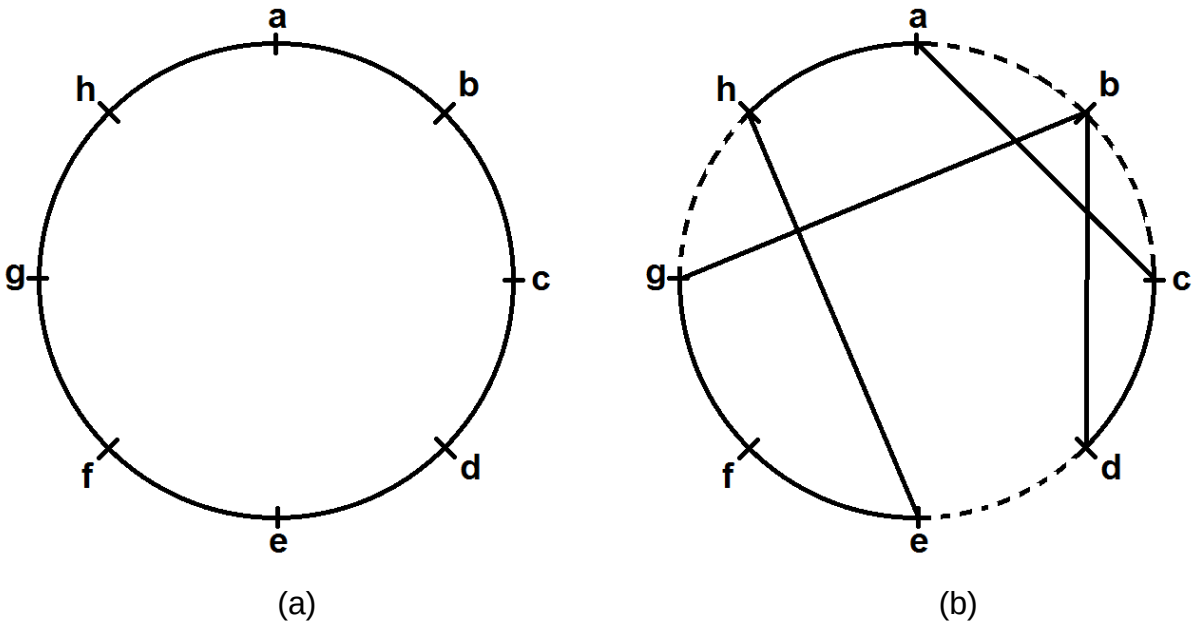
Além dos operadores de cruzamento, foi utilizado um operador de mutação chamado 4-opt, ou seja, é uma variação do λ-opt para λ = 4, o que significa dizer que quatro posições da rota serão permutadas a cada iteração do algoritmo.

Este operador atua sobre uma única solução por vez. Sua função é realizar permutações nos genes de cada cromossomo e, adicionalmente, irá verificar o custo de cada nova solução.

A cada vez que o 4-opt é executado 4! diferentes permutações são geradas e analisadas, sempre buscando aquela que apresentará o menor custo para a função. Uma preocupação do operador de mutação é que a permutação gerada seja uma solução viável.

O movimento 4-opt gera a permutação em quatro arestas diferentes. A Figura 26 apresenta o exemplo de um possível movimento realizado pelo 4-opt, onde a rota [a, b, c, d, e, f, g, h] da Figura 26 (a) torna-se [a, c, d, b, g, f, e, h] na Figura 26 (b).

Figura 26 – Operador de mutação 4-opt



Fonte: Elaborado pelo autor

Durante a execução do AG o 4-opt irá gerar e testar 4! diferentes permutações geradas através deste tipo de movimento.

5.5 – Custo da Solução

A função objetivo deste algoritmo visa reduzir a distância total percorrida por todos os veículos, ou seja, o objetivo é alcançar o mínimo da função.

Para conseguir alcançar este objetivo é necessário que haja uma função capaz de calcular qual o desempenho dos cromossomos gerados e decidir qual a solução mais apta dentre as que foram testadas.

Para chegar ao custo gerado em uma solução o AG faz uso de uma função de custo que, em seu interior, utiliza outras duas funções que o auxiliam a chegar a um valor final.

A primeira destas funções calcula a distância entre dois pontos A e B dados. Esta distância é calculada utilizando as informações de latitude e longitude da origem e de cada um dos destinos.

A segunda destas funções é chamada de função tempo. Ela faz uso do resultado retornado pela função distância entre A e B e do valor da velocidade média do veículo. Com estas duas informações o AG é capaz de calcular o tempo médio de viagem entre dois pontos.

Por fim, com estes dois resultados, o AG é capaz de calcular o custo de cada solução para decidir qual a solução mais adequada.

Estas três funções serão abordadas em mais detalhes a seguir.

5.5.1 – Cálculo das distâncias e tempo médio de viagem

A partir das informações contidas no arquivo de solicitações de visitas de cada instância o algoritmo consegue obter as latitudes e longitudes da origem e de cada um dos pontos de destino. A distância dentre eles é calculada através das seguintes equações

$$p_1=\cos((90^o-x_1).(\pi/180^o)) \quad (20)$$

$$p_2=\cos((90-x_2).(\pi/180^o))) \quad (21)$$

$$p_3=\mathrm{sen}((90-x_1).(\pi/180^o)) \quad (22)$$

$$p_4=\mathrm{sen}((90-x_2).(\pi/180^o)) \quad (23)$$

$$p_5=\cos((y_1-y_2).(\pi/180^o))) \quad (24)$$

$$\mathrm{Dist_AB}=\mathrm{acos}(p_1.p_2+p_3.p_4.p_5).6371 \quad (25)$$

As equações (20), (21), (22), (23) e (24) são partes da equação (25) e foram construídas de modo a simplificar a apresentação e o entendimento da última.

Na no calculo das distâncias os valores de x_1 e y_1 representam respectivamente a latitude e a longitude da origem e os valores de x_2 e y_2 representam respectivamente a latitude e longitude do ponto de destino. O valor 6371 ao final da equação (25) é o raio da Terra em quilômetros.

Ao aplicar os valores de latitude e longitude presentes nos arquivos das instâncias à equação (25) é obtida a distância entre os pontos desejados. O AG utiliza esta função para calcular a distância entre todos os pontos, da origem aos destinos e dos destinos entre si.

Após o cálculo das distâncias o AG pode prosseguir e calcular quais seriam os tempos médios de viagem entre quaisquer dois pontos. Para realizar este calculo, além da distância, é necessário que se tenha a velocidade média dos veículos. Esta informação é um parâmetro fixo que foi estipulado em 20 km/h. Este valor é calculado levando em conta a média do trânsito nos trajetos percorridos.

Uma vez que as distâncias e o tempo médio de viagem tenham sido calculados o AG pode proceder ao cálculo do custo da solução.

5.5.2 – Alocação de veículos e custo da solução

Para que o custo total da solução possa ser calculado é necessário primeiro alocar as viagens das solicitações aos veículos disponíveis na frota. Apenas após a alocação ter sido bem sucedida uma solução será considerada viável para o problema.

Para alocar os veículos o AG utiliza a ordem determinada pelas permutações geradas nos passos anteriores (população inicial, operadores de cruzamento e de mutação).

Primeiramente, o AG aloca cada entrega à primeira rota do primeiro veículo disponível, verificando durante este processo, se a capacidade do veículo comporta a quantidade de passageiros existentes, se a alocação realizada obedece à regra do tempo máximo de permanência dentro do veículo e se a janela de tempo da solicitação é viável para aquele veículo, fazendo uso dos valores calculados nas

funções de distância e tempo médio de viagem. Isto acontece sempre observando a ordem dos veículos na permutação de *m* que está sendo usada.

A seguir o AG verifica, ainda se tratando de entregas, se é possível um veículo realizar uma nova rota com as visitas que ainda não foram atendidas.

Quando não for mais possível adicionar nenhuma entrega aos veículos dispostos na permutação, o AG passa a atuar nas coletas da seguinte forma.

Esta etapa segue os mesmos passos da alocação de entregas, utilizando a mesma ordem dos veículos, dada na permutação.

Uma vez que todas as coletas e entregas de todas as solicitações sejam alocadas, o AG avança à fase de calcular o custo daquela solução.

O AG busca sempre oferecer a solução com menor custo total atendendo todas as solicitações, por isso é adicionada uma penalidade a cada viagem, coleta ou entrega, que não seja atendida. Esta penalidade tem a função de desestimular o AG a fornecer uma solução que não contemple todos os pontos. A penalidade foi estipulada em 100.000 km, logo é possível assumir que uma solução com valor total inferior a 100.00km atendeu a todas as solicitações.

5.6 – Considerações finais

Este capítulo apresentou as etapas da execução do AG elaborado durante este estudo. Foram apresentadas as etapas do cálculo do roteamento e suas características mais importantes, mostrando o funcionamento interno do AG proposto.

As etapas apresentadas anteriormente representam uma iteração do algoritmo, ou seja, a cada vez que há uma iteração, todas estas etapas são executadas, e a cada execução o AG procura se aproximar da melhor solução possível para o problema. Quando uma iteração não gerar um resultado com custo menor que o anterior, o AG atingirá o seu ponto de parada.

Capítulo 6 – Testes computacionais e analise dos resultados

Neste capítulo serão apresentados os experimentos computacionais realizados com o AG exposto no capítulo anterior. A primeira seção é dedicada à execução do AG para o cálculo da solução das diversas instâncias elaboradas. A segunda seção irá analisar e comparar os resultados obtidos entre os diversos testes realizados.

6.1 – Testes do AG

A partir do relatório de solicitações de visitas foram selecionadas as solicitações que tivessem como origem a sede da STDS. Estas solicitações foram classificadas por data e apenas dias que tinham no mínimo três solicitações.

Seguindo estes requisitos foram obtidas 132 solicitações válidas no período entre 01/03/2010 e 31/03/2010. Estas 132 solicitações foram divididas por data gerando 17 instâncias, uma para cada dia.

Os testes foram realizados num computador utilizando o Sistema Operacional Windows 7 Ultimate 64bit, na versão SP1. O computador tem um processador Intel Core i5 2430M de 2.40GHz e 6GB de memória RAM DDR3. Todos os códigos foram executados utilizando o compilador Dev C++ v. 4.9.9.2.

O Problema de Roteamento de Veículos com Frota Heterogênea, Janela de Tempo e Coleta e Entrega Separadas ainda é um problema relativamente novo e não tem instâncias-padrão para teste nas principais bibliotecas de PO. Por este motivo os testes foram realizados somente com as instâncias criadas a partir do caso estudado.

Durante os testes cada uma das 17 instâncias foi calculada utilizando separadamente os três tipos de cruzamento, Cruzamento 1P, Cruzamento 2P e Cruzamento PM.

As tabelas apresentadas durantes este capítulo irão conter as informações resumidas sobre os resultados do AG. As tabelas completas com os resultados obtidos com todos os experimentos serão apresentadas no Anexo I, ao final do trabalho.

6.1.1 – Apresentação dos resultados

Os resultados obtidos através da execução do AG com cada uma das instâncias serão expostos a seguir.

A Figura 27 apresenta a tela de *prompt* completa com todas as informações que são exibidas ao final da execução do AG. Esta tela é um exemplo da execução do AG com a instância do dia 26/03/2010 utilizando o operador de cruzamento 1P.

Figura 27 – Tela de resultado do AG

```
C:\Arquivos\UFC\GESLOG\Dissertação\cpp\Instancias\PRVCE_GPS_NEW.exe
Dados dos 11 pontos e coordenadas do ponto 0 (Empresa): -3.75 -38.52
 1 : -3.81, -38.49  1   7  12
 2 : -3.75, -38.53  1   8  16
 3 : -3.78, -38.51  2  13  17
 4 : -3.74, -38.58  1   8  11
 5 : -3.92, -38.60  3   8  17
 6 : -3.73, -38.66  1   8  12
 7 : -3.80, -38.58  1   8  12
 8 : -3.73, -38.53  4  13  16
 9 : -3.85, -38.52  2   8  12
10 : -3.76, -38.50  2   8  11
11 : -3.75, -38.58  1  15  16

Problema com 7 veiculos: 1 (4), 2 (4), 3 (4), 4 (4), 5 (4), 6 (8), 7 (8).

Vetor e ordenado em se: 1 (1 - 7), 2 (2 - 8), 3 (4 - 8), 4 (5 - 8), 5 (6 - 8), 6
 (7 - 8), 7 (9 - 8), 8 (10 - 8), 9 (3 - 13), 10 (8 - 13), 11 (11 - 15).

Vetor c ordenado em sc: 1 (4 - 11), 2 (10 - 11), 3 (1 - 12), 4 (6 - 12), 5 (7 -
12), 6 (9 - 12), 7 (2 - 16), 8 (8 - 16), 9 (11 - 16), 10 (3 - 17), 11 (5 - 17).

Iteracao= 1 - media1=200.92  media2=182.30  dif=18.61
Iteracao= 2 - media1=182.30  media2=182.30  dif=0.00
  Numero de Iteracoes=2
Melhor desempenho da Populacao Inicial : 182.303334
Melhor desempenho do Operador Crossover: 182.303334
Melhor desempenho do Operador Mutacao  : 182.303334


  AG gastou 2.71 seg. e foi:   182.303334
Rota dos veýculos usados com partida e chegada na empresa:
Veýculo 1:  5 16
Veýculo 2:  10 21
Veýculo 3:  7 18
Veýculo 4:  9 20
Veýculo 5:  6 17 0 13
Veýculo 6:  4 15 8 19
Veýculo 7:  1 12 2 3 11 22 0 14


Digite qualquer numero inteiro e pressione enter para sair:
```

Fonte: Elaborado pelo autor

Nesta tela é possível observar diversas informações e etapas do processo como a entrada de dados dos pontos de destino e da frota, os vetores ordenados das solicitações de entrega e solicitações de coleta, os resultados obtidos a cada iteração, os resultados do melhor desempenho para população inicial, operador de

cruzamento e operador de mutação, o custo total da solução e o tempo gasto para obtê-la e, por fim, as rotas que serão percorridas por cada um dos veículos.

A seguir serão apresentadas as tabelas com os resultados resumidos para os experimentos realizados com cada um dos operadores de cruzamento. Estas tabelas irão incluir somente os dados referentes à quantidade de destinos, quantidade de iterações necessárias para chegar à solução, custo total da solução em quilômetros e o tempo gasto pelo AG para chegar ao resultado final em segundos.

As tabelas com resultados completos serão incluídas ao final do trabalho no Anexo I.

A Tabela 3, abaixo, apresenta de forma resumida os resultados obtidos em cada uma das instâncias testadas com o Cruzamento 1P, mostrando a quantidade de solicitações (ou destinos) de cada instância, a quantidade de iterações, o custo da solução em quilômetros e o tempo necessário, em segundos, para que o AG chegasse neste resultado.

Tabela 3 – Resultado do AG para Cruzamento 1P

Instâncias	Quantidade de solicitações	Quantidade de iterações	Resultado do AG (Km)	Tempo (Segundos)
dia01032010	4	1	125,99	0,34
dia02032010	6	2	73,55	1,55
dia03032010	6	2	68,95	1,12
dia04032010	6	2	81,06	1,34
dia08032010	5	2	69,62	0,97
dia09032010	5	1	65,03	0,60
dia15032010	9	2	98,72	2,06
dia16032010	7	3	85,46	1,94
dia19032010	3	2	22,91	0,23
dia22032010	6	2	74,41	0,81
dia23032010	5	2	72,15	1,06
dia24032010	11	2	109,95	4,13
dia25032010	15	3	171,00	12,83
dia26032010	11	2	182,30	2,59
dia29032010	8	2	113,42	2,93
dia30032010	14	2	246,56	6,49
dia31032010	9	2	165,18	2,64

Fonte: Elaborada pelo Autor

A Tabela 4, abaixo, apresenta de forma resumida os resultados obtidos a partir do AG utilizando o operador de cruzamento 2P para as mesmas dezessete instâncias da tabela anterior.

Tabela 4 – Resultado do AG para Cruzamento 2P

Instâncias	Quantidade de Solicitações	Quantidade de iterações	Resultado do AG (Km)	Tempo (Segundos)
dia01032010	4	1	125,99	0,31
dia02032010	6	2	73,55	1,46
dia03032010	6	2	68,95	1,24
dia04032010	6	2	81,06	1,56
dia08032010	5	2	69,62	1,04
dia09032010	5	1	65,03	0,59
dia15032010	9	2	98,72	2,39
dia16032010	7	3	85,46	1,96
dia19032010	3	2	22,91	0,27
dia22032010	6	2	74,41	0,78
dia23032010	5	2	72,15	1,15
dia24032010	11	2	109,95	4,28
dia25032010	15	3	171,00	9,34
dia26032010	11	2	182,30	2,64
dia29032010	8	2	113,42	3,15
dia30032010	14	2	246,56	7,17
dia31032010	9	2	165,18	3,27

Fonte: Elaborada pelo Autor

Mais adiante, ainda neste capítulo, serão comparados os resultados obtidos a partir dos testes com os três diferentes operadores de cruzamento. Os operadores serão comparados quanto à quantidade de iterações, o tempo de processamento e o custo total da solução.

Na Tabela 5 são apresentados os resultados resumidos do AG utilizando o operador de cruzamento PM. Assim como nos testes anteriores, todas as instâncias foram processadas e seus resultados foram arquivados.

Tabela 5 – Resultados do AG para Cruzamento PM

Instâncias	Quantidade de Solicitações	Quantidade de iterações	Resultado do AG (Km)	Tempo (Segundos)
dia01032010	4	1	125,99	0,31
dia02032010	6	2	73,55	1,57
dia03032010	6	2	68,95	1,02
dia04032010	6	2	81,06	1,29
dia08032010	5	2	69,62	0,86
dia09032010	5	1	65,03	0,55
dia15032010	9	2	98,72	2,16
dia16032010	7	2	85,46	1,24
dia19032010	3	2	22,91	0,21
dia22032010	6	2	74,41	0,70
dia23032010	5	2	72,15	0,86
dia24032010	11	2	109,95	3,63
dia25032010	15	3	171,00	12,15
dia26032010	11	4	182,30	4,74
dia29032010	8	2	113,42	3,00
dia30032010	14	2	246,56	6,22
dia31032010	9	3	165,18	3,98

Fonte: Elaborada pelo Autor

6.2 – Análise dos resultados

Nesta análise, os resultados obtidos através do AG serão comparados entre si. Serão comparados os desempenhos dos três operadores de cruzamento utilizados quanto ao desempenho na quantidade de iterações, tempo de processamento e custo total da solução. Posteriormente será analisada a relevância dos resultados obtidos para a resolução do estudo de caso.

6.2.1 – Comparação entre os resultados dos operadores 1P, 2P e PM

Nesta seção será apresentada uma breve comparação entre os dados obtidos através da utilização dos três tipos de operadores de cruzamento.

A Tabela 6, abaixo, apresenta um comparativo entre os dados obtidos, comparando os operadores de cruzamento dois a dois.

Tabela 6 – Comparativo dos resultados do AG

Instâncias	Quantidade de Iterações	1P vs 2P			1P vs PM			2P vs PM		
		AG	Iterações	Tempo	AG	Iterações	Tempo	AG	Iterações	Tempo
dia01032010	4	0%	0%	-8,82%	0%	0%	-8,82%	0%	0%	0,00%
dia02032010	6	0%	0%	-5,81%	0%	0%	1,29%	0%	0%	7,53%
dia03032010	6	0%	0%	10,71%	0%	0%	-8,93%	0%	0%	-17,74%
dia04032010	6	0%	0%	16,42%	0%	0%	-3,73%	0%	0%	-17,31%
dia08032010	5	0%	0%	7,22%	0%	0%	-11,34%	0%	0%	-17,31%
dia09032010	5	0%	0%	-1,67%	0%	0%	-8,33%	0%	0%	-6,78%
dia15032010	9	0%	0%	16,02%	0%	0%	4,85%	0%	0%	-9,62%
dia16032010	7	0%	0%	1,03%	0%	33%	-36,08%	0%	33%	-36,73%
dia19032010	3	0%	0%	17,39%	0%	0%	-8,70%	0%	0%	-22,22%
dia22032010	6	0%	0%	-3,70%	0%	0%	-13,58%	0%	0%	-10,26%
dia23032010	5	0%	0%	8,49%	0%	0%	-18,87%	0%	0%	-25,22%
dia24032010	11	0%	0%	3,63%	0%	0%	-12,11%	0%	0%	-15,19%
dia25032010	15	0%	0%	-27,20%	0%	0%	-5,30%	0%	0%	30,09%
dia26032010	11	0%	0%	1,93%	0%	-100%	83,01%	0%	-100%	79,55%
dia29032010	8	0%	0%	7,51%	0%	0%	2,39%	0%	0%	-4,76%
dia30032010	14	0%	0%	10,48%	0%	0%	-4,16%	0%	0%	-13,25%
dia31032010	9	0%	0%	23,86%	0%	-50%	50,76%	0%	-50%	21,71%
Média		0,00%	0,00%	4,56%	0,00%	-6,86%	0,14%	0,00%	-6,86%	-3,38%

Fonte: Elaborado pelo autor

Para realizar estas comparações foi utilizada a equação (26), que serviu para comparar as grandezas, duas a duas obtendo sua diferença percentual.

$$\frac{(A_2 - A_1)}{A_1} \tag{26}$$

Na coluna 1P vs 2P observa-se a comparação entre os resultados do operador de cruzamento com um ponto de corte e o operador com dois pontos de corte. De maneira geral não há diferença entre os resultados obtidos para o custo da solução nem na quantidade de iterações necessárias para se chegar ao resultado. Há, no entanto alguma diferença nos tempos de processamento.

A partir dos dados expostos na Tabela 6 é possível perceber que, em média, o operador 1P gastou 4,56% menos tempo para atingir um resultado quando comparado com o tempo de processamento do operador de cruzamento P2.

A segunda comparação ocorre entre o operador de cruzamento com um ponto de corte e o operador *partially mapped*. Assim como na comparação entre o 1P e o 2P, não há diferença nos resultados obtidos para o custo da solução. Porém nesta comparação é possível observar que para as instâncias relativas aos dias 16/03/2010 (dia16032010), 26/03/2010 (dia26032010) e 31/03/2010 (dia31032010) há diferença na quantidade de iterações necessárias para a obtenção do resultado. Em duas das três instâncias, o operador de cruzamento 1P ajudou o AG a chegar ao resultado em menos iterações com uma média de 6,86% menos iterações.

Esse resultado pode indicar que o operador de cruzamento 1P ajuda o AG a convergir mais rapidamente para um resultado, porém em apenas duas de dezessete instâncias mostraram essa característica, por isso não é possível confirmar esta hipótese com base somente nestes dados.

Ainda comparando o operador 1P com o operador PM é possível ver que há uma pequena margem de vantagem para o primeiro no que diz respeito a tempo de processamento, com 0,14% menos tempo necessário para o 1P.

Por fim, comparando o operador 2P com o operador PM é possível ver que com os dois, o AG chegou às soluções de mesmo custo e que além do operador 2P atingir o resultado com uma maior quantidade de iterações (6,86% a mais), o tempo de processamento necessário foi, em média, maior que o do operador PM. Neste comparativo o operador PM tem uma vantagem de 3,38% em relação ao operador 2P.

6.2.2 – Relevância dos resultados para o estudo de caso

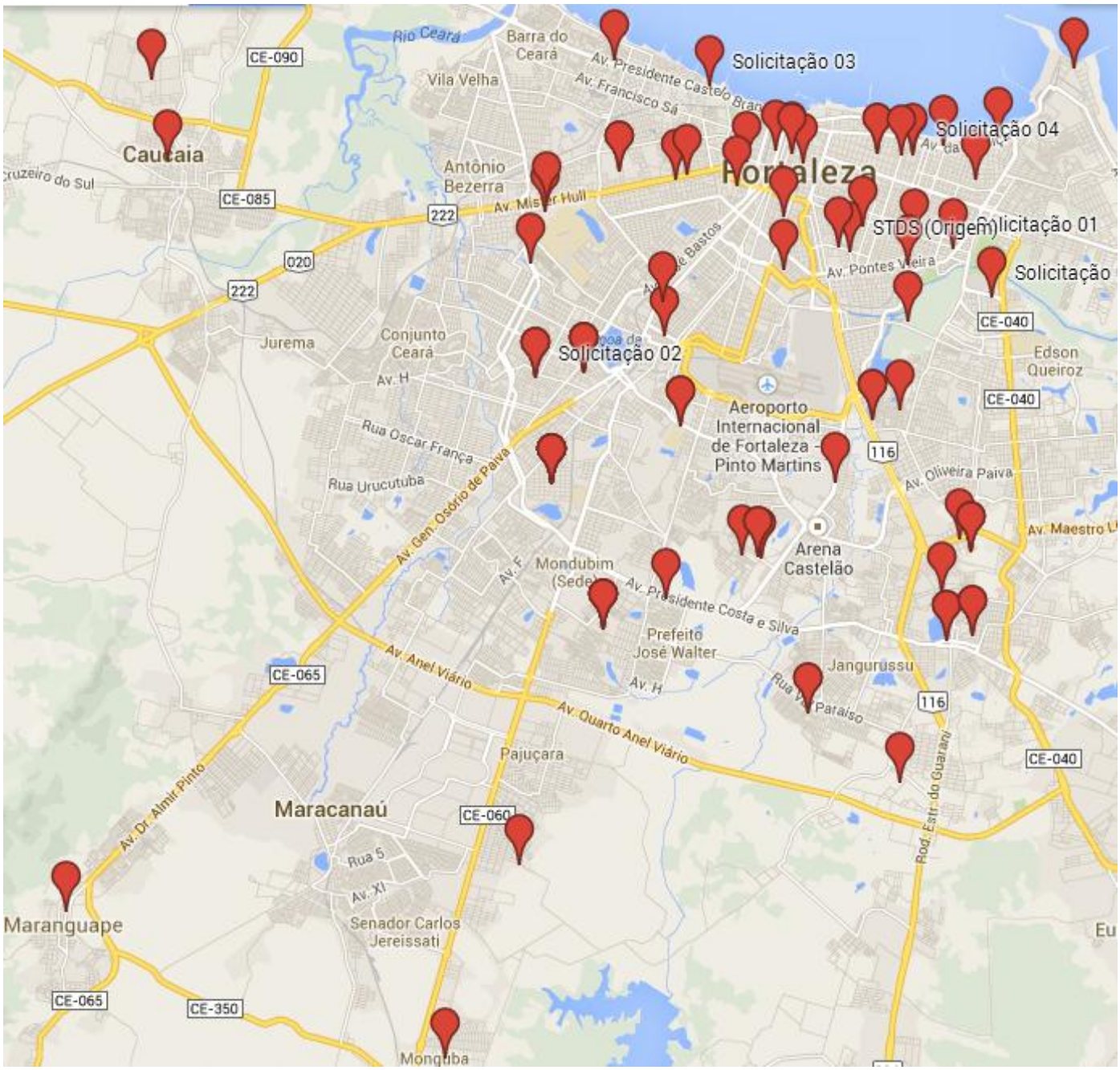
Os resultados apresentados nas seções 6.1 e 6.2 são referentes às 17 instâncias testadas no AG. Estas instâncias somam 132 solicitações de visitas com uma quantidade total de 188 passageiros transportados.

Para todas as instâncias a mesma frota foi disponibilizada. Esta frota era composta de sete veículos, sendo cinco deles com capacidade para quatro passageiros e dois com capacidade para oito passageiros.

A Figura 28 mostra o mapa da cidade de Fortaleza e região metropolitana com marcadores em todos os destinos que constam nas solicitações dos relatórios do SFV. A partir da Figura 28 é possível perceber o tamanho da região normalmente

coberta pelo atendimento da STDS e da importância que a disponibilidade da frota para atender estas solicitações.

Figura 28 – Mapa de solicitações



Fonte: Elaborado pelo autor

A frota de sete veículos utilizada para os cálculos do AG, apesar de menor que a frota real da STDS, foi suficiente para suprir todas as solicitações de visitas apresentadas.

Do relatório de solicitações de transporte do SFV é possível contabilizar que 25 solicitações não foram atendidas e 23 solicitações não tem indicação se foram ou não atendidas.

Isto significa dizer que pelo menos 18,94% das visitas deixou de ser realizadas neste período (considerando somente aquelas com a marcação “não atendida”).

Estas solicitações poderiam ter sido atendidas caso fosse utilizada uma ferramenta que tornasse o roteamento da frota mais eficiente, como o AG apresentado neste trabalho.

Vale também ressaltar que das 17 instâncias, apenas a instância relativa ao dia 26/03/2010 fez uso de todos os sete veículos disponibilizados. Todas as demais instâncias conseguiram atender a todas as solicitações utilizando-se de seis ou menos veículos.

Capítulo 7 – Conclusões e Recomendações para trabalhos futuros

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões deste trabalho e as recomendações para trabalhos futuros que pretendam abordar o mesmo tema.

7.1 – Conclusões

O principal objetivo deste trabalho foi alcançado através da utilização de um Algoritmo Genético para a resolução de um problema logístico de roteirização de veículos.

O AG utilizado neste trabalho mostrou ser capaz de fornecer em tempo hábil e com poucos recursos computacionais, uma solução viável para o problema, apresentando soluções de baixo custo e que foram capazes de atender na totalidade as solicitações de visitas, mostrando assim ser uma alternativa mais eficiente que o método atual utilizado pela instituição estudada.

Este trabalho conseguiu também apresentar os conceitos relativos ao PRVFHJT, mostrando suas características, restrições, formulação matemática, aplicações, métodos de abordagens e como este problema da Pesquisa Operacional pode ser utilizado enquanto ferramenta para a resolução de problemas logísticos.

Por ser um campo de grande relevância tanto acadêmica como comercial, o estudo do PRV está em evidência e mostra-se ser um campo de estudo em expansão, com novos problemas surgindo para suprir as necessidades da logística atual, a exemplo do problema estudado neste trabalho.

O Algoritmo Genético utilizado durante este trabalho foi elaborado especificamente para a resolução do problema abordado. O algoritmo foi testado em várias instâncias e com diferentes operadores de cruzamento e obteve resultados satisfatórios de baixo custo e em tempo hábil, sendo capaz de indicar um modo mais eficiente para a utilização da frota da instituição que serviu de base para o estudo.

7.2 – Recomendações para trabalhos futuros

O presente trabalho teve seu foco na elaboração de um Algoritmo Genético que buscou solucionar um problema logístico de utilização eficiente de frota. Considerando a grande relevância deste problema tanto no âmbito acadêmico como

no comercial, seguem abaixo algumas recomendações para os futuros trabalhos sobre roteamento:

a) Elaboração do modelo matemático das restrições relativas às coletas e entregas separadas sem quebrar as restrições implícitas do problema, tais como limite de permanência na viatura de funcionários, carga horária do motorista do veículo, etc;
b) Utilização de outros operadores de mutação e cruzamento buscando obter resultados de menor custo para o Algoritmo Genético;
c) Utilizar outras meta-heurísticas ao abordar o PRVFHJT com coleta e entrega separadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APPLEGATE, D. L. [et al.]; ***The travelling salesman problem: a computational Study***. Princeton: Princeton University Press, 2006.

BAKER, B.M.; **A genetic algorithm for the vehicle routing problem**. Computers & Operational Research 30. 2003.

BALLOU, R. H.; **Gerenciamento da cadeia de suprimentos/Logística empresarial**. São Paulo. 2008

BEZERRA, F. P.; **Um algoritmo genético aplicado no problema da roteirização periódica de veículos com caso prático**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2012.

BLUM, C.; ROLI, A. **Metaheuristics in Combinatorial Optimization: Overview and Conceptual Comparison**. **Computing Surveys**, 2003.

BOWERSOX, D. J.; CLOSS, D. J.; **Logística Empresarial: O processo de integração da cadeia de suprimentos**. São Paulo. 2001

BRÄYSY *et al*; **An effective Multirestart Deterministic Annealing Metaheuristic for the Fleet Size and mix Vehicle-Routing Problem with Time Windows**. Transportation Science 42(3). 2008

CAMPELO, J. U. Jr.; **Proposta de Otimização da Roteirização dos Distritos dos Carteiros: Um estudo de Caso no Centro de Entrega de Encomendas de Fortaleza**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2010.

CHRISTOFIDES, N.; EILON, S. **Algorithms for Large-scale Travelling Salesman Problems**. Operational Research Quartterly, v.23, n.4, 1972.

DAVIS, L. D. **Adapting operator probabilities in genetic algorithms**. Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms, San Mateo, CA, 1989.

DELL'AMICO, M.; MONACI, M.; PAGANI, C.; VIGO, D.; **Heuristc Approaches for the Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem With Time Windows**. Transportation Science. 2007.

EHRLICH, P. J. **Pesquisa operacional – Curso introdutório**. Editora Atlas S.A., 1991.

FIGUEIREDO, K. F.; FLEURY, P. F.; WANKE, P.; **Logística e gerenciamento da cadeia de suprimentos: planejamento do fluxo de produtos e dos recursos**. São Paulo. 2003.

GENDRAU, M., HERTZ, A., LAPORTE, G.; **A tabu search heuristic for the vehicle routing problem**. Management Science, Vol. 40, No. 10, 1994.

GLOVER, F.; LAGUNA, M.; **Tabu Search**, Kluwer, Boston, 1997.

GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. **Otimização combinatória e programação linear**. 2ed. Brasil: Campus, 2005.

GOLDBERG, D.E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning.** Addison Wesley, Reading, MA, 1989.

GOMES, C. F. S.; RIBEIRO, P. C. C. **Gestão da cadeia de suprimentos integrada à tecnologia da informação**. São Paulo. 2004

GOMES, F. R. A. **Algoritmo genético aplicado aos problemas de sequenciamento Flowshop sem e com restrição de espera**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

GOMES, R. F. S. **Aplicação da metaheurística Tabu Search na otimização de rotas de manutenção preventiva em campo.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

GREFENSTETTE, J. J.. **Optimization of control parameters for genetic algorithms**. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, v.16, 1986

HELSGAUN, K. **Na Effective Implementation of the Link-Kernighan Traveling Salesman Heuristic**.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G.J. **Introdução à pesquisa operacional**. 8ª ed. Porto Alegre: AMGH, 2010

HOLLAND, J.H. **Adaptation in natural artificial systems**. University of Michigan Press, Michigan, 1975.

LAPORTE, G.; **The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms**. European Journal of Operational Research 59, 1992.

MINE, M. T.; SILVA, M. S. A.; OCHI, L. S.; SOUZA, M. J. F.; SILVA, T. C. B. **O problema de roteamento de veículos com coleta e entrega simultânea: uma abordagem via *Iterated Local Search* e GENIUS**. TRANSPORTES, v. XVIII. 2010.

MITCHELL, Melanie. **An introduction to genetic algorithms.** Cambridge: MIT Press, 1998.

NOVAES, A. G.; **Logística e gerenciamento da cadeia de distribuição: estratégia, operação e avaliação**. Rio de Janeiro. 2004

OSMAN, I. H., **Metastrategy simulated annealing and tabu search algorithms for the vehicle routing problem**. Annals of Operations Research 41, 1993.

POURGHADERI, A. R.; TORABI, S. A.; SEKHAVAT, S.; **Scatter Search for a Real-life Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem with Time Windows in Iran**. IEEE IEEM. 2009

QUEIROZ, A. S.; **Uma técnica aplicada na resolução do problema de designação de veículos: caso Secretaria do Trabalho e Desenvolvimento Social do Estado do Ceará**. Monografia (Especialização), Fortaleza. 2010.

RIBAS, P. C. **Análise do uso de Têmpera Simulada na otimização do planejamento mestre da produção**. Dissertação (Mestrado), Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2003.

SILVA, B. C. H. **Otimização de rotas utilizando abordagens heurísticas em um ambiente georeferenciado**. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2013

SILVA, J.L.C., SOMA, N.Y. **Uma heurística para problemas de otimização combinatória permutacional**. *XXIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO),* Campos do Jordão-SP, 2001.

SILVA, J.L.C. et. al. **Uma heurística aplicada ao problema do caixeiro viajante**. *XXVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO), 2005*, Gramado-RS, 2005

Sociedade brasileira de pesquisa operacional (SOBRAPO). Disponível em: < http://www.sobrapo.org.br/sitesobrapo.htm> . Acesso em: 05 jul. 2014

SOLOMON, M. M. **Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time windows constraints**. Operations Research. Vol.35, n.2, 1987.

SOUSA, A.S. **Tomada de decisão *fuzzy* e Busca Tabu aplicadas ao planejamento da expansão de sistemas de transmissão**. Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

SOUZA, R. C. T. **Heurísticas bioinspiradas de otimização combinatória**. Gestão – Revista Científica de Adminstração, v.10, n.10, jan/jun. 2008.

VALENTE, A. M.; **Gerenciamento de transporte e frotas**. São Paulo. 2003

VIANA, G. V. R. **Metaheurísticas e Programação Paralela em Otimização Combinatória**. UFC edições. 1998.

Anexo I

i) Tabela de Solicitação de visitas

Dt. Agend.	Hr Saída	Hr Retorno	Situação	Origem	Destino	Motivo	Observação	Nº Ocupantes
01/03/2010	07:30:00	16:30:00	Atendido	STDS	MARANGUAPE	ACOMPANHAR CAPACITAÇÃO		1
01/03/2010	08:30:00	16:00:00	Atendido	STDS	PRIMEIRO PASSO	TREINAMENTO		1
01/03/2010	13:30:00	15:00:00	N. Atend.	STDS	ABC JOSÉ WALTER	DILIGÊNCIA DE IMÓVEL	MOTORISTA NOVATO	1
01/03/2010	09:15:00	10:30:00	Atendido	STDS	UNIDADE - VIVA GENTE	VISITA		1
02/03/2010	13:00:00	16:00:00	Atendido	STDS	ALMOXARIFADO	REALIZAR TOMBAMENTOS		2
02/03/2010	13:30:00	17:00:00	Atendido	STDS	CEPOD	REUNIÃO		1
02/03/2010	08:00:00	11:00:00	Atendido	STDS	UNIDADE - ABRIGO IDOSOS	VISITA		1
02/03/2010	08:30:00	12:00:00	N. Atend.	STDS	CESM E CECAL	REUNIÃO	Falta de carro	2
02/03/2010	09:00:00	13:00:00	Atendido	STDS	CECAL	REUNIÃO		2
02/03/2010	15:30:00	17:30:00	Novo	STDS	ASSEMBLÉIA LEG.	REUNIÃO		1
03/03/2010	09:00:00	10:00:00	Novo	STDS	Escola João Matos Rua Almirante Rubim, 1014 Montes	Receber doações de livros		1
03/03/2010	13:00:00	16:00:00	Novo	STDS	CEDB	REUNIÃO		1
03/03/2010	13:00:00	17:00:00	Novo	STDS	CEPOD	REUNIÃO		1
03/03/2010	09:00:00	12:00:00	Atendido	STDS	CECAL	REUNIÃO		1
03/03/2010	19:00:00	23:00:00	Novo	STDS	Frei Mansueto N°1077 Ap 2002 Varjota	RONDA NAS UNIDADES		1
03/03/2010	13:00:00	16:00:00	Novo	STDS	CENTEC	REUNIÃO		3
04/03/2010	13:35:00	16:00:00	Atendido	STDS	CIB	REUNIÃO		1
04/03/2010	14:00:00	16:00:00	Atendido	STDS	TCE	REUNIÃO		1
04/03/2010	09:00:00	11:00:00	Atendido	STDS	UNIDADE - ABRIGO TIA JÚLIA	VISITA		1
04/03/2010	09:00:00	11:00:00	Atendido	STDS	SUPERM. PINHEIRO	COLETA DE PREÇO		1
04/03/2010	08:30:00	12:00:00	Atendido	STDS	CEPA	REUNIÃO		2
04/03/2010	13:30:00	17:00:00	N. Atend.	STDS	IDT	REUNIÃO	Falta de carro	1
08/03/2010	08:00:00	12:00:00	Atendido	STDS	UNIDADE - CASA DO CAMINHO	Visita técnica		1
08/03/2010	08:00:00	17:00:00	Atendido	STDS	CONDOMINIO ESPIRITUAL UIRAPURU	Capacitação		4
08/03/2010	09:00:00	12:00:00	Atendido	STDS	PRIMEIRO PASSO	MANUTENÇÃO		1
08/03/2010	08:00:00	13:00:00	Atendido	STDS	Hotel Praiano	EVENTO		3

08/03/2010	14:00:00	14:30:00	Atendido	STDS	PRIMEIRO PASSO	ENTREGAR EQUIPAMENTO		1
09/03/2010	08:30:00	12:00:00	Atendido	STDS	NORMATEL	COLETA DE PREÇO		1
09/03/2010	08:00:00	11:00:00	Atendido	STDS	UNIDADE - ALBERGUE	REUNIÃO		2
09/03/2010	13:00:00	15:00:00	Atendido	STDS	CC PIRAMBU	Visita técnica		1
09/03/2010	13:00:00	16:00:00	Atendido	STDS	PRIMEIRO PASSO	MANUTENÇÃO		1
09/03/2010	15:30:00	17:00:00	Atendido	STDS	Gabinete do Governador / Palácio Iracema	REUNIÃO		1
15/03/2010	13:00:00	16:00:00	Atendido	STDS	UNIDADES DA STDS	LEVANTAMENTO DE BENS PATRIMONIAIS.		1
15/03/2010	08:00:00	11:00:00	Atendido	STDS	UNIDADES DA STDS	LEVANTAMENTO DE BENS PATRIMONIAIS.		1
15/03/2010	08:00:00	16:00:00	Atendido	STDS	CENTEC	REUNIÃO		1
15/03/2010	08:30:00	12:00:00	Atendido	STDS	PRIMEIRO PASSO	MANUTENÇÃO		1
15/03/2010	08:00:00	12:00:00	Atendido	STDS	UNIDADE - CASA DO CAMINHO	Visita técnica		1
15/03/2010	08:00:00	10:00:00	N. Atend.	STDS	ARQUIVO GERAL	Visita técnica	Falta de carro	1
15/03/2010	13:00:00	17:00:00	N. Atend.	STDS	SECULT	REUNIÃO	Falta de carro	1
15/03/2010	13:00:00	17:00:00	N. Atend.	STDS	CEABM	VISITA	Falta de carro	1
15/03/2010	15:00:00	17:00:00	Novo	STDS	DIÁRIO DO NORDESTE	REUNIÃO		1
16/03/2010	08:00:00	11:00:00	Atendido	STDS	UNIDADES DA STDS	LEVANTAMENTO DE BENS PATRIMONIAIS.		1
16/03/2010	13:00:00	16:00:00	N. Atend.	STDS	UNIDADES DA STDS	LEVANTAMENTO DE BENS PATRIMONIAIS.	Falta de carro	1
16/03/2010	13:00:00	17:00:00	N. Atend.	STDS	GRAB (RUA TERESA CRISTINA 1050 CENTRO)	REUNIÃO	Falta de carro	1
16/03/2010	08:00:00	12:00:00	Atendido	STDS	UNIDADE - CASA DO CAMINHO	Visita técnica		1
16/03/2010	08:00:00	11:00:00	N. Atend.	STDS	UNIDADE - ABRIGO RENASCER E SANTA GIANA	Visita técnica	Falta de carro	1
16/03/2010	10:00:00	17:00:00	N. Atend.	STDS	CECAL	VISITA	Falta de carro	3
16/03/2010	08:30:00	11:00:00	N. Atend.	STDS	Hotel Praiano	Capacitação	Falta de carro	2
19/03/2010	08:00:00	11:00:00	N. Atend.	STDS	UNIDADES DA STDS	LEVANTAMENTO DE BENS PATRIMONIAIS.	Falta de carro	1
19/03/2010	13:00:00	16:00:00	N. Atend.	STDS	UNIDADES DA STDS	LEVANTAMENTO DE BENS PATRIMONIAIS.	Falta de carro	1
19/03/2010	08:00:00	13:00:00	Atendido	STDS	Rua: Frei Mansueto Nº 1077 Ap :2002 Varjota	RONDA NAS UNIDADES		1
22/03/2010	09:00:00	11:00:00	Atendido	STDS	UNIDADE - ABRIGO NOSSA CASA	VISITA		1

22/03/2010	08:00:00	16:00:00	Atendido	STDS	UNIDADES DA STDS	LEVANTAMENTO DE BENS PATRIMONIAIS.		1
22/03/2010	08:00:00	11:00:00	Atendido	STDS	CECAL	VISITA		1
22/03/2010	08:30:00	12:00:00	Atendido	STDS	CASA CIVIL	REUNIÃO		1
22/03/2010	13:30:00	15:30:00	Atendido	STDS	CEART	MANUTENÇÃO		2
22/03/2010	08:00:00	12:00:00	Atendido	STDS	Hotel Praiano	EVENTO		2
22/03/2010	15:00:00	16:00:00	Atendido	STDS	Hotel Praiano	FOTOS		1
23/03/2010	08:00:00	16:00:00	N. Atend.	STDS	UNIDADES DA STDS	LEVANTAMENTO DE BENS PATRIMONIAIS.	Falta de carro	1
23/03/2010	09:00:00	11:00:00	N. Atend.	STDS	IDT	REUNIÃO	Falta de carro	1
23/03/2010	08:00:00	12:00:00	Atendido	STDS	CLUB OASIS	VISITA		1
23/03/2010	14:00:00	17:00:00	Atendido	STDS	UNIDADE - ABRIGO IDOSOS	Visita técnica		3
23/03/2010	13:30:00	17:00:00	Atendido	STDS	CC Tancredo Neves	ENCONTRO		4
24/03/2010	08:00:00	16:00:00	Atendido	STDS	UNIDADES DA STDS	LEVANTAMENTO DE BENS PATRIMONIAIS.		1
24/03/2010	13:00:00	17:00:00	Atendido	STDS	CC FAROL	TREINAMENTO		2
24/03/2010	08:00:00	19:00:00	Atendido	STDS	CLUB OASIS	APOIO AO ENCONTRO		1
24/03/2010	08:00:00	12:00:00	N. Atend.	STDS	UNIDADE - CASA DO CAMINHO	Visita técnica	Falta de carro	1
24/03/2010	09:00:00	12:00:00	Atendido	STDS	CLUB OASIS	MONTAR EQUIPAMENTO		2
24/03/2010	08:30:00	11:00:00	Atendido	STDS	PRIMEIRO PASSO	VALIDAR SISTEMA		1
24/03/2010	08:00:00	11:30:00	Atendido	STDS	ALMOXARIFADO	ENTREGAR CESTA BÁSICA		3
24/03/2010	19:00:00	23:00:00	Atendido	STDS	rua frei mansueto n1077 ap2002 varjota	RONDA NAS UNIDADES		1
24/03/2010	13:00:00	16:00:00	Atendido	STDS	PRIMEIRO PASSO	VALIDAR SISTEMA		1
24/03/2010	13:30:00	16:30:00	N. Atend.	STDS	UNIDADE - ABRIGO IDOSOS	Visita técnica	Falta de carro	3
24/03/2010	10:30:00	11:00:00	N. Atend.	STDS	UNIDADE - CASAS ABRIGO	FOTOS	Falta de carro	1
25/03/2010	08:30:00	11:00:00	Novo	STDS	Central Fácil	REUNIÃO		1
25/03/2010	08:30:00	10:00:00	Novo	STDS	Central Fácil	REUNIÃO		2
25/03/2010	08:00:00	16:00:00	Novo	STDS	UNIDADES DA STDS	LEVANTAMENTO DE BENS PATRIMONIAIS.		1
25/03/2010	13:00:00	17:00:00	Novo	STDS	CENTRO COMUNITÁRIO FAROL	TREINAMENTO		2
25/03/2010	14:00:00	16:00:00	Novo	STDS	Central Fácil	Capacitação		1
25/03/2010	08:30:00	16:00:00	Novo	STDS	CEDB, CESM e CESF	REUNIÃO		1

25/03/2010	09:30:00	11:00:00	Novo	STDS	Central Fácil	MANUTENÇÃO		1
25/03/2010	13:00:00	17:00:00	Novo	STDS	ABC CAJUEIRO TORTO	Visita técnica		1
25/03/2010	08:30:00	11:00:00	Novo	STDS	COGER	REUNIÃO		2
25/03/2010	13:30:00	16:30:00	Novo	STDS	UNIDADE - ABRIGO IDOSOS	Visita técnica		3
25/03/2010	08:00:00	12:00:00	Atendido	STDS	SDA.	REUNIÃO		2
25/03/2010	08:30:00	11:00:00	Novo	STDS	UNIDADE - PRIMEIRO PASSO	VALIDAR SISTEMA		1
25/03/2010	09:00:00	11:00:00	Novo	STDS	OASIS CLUB	BUSCAR MATERIAL DE EVENTO		1
25/03/2010	14:00:00	16:30:00	Novo	STDS	UECE	REUNIÃO		1
25/03/2010	14:30:00	15:00:00	Novo	STDS	ABBEM	ENTREGAR DOCUMENTOS		1
26/03/2010	07:00:00	12:00:00	Atendido	STDS	SEPLAG	TREINAMENTO		1
26/03/2010	08:00:00	16:00:00	Atendido	STDS	UNIDADES DA STDS	LEVANTAMENTO DE BENS PATRIMONIAIS.		1
26/03/2010	13:30:00	17:00:00	Atendido	STDS	CC Tancredo Neves	REUNIÃO		2
26/03/2010	08:30:00	11:00:00	Atendido	STDS	CEABM, CSMF	REUNIÃO		1
26/03/2010	08:00:00	17:00:00	Atendido	STDS	FÁBRICA - PACATUBA	ENTREGAR DOAÇÃO		3
26/03/2010	08:00:00	12:00:00	N. Atend.	STDS	CÂMARA MUNICIPAL - CAUCAIA	LANÇAMENTO DE PROGRAMA	Falta de carro	1
26/03/2010	08:00:00	12:00:00	N. Atend.	STDS	UNIDADE - CASA CAMINHO	Visita técnica	Falta de carro	1
26/03/2010	13:00:00	16:00:00	Atendido	STDS	TEATRO JOSÉ DE ALENCAR	REUNIÃO		4
26/03/2010	08:30:00	12:00:00	N. Atend.	STDS	Conjunto Palmeiras	Visita técnica	Falta de carro	2
26/03/2010	08:20:00	11:00:00	Atendido	STDS	CÂMARA MUNICIPAL	REUNIÃO		2
26/03/2010	15:00:00	15:30:00	Atendido	STDS	ABBEM	ENTREGAR DOCUMENTOS		1
29/03/2010	08:00:00	12:00:00	Atendido	STDS	UNIDADES DA STDS	LEVANTAMENTO DE BENS PATRIMONIAIS.		1
29/03/2010	08:00:00	12:00:00	Atendido	STDS	Conjunto Palmeiras	Visita técnica	duplicidade de pedido	2
29/03/2010	08:00:00	12:00:00	Atendido	STDS	Conjunto Palmeiras	Visita técnica		2
29/03/2010	08:30:00	11:30:00	Atendido	STDS	UECE (REITORIA)	AULA INAUGURAL		1
29/03/2010	09:00:00	17:00:00	Atendido	STDS	UNIDADES DA STDS	LEVANTAMENTO DE BENS PATRIMONIAIS.		1
29/03/2010	13:30:00	15:30:00	Atendido	STDS	SEPLAG	REUNIÃO		1
29/03/2010	12:30:00	13:30:00	Atendido	STDS	Central Fácil	PEGAR DOCUMENTOS		1
29/03/2010	14:30:00	17:00:00	Atendido	STDS	Hotel Praiano	PEGAR MATERIAL		1
29/03/2010	15:00:00	17:00:00	Atendido	STDS	CEART	REUNIÃO		2

30/03/2010	08:30:00	12:00:00	Atendido	STDS	CC Luiza TavoraPirambu	Visita técnica		2
30/03/2010	14:00:00	17:00:00	Atendido	STDS	UNIDADE - CASA CAMINHO	Visita técnica		1
30/03/2010	08:00:00	17:00:00	Atendido	STDS	Caucaia	Conclusão do Planejamento Estratégico		2
30/03/2010	08:30:00	16:00:00	Atendido	STDS	CEDB, CESM e CESF	Visita técnica		2
30/03/2010	19:00:00	23:00:00	Atendido	STDS	Frei Mansueto N°1077 Ap 2002 Varjota	Fazer Ronda Nas Unidades Da STDS		1
30/03/2010	08:00:00	17:00:00	N. Atend.	STDS	UNIDADES DA STDS	LEVANTAMENTO DE BENS PATRIMONIAIS.	Falta de carro	1
30/03/2010	08:30:00	12:00:00	Atendido	STDS	CEART	Sistema frente de Loja - URGENTE		1
30/03/2010	13:30:00	14:00:00	Atendido	STDS	SEPLAG	Seminaria sobre ETICA		3
30/03/2010	08:00:00	09:00:00	Atendido	STDS	Central Fácil	trazê-la à Central Fácil		1
30/03/2010	10:00:00	12:00:00	N. Atend.	STDS	OASIS	Colher Nota Fiscal do Primeiro Encontro Regional do ProJovemTrabalhadro de Fortaleza	Falta de carro	1
30/03/2010	14:00:00	17:00:00	Novo	STDS	Caixa Economica	Atualizar a documentação do suprimento de fundo.		1
30/03/2010	13:30:00	17:00:00	Atendido	STDS	CEART	ATENDER AS DEMANDA DO GABINETE DA 1º DAMA		1
30/03/2010	09:00:00	11:00:00	Novo	STDS	UNIDADES DA STDS	LEVANTAMENTO DE BENS PATRIMONIAIS.		1
30/03/2010	13:00:00	16:00:00	Novo	STDS	UNIDADES DA STDS	LEVANTAMENTO DE BENS PATRIMONIAIS.		1
31/03/2010	08:00:00	17:00:00	Atendido	STDS	UNIDADES DA STDS	LEVANTAMENTO DE BENS PATRIMONIAIS.		1
31/03/2010	08:00:00	11:00:00	Atendido	STDS	UNIDADE - SÃO PIO	VISITA		1
31/03/2010	08:00:00	12:00:00	Atendido	STDS	CEART	Visita técnica		1
31/03/2010	08:30:00	10:00:00	Atendido	STDS	CEPA	Visita técnica		2
31/03/2010	09:30:00	12:00:00	N. Atend.	STDS	UNIDADE - ABRIGO IDOSOS	Visita técnica	Falta de carro	3
31/03/2010	09:00:00	10:30:00	Atendido	STDS	Rua Monsenhor Bruno	PEGAR MATERIAL		2
31/03/2010	13:10:00	14:00:00	Atendido	STDS	ABBEM	ENTREGAR DOCUMENTOS		1
31/03/2010	13:00:00	17:00:00	Atendido	STDS	UNIDADE - ABRIGO IDOSOS	Visita técnica		3
31/03/2010	14:00:00	16:00:00	Atendido	STDS	CEART	Sistema SAC - URGENTE		1

ii) Resultados AG com Operador de Cruzamento 1P

Instâncias	Quantidade de Solicitações	Quantidade de Iterações	Melhor resultado Pop. Inicial	Melhor resultado Op. Cross	Melhor resultado Op. Mutação	Resultado AG	Tempo
dia01032010	4	1	125,99	125,99	3.400.000,00	125,99	0,34
dia02032010	6	2	73,55	73,55	3.400.000,00	73,55	1,55
dia03032010	6	2	68,95	68,95	3.400.000,00	68,95	1,12
dia04032010	6	2	81,06	81,06	3.400.000,00	81,06	1,34
dia08032010	5	2	69,62	69,62	3.400.000,00	69,62	0,97
dia09032010	5	1	65,03	65,03	3.400.000,00	65,03	0,60
dia15032010	9	2	98,72	98,72	3.400.000,00	98,72	2,06
dia16032010	7	3	85,46	85,46	3.400.000,00	85,46	1,94
dia19032010	3	2	22,91	22,91	3.400.000,00	22,91	0,23
dia22032010	6	2	74,41	74,41	3.400.000,00	74,41	0,81
dia23032010	5	2	72,15	72,15	3.400.000,00	72,15	1,06
dia24032010	11	2	109,95	109,95	3.400.000,00	109,95	4,13
dia25032010	15	3	178,98	171,00	3.400.000,00	171,00	12,83
dia26032010	11	2	182,30	182,30	182,30	182,30	2,59
dia29032010	8	2	113,42	113,42	3.400.000,00	113,42	2,93
dia30032010	14	2	246,56	246,56	3.400.000,00	246,56	6,49
dia31032010	9	2	165,18	165,18	3.400.000,00	165,18	2,64

iii) Resultados AG com Operador de Cruzamento 2P

Instâncias	Quantidade de Solicitações	Quantidade de Iterações	Melhor resultado Pop. Inicial	Melhor resultado Op. Cross	Melhor resultado Op. Mutação	Resultado AG	Tempo
dia01032010	4	1	125,99	125,99	3.400.000,00	125,99	0,31
dia02032010	6	2	73,55	73,55	3.400.000,00	73,55	1,46
dia03032010	6	2	68,95	68,95	3.400.000,00	68,95	1,24
dia04032010	6	2	81,06	81,06	3.400.000,00	81,06	1,56
dia08032010	5	2	69,62	69,62	3.400.000,00	69,62	1,04
dia09032010	5	1	65,03	65,03	3.400.000,00	65,03	0,59
dia15032010	9	2	98,72	98,72	3.400.000,00	98,72	2,39
dia16032010	7	3	85,46	85,46	3.400.000,00	85,46	1,96
dia19032010	3	2	22,91	22,91	3.400.000,00	22,91	0,27
dia22032010	6	2	74,41	74,41	3.400.000,00	74,41	0,78
dia23032010	5	2	72,15	72,15	3.400.000,00	72,15	1,15
dia24032010	11	2	109,95	109,95	3.400.000,00	109,95	4,28
dia25032010	15	3	178,98	171,00	3.400.000,00	171,00	9,34
dia26032010	11	2	182,30	182,30	182,30	182,30	2,64
dia29032010	8	2	113,42	113,42	3.400.000,00	113,42	3,15
dia30032010	14	2	246,56	246,56	3.400.000,00	246,56	7,17
dia31032010	9	2	165,18	165,18	3.400.000,00	165,18	3,27

iv) Resultados AG com Operador de Cruzamento PM

Instâncias	Quantidade de Solicitações	Quantidade de Iterações	Melhor resultado Pop. Inicial	Melhor resultado Op. Cross	Melhor resultado Op. Mutação	Resultado AG	Tempo
dia01032010	4	1	125,99	125,99	3.400.000,00	125,99	0,31
dia02032010	6	2	73,55	73,55	3.400.000,00	73,55	1,57
dia03032010	6	2	68,95	68,95	3.400.000,00	68,95	1,02
dia04032010	6	2	81,06	81,06	3.400.000,00	81,06	1,29
dia08032010	5	2	69,62	69,62	3.400.000,00	69,62	0,86
dia09032010	5	1	65,03	65,03	3.400.000,00	65,03	0,55
dia15032010	9	2	98,72	98,72	3.400.000,00	98,72	2,16
dia16032010	7	2	85,46	85,46	85,46	85,46	1,24
dia19032010	3	2	22,91	22,91	3.400.000,00	22,91	0,21
dia22032010	6	2	74,41	74,41	3.400.000,00	74,41	0,70
dia23032010	5	2	72,15	72,15	3.400.000,00	72,15	0,86
dia24032010	11	2	109,95	109,95	3.400.000,00	109,95	3,63
dia25032010	15	3	178,98	171,00	3.400.000,00	171,00	12,15
dia26032010	11	4	182,30	182,30	182,30	182,30	4,74
dia29032010	8	2	113,42	113,42	3.400.000,00	113,42	3,00
dia30032010	14	2	246,56	246,56	3.400.000,00	246,56	6,22
dia31032010	9	3	165,18	165,18	3.400.000,00	165,18	3,98

v) Resultado do Roteamento calculado pelo AG[1][2]

Instâncias	Quantidade de Solicitações	Veículos						
		V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7
dia01032010	4	-	-	-	-	-	1; 4; 8; 3; 0; 7; 0; 5	2; 6
dia02032010	6	-	-	7; 6; 12	4; 10; 1	3; 9; 5; 11; 2; 8	-	-
dia03032010	6	-	-	1; 7; 2; 8; 5; 0; 11	4; 10; 3; 0; 9	6; 12	-	-
dia04032010	6	-	-	-	-	-	5; 3; 9; 11; 1; 2; 8	4; 10; 7; 6; 12
dia08032010	5	4; 9	6	8	-	-	1; 3; 5; 0; 10	2; 7
dia09032010	5	-	-	-	-	-	1; 6; 3; 5; 0; 9; 0; 10	2; 7; 4; 0; 8
dia15032010	9	5; 14	-	3; 10; 12; 7; 16	4; 13; 8; 0; 17	-	6; 15	2; 11; 1; 9; 18
dia16032010	7	-	4; 11; 2; 0; 9	-	7; 14	1; 6; 13	5; 12; 3; 10	8
dia19032010	3	-	-	-	-	-	1; 4; 2; 5	3; 6
dia22032010	6	-	6; 12	4; 10	3; 9	2; 1; 7; 5; 11; 0; 8	-	-
dia23032010	5	-	-	-	-	-	1; 2; 7; 5; 10	3; 8; 4; 0; 6; 0; 9
dia24032010	11	4; 15; 10	6; 17	7; 18	-	-	1; 5; 11; 22; 2; 16; 12; 21; 13; 14; 8; 19	3; 9; 20
dia25032010	15	9; 24; 15; 0; 21	12; 27	1; 2; 7; 0; 30; 0; 18; 0; 19	6; 8; 14; 29	-	17; 16; 22; 11; 26; 10; 25	3; 13; 28; 4; 5; 20; 0; 23
dia26032010	11	5; 16	10; 21	7; 18	9; 20	6; 17; 0; 13	4; 15; 8; 19	1; 21; 12; 2; 3; 11; 22; 0; 14
dia29032010	8	1; 4; 6; 5; 13; 0; 14; 0; 12	-	-	-	-	3; 11; 0; 9; 0; 16	2; 10; 7; 9; 0; 15

dia30032010	14	4; 14; 11; 25	3; 12; 2; 16	7; 21; 0; 20	9; 23; 0; 26	1; 13; 10; 24; 0; 17	27; 15; 6; 8; 18; 28; 22; 5; 19	-
dia31032010	9	4; 13	2; 6; 15; 0; 16; 0; 17	-	3; 12; 8	1; 5; 14; 11; 7; 9; 18; 0; 10	-	-

[1]: O AG faz a alocação das entregas separadamente da alocação das coletas. Para uma instância com “n” pontos as entregas (saídas) serão identificadas com pontos no intervalo [1, n] e as coletas (retornos) serão identificados com números no intervalo [n+1, 2n]

[2]: Os veículos V1 a V5 têm capacidade para 4 passageiros. Os veículos V6 e V7 tem capacidade para 8 passageiros.