

ADAPTAÇÃO DA META-HEURÍSTICA GRASP NA RESOLUÇÃO DO PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS COM JANELA DE TEMPO

Edgar Fonseca Franco Júnior

Laboratório de Inteligência Computacional (LInC)
Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL-MG
edgarf.franco@bcc.unifal-mg.edu.br

Humberto César Brandão de Oliveira

Laboratório de Inteligência Computacional (LInC)
Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL-MG
humberto@bcc.unifal-mg.edu.br

Resumo

O Problema de Roteamento de Veículos com Janela de Tempo (PRVJT) trata maneiras efetivas de se alcançar ganhos em sistemas de aplicações logísticas, sendo a minimização da distância total o principal foco deste trabalho, seguido pela diminuição do número total de veículos. O PRVJT consiste em um conjunto de consumidores com necessidades de demanda, um determinado número de veículos e um depósito central onde se iniciam e terminam as rotas que seguem restrições quanto ao tempo de atendimento ao consumidor. Este trabalho implementou uma mescla de algoritmos exatos e heurísticos para a resolução deste problema, a fim de possibilitar um melhor desempenho quanto a otimização das soluções. Para a execução dos experimentos foram utilizadas as instâncias de Solomon (1987), com o objetivo de efetuar um *benchmarking* sobre a minimização da distância total percorrida, os resultados foram comparados com os melhores da literatura, onde foram iguais ou superados 38 das 56 instâncias.

Palavras Chave: Problema de Roteamento de Veículos, GRASP, Problema de Particionamento de Conjuntos, Otimização Combinatória.

Abstract

The Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW) treats effective ways to achieve gains in systems of logistics applications, being the minimization of total distance the main focus of this paper, followed by the decrease in the total number of vehicles. The VRPTW is a set of consumers with needs demand, a set number of vehicles and a central depot where they start and finish routes that follow restrictions as to time of consumer care. This paper implemented a mix of exact algorithms and heuristics to solve this problem in order to provide a better performer in optimization solutions. For the execution of the experiments were used the instances of Solomon (1987), aiming to perform a benchmarking on minimizing the total distance traveled, the results were compared with the best of literature, where have been equaled or exceeded 38 of the 56 instances.

Keywords: Vehicle Routing Problem, GRASP, Set Partitioning Problem, Combinatorial Optimization.

1. INTRODUÇÃO

A redução dos custos com transporte tem se tornado cada vez mais determinante para aplicações logísticas, uma vez que o transporte representa uma porcentagem significativa no valor do produto final repassado ao consumidor (Alvarenga, 2005). Em um cenário real, uma distribuição logística eficiente garante maiores chances de sobressair quanto à concorrência.

O Problema de Roteamento de Veículos com Janela de Tempo (PRVJT) é derivado do Problema de Roteamento de Veículos (PRV) onde são tratadas maneiras de alcançar ganhos efetivos, tal problema é definido formalmente através de fórmulas matemáticas. O PRV foi inicialmente proposto por Dantzig & Ramser (1959), o qual consiste em um conjunto de consumidores com necessidades de demanda específica, um determinado número de veículos para atendê-los e um depósito central, onde se iniciam e terminam cada rota da solução.

O PRVJT estabelece restrições quanto ao tempo de atendimento de cada consumidor (janela de tempo), e também evidência a característica de um consumidor ser atendido por apenas um veículo durante uma solução completa.

2. ROTEAMENTO DE VEÍCULOS

Entende-se por roteamento de veículos, um conjunto de problemas que tem como objetivo determinar as melhores rotas para uma frota de veículos atenderem um conjunto de consumidores.

Esses problemas podem ser descritos através de um grafo, onde as arestas representam as rotas e os vértices os consumidores, sendo o objetivo encontrar as melhores rotas que liguem os consumidores. Porém, o roteamento de veículos envolve um número elevado de características que determinam a forma do problema e a sua proximidade da realidade.

Algumas características dos consumidores podem ser citadas: a localização geográfica, a demanda de mercadorias ou serviços, a janela de tempo para o atendimento, o tempo de serviço, entre outras.

Já os veículos possuem outras características: ponto de partida (podendo ser o ponto de retorno), capacidade mínima e máxima de carga ou de serviços a serem prestados, custos de utilização do veículo, etc.

Há uma gama de objetivos que podem ser almejados ao solucionar esses problemas como:

- Minimização da distância total percorrida pelos veículos;
- Minimização do número total de veículos utilizados;
- Minimização do tempo total de viagem;
- Combinação equilibrada de diferentes objetivos citados acima.

2.1. CLASSIFICAÇÃO E CARACTERÍSTICAS

A generalização mais abrangente capaz de contemplar muitas variações do roteamento de veículos é o Problema Geral de Coleta e Entrega (PGCE), ou “*General Pickup and Delivery Problem*” (GPDP), apresentado por Savelsbergh & Sol (1995), e divide nos três seguintes tipos:

- Problema de Coleta e Entrega (PCE), ou “*Pickup and Delivery Problem*” (PDP), consiste em coletar mercadorias de um único consumidor e entregar-las para um outro consumidor apenas, retornando ao ponto de partida no final do roteamento;
- “*Dial-a-Ride Problem*” (DARP), é similar ao PCE, porém ao invés de transportar mercadorias transporta pessoas;
- Problema de Roteamento de Veículos (PRV) ou “*Vehicle Routing Problem*” (VRP), a origem e o destino final são os mesmos para todos os veículos, o depósito central. Sendo que em cada rota pode haver mais de um consumidor.

Para Xu, et. al. (2003) o objetivo dos problemas de roteamento é o "uso eficiente de uma frota de veículos, que deverão coletar e entregar encomendas de mercadorias". Assim eles dividem o problema em três casos:

- Problema de Roteamento de Veículos Capacitado (PRVC), ou "*Capacitated Vehicle Routing Problem*" (CVRP), uma frota de veículos com capacidade limitada, localizada inicialmente em um depósito, deve atender a um conjunto de consumidores com diferentes demandas;
- Problema de Roteamento de Veículos com Janela de Tempo (PRVJT), ou "*Vehicle Routing Problem with Time Windows*" (VRPTW), é uma generalização do PRVC, porém há a restrição de janela de tempo para o atendimento dos consumidores;
- Problema de Coleta e Entrega (PCE), já explicado anteriormente.

Já Gendreau & Potvin (1998) apresentam duas possibilidades de classificação dos problemas que envolvem roteamento de veículos:

- Problemas de despacho de veículos quanto à necessidade de roteamento e abrangência da área de cobertura do serviço;
- Problemas de Roteamento quanto à restrição de capacidade de carga e o número de pontos de coleta e entrega de encomendas.

Apesar da similaridade entre os vários modelos encontrados para os diversos tipos de problemas de roteamento, esses devem ser tratados de forma específica, a fim de se obter resultados mais prósperos com custo operacional baixo.

O avanço tecnológico vem exigindo das empresas uma ampla revisão de seus modelos de distribuição, onde esse avanço permite explorar novas informações durante a operação dos veículos. Dessa forma, novos cenários para os diversos problemas deixam de estar inseridos em um contexto estático e passam a ser tratados em um contexto dinâmico.

2.1.1. VARIAÇÕES ESTÁTICAS

Segundo Alvarenga (2005) um problema de roteamento é considerado estático quando:

- Assume-se que todas as informações relevantes são conhecidas antes do início do processo de roteamento.
- Não há alteração das informações depois de iniciado o processo de roteamento.

Dessa forma, os problemas estáticos devem possuir todos os dados referentes ao roteamento antes de iniciar a otimização, podendo assim processar tais informações no tempo ocioso dos veículos.

O PRVJT e Problema de Roteamento de Veículos com Coleta e Entrega Simultâneas são conhecidos como problemas de roteamento de veículos estáticos.

2.1.2. VARIAÇÕES DINÂMICAS E ESTOCÁSTICAS

Alvarenga (2005) define que um problema de roteamento é dinâmico quando:

- Assume-se que não são conhecidas todas as informações relevantes antes do início do processo de roteamento.
- As informações, após o início do processo de roteamento, podem sofrer alterações.

Já a variação estocástica considera que as variáveis do problema, como mudança de demanda, novos pedidos, seguem uma distribuição probabilística.

Alguns problemas dinâmicos e estocásticos podem ser transformados em uma série de problemas estáticos, porém devido à necessidade de soluções em tempo real, o processamento e qualquer modificação devem ser feito antes e durante a utilização dos veículos.

2.2. PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS COM JANELA DE TEMPO (PRVJT)

O tema central deste trabalho é a minimização da distância total percorrida no Problema de Roteamento de Veículos com Janela de Tempo (PRVJT). O PRVJT é um problema estático, pois todas as variáveis do problema são conhecidas previamente. Mas devido aos diversos tipos de classificações encontradas, este tem classificações diferentes de acordo com cada autor:

- Savelsbergh & Sol (1995), diz que o PRVJT é uma generalização do PRV;
- Xu, et. al. (2003), define o PRVJT como um dos três casos classificados por ele;
- Gendreau & Potvin (1998), aborda o problema de roteamento como área restrita;
- Gendreau & Potvin (1998), aborda o problema de transporte de muitos para muitos consumidores e com capacidade limitada.

Entretanto as suas características são as mesmas, a frota de veículos deve visitar um determinado grupo de consumidores, sendo que as rotas são iniciadas e terminadas em um único depósito central. Para cada rota entre um veículo e um consumidor existe um custo associado.

Cada veículo utilizado nas rotas de uma solução possui um limite relacionado as mercadorias que consegue transportar, além de atender a um consumidor apenas uma vez. A restrição quanto à capacidade de um veículo denota a possibilidade de atendimento do mesmo a um consumidor na rota, visto que cada cliente também possui sua demanda específica.

Enquanto a janela de tempo do problema descreve que cada consumidor i possui uma janela de atendimento $[a_i, b_i]$, sendo a_i o horário de abertura da janela e b_i o horário de fechamento. Caso um veículo chegue antes do horário descrito como abertura da janela de tempo, o mesmo deve aguardar a sua abertura. Não é permitida a chegada de veículos após o fechamento da janela de tempo no consumidor i .

Todo consumidor tem um tempo de serviço, que somente depois de transcorrido o veículo poderá partir para o próximo consumidor em sua rota planejada.

Todos os veículos devem partir do depósito central, atender os consumidores e retornar ao depósito central antes do encerramento de sua janela de tempo.

3. MODELO MATEMÁTICO

“A importância e influência do modo de formular um problema de otimização, especialmente em áreas complexas como as de roteamento devem ser bem entendidas. O motivo é evidente: a formulação terá impacto direto no desempenho dos algoritmos de solução.” (Goldberg & Luna, 2000).

Larsen (1999) formulou o PRVJT da seguinte forma:

- $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ → conjunto de m veículos idênticos;
- $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ → conjunto de n consumidores;
- $N = C \cup \{c_0, c_{n+1}\}$ → conjunto de consumidores e o depósito central. Para fins de simplificação das restrições do modelo, o depósito central é representado por c_0 e c_{n+1} ;
- d_{ij} → distância para ir do consumidor i até o j ;
- t_{ij} → tempo para ir do consumidor i até o j ;
- q → capacidade máxima de carga dos veículos;
- w_i → demanda associada ao consumidor i ;
- p_i → tempo de serviço no consumidor i ;
- $[a_i, b_i]$ → janela de tempo do consumidor i ;
- a_i → início da coleta ou entrega no consumidor i ;
- b_i → fim da coleta ou entrega no consumidor i ;
- x_{ijv} → determina se o veículo v faz o percurso do consumidor i para o consumidor j , recebendo o valor 1, se verdadeiro, e 0 em caso contrário.
- s_{iv} → instante de tempo em que o veículo v a um consumidor i .
- K → constante de ativação da equação (valor escalar suficientemente grande).

A forma matemática é definida a seguir:

$$\min \sum_{v \in V} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} d_{ij} x_{ijv} \quad \text{sujeito a} \quad (1)$$

$$\sum_{v \in V} \sum_{j \in N} x_{ijv} = 1 \quad \forall i \in C \quad (2)$$

$$\sum_{i \in N} w_i \sum_{j \in N} x_{ijv} \leq q \quad \forall v \in V \quad (3)$$

$$\sum_{j \in N} x_{0jv} = 1 \quad \forall v \in V \quad (4)$$

$$\sum_{i \in N} x_{i(n+1)v} = 1 \quad \forall v \in V \quad (5)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ihv} - \sum_{j \in N} x_{h jv} = 0 \quad \forall h \in C; \forall v \in V \quad (6)$$

$$s_{iv} + p_i + t_{ij} - K(1 - x_{ijv}) \leq s_{jv} \quad \forall i, j \in N; \forall v \in V \quad (7)$$

$$a_i \leq s_{iv} \leq b_i \quad \forall i \in N; \forall v \in V \quad (8)$$

$$x_{ijv} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in N; \forall v \in V \quad (9)$$

A Equação (1) representa a minimização da distância total utilizando todos os veículos e passando por todos os consumidores. Cada consumidor i é visitado somente por um veículo v (Eq. (2)), e esse veículo v não deve ultrapassar a sua capacidade total q (Eq. (3)). As Equações (4) e (5) mostram que todos os veículos devem partir e retornar ao depósito central. A Equação (6) representa a continuidade das rotas, um veículo deve partir de um consumidor para outro. Já a Equação (7) define que a chegada de um veículo v no consumidor j (s_{jv}) não pode acontecer antes do tempo de chegada no consumidor i (s_{iv}), mais o tempo de serviço (p_i), mais o tempo para viajar entre os consumidores i e j (t_{ij}). Um veículo v deve atender ao consumidor i dentro da janela de tempo (Eq. (8)). E a Equação (9) garante a integralidade das variáveis do problema.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A base deste trabalho é encontrada em outras pesquisas apresentadas na literatura. O conhecimento destas fontes de consulta proporciona um maior entendimento dos métodos com os quais se podem trabalhar e também dos rumos promissores a seguir. A publicação de Solomon (1987) é de fundamental importância para as pesquisas sobre roteamento de veículos, pois é proposto o algoritmo “*Push-Forward Insertion Heuristic*” (PFIH) e também as classes de instâncias nas quais as pesquisas atuais se baseiam para publicar seus resultados. Outra pesquisa que exerce bastante influência quanto aos métodos empregados neste trabalho é a proposta de Feo & Resende (1989), onde é apresentado a meta-heurística intitulada GRASP que serve de base para o meta-modelo proposto neste artigo.

Segundo Leong & Liu (2006), muitos algoritmos resolvem o PRVJT em dois estágios distintos, onde, primeiro se encontra uma solução inicial, e depois, se aplica um algoritmo de refinamento. Comumente, o PFIH é encontrado na literatura como o primeiro estágio desta busca por soluções no PRVJT, independente de qual seja o método de refinamento, que geralmente é composto de uma ou mais metas-heurísticas. Uma característica importante dos rumos tomados por publicações que visam estabelecer novas soluções para o PRVJT é a implementação de operadores de vizinhança utilizados na etapa de Busca Local. Estes operadores são utilizados por Alvarenga, Mateus, & Tomi (2007), e sua aplicação em conjunto com os outros métodos de otimização alcançaram resultados significativos.

Há trabalhos que utilizam de sistemas híbridos como parte de sua estrutura, como é o caso de Backer & Furnon (1997) propuzeram uma Busca Local em Programação por Restrições com uma implementação de Busca Tabu, onde é necessário identificar as variáveis de decisão de um determinado problema.

Jung & Moon (2002) implementaram um algoritmo híbrido genético, onde é investigado o impacto do uso explícito do conhecimento do domínio e conhecimento das características sobre

as soluções esperadas durante as fases de recombinação e mutação do algoritmo.

Alvarenga & Mateus (2004) e Alvarenga (2005) desenvolveram uma estratégia híbrida, o qual faz uso do algoritmo genético e de programação linear inteira (GLPK) para resolver o Problema de Particionamento de Conjuntos (PPC).

Fraga (2006) desenvolveu uma metodologia híbrida (Ant-TPR) que combina o uso das metaheurísticas Colônia de Formigas e Busca Tabu à técnica de intensificação de resultados Reconexão por Caminhos.

Oliveira, et. al. (2007) e Oliveira, Cunha, & Mateus (2008) adaptaram o “*Simulated Annealing*” para gerar heurísticamente colunas para o modelo matemático do PPC.

López-Ibáñez & Blum (2010) propõem um algoritmo Beam-ACO, que é uma combinação híbrida do método de otimização de colônia de formigas com pesquisa Beam. Foram realizados experimentos para estudar a contribuição com e sem busca local.

Independentemente da proposta adotada para a resolução do problema, todas elas tem sua parcela de contribuição para o desenvolvimento da Pesquisa Operacional sendo que cada uma melhor se adéqua a cada tipo de problema. Assim, cada pesquisador deve buscar, modificar e/ou criar métodos que melhor se adaptem ao escopo de seu projeto.

5. ARQUITETURA E ALGORITMOS

Este trabalho implementa um algoritmo híbrido que é uma combinação de heurísticas (PFIH e GRASP) e a resolução PRVJT através de um modelo matemático para o Problema de Particionamento de Conjuntos (PPC) fazendo uso do *software* CPLEX®.

5.1. SISTEMA HÍBRIDO

O sistema proposto tem como base a heurística GRASP (seção 5.1.2), com a diferença que, as demais heurísticas utilizadas fazem parte de um laço de repetição. Primeiramente é utilizada uma adequação do algoritmo PFIH para geração de uma solução inicial aleatória para o problema (seção 5.1.1). Após isso, é utilizada a busca local (seção 5.1.1.1) por meio de operadores de vizinhança (SWAP, INSERTION, SCRAMBLE, INVERTION e OP5), a fim de encontrar uma solução de melhor qualidade, que é armazenada, somente se esta for melhor que a solução inicial (minimizar a distância). Este processo tem a finalidade de criar uma base inicial diversificada.

Posteriormente, todas as rotas das soluções armazenadas são utilizadas para resolver o PRVJT através do modelo de particionamento de conjuntos (seção 5.1.3), o qual trata maneiras efetivas de combinar diferentes rotas para gerar uma solução, que apresenta resultado igual ou superior à melhor solução até então encontrada.

Em seguida, inicia-se o processo anterior novamente, porém as soluções iniciais não são mais geradas aleatoriamente, mas sim utilizando as soluções armazenadas, garantindo a continuidade da obtenção de melhores soluções. Ao final, é executado mais uma vez a busca local com a melhor solução encontrada e por fim retorna-se a solução com o número de veículos e a distância total percorrida.

5.1.1. SOLUÇÕES INICIAIS

O PFIH é um algoritmo proposto por Solomon (1987), que consiste na organização dos consumidores dispostos em cada uma das instâncias a serem trabalhadas. Esta organização se dá através da ordenação dos clientes de acordo com uma fórmula de custo (Eq. (10)).

$$C_i = -\alpha \cdot d_{0i} + \beta \cdot b_i + \gamma \cdot \left[\left(\frac{p_i}{360} \right) \cdot d_{0i} \right] \quad (10)$$

$$\alpha = 0,7 \quad \beta = 0,1 \quad \gamma = 0,2$$

d_{0i} → distância do depósito central (0) ao consumidor i ;

b_i → limite superior da janela de tempo de chegada ao consumidor i ;

p_i → ângulo da coordenada referente ao consumidor i .

Na fórmula de custo são encontradas variáveis que denotam sua característica de

viabilização de soluções aproximadas da realidade das distribuições logísticas. Os valores para α , β e γ são mostrados em Solomon (1987) mapeados empiricamente.

O PFIH é um algoritmo determinístico, cuja aplicação apresenta sempre soluções idênticas. Esta característica desperta outra possibilidade de implementação. O PFIH pode ser construído trocando a fórmula de custo por inserções de formas dinâmicas.

Assim, a ordenação dos consumidores se dá de forma aleatória, como apresentado em Alvarenga (2005). Após ordenação dos consumidores pelo algoritmo PFIH acontece a inserção dos mesmos em rotas válidas (Fig. 1), para que assim se inicie a busca por uma solução otimizada para o problema. Cada rota válida respeita as restrições de janela de tempo e capacidade do veículo que transporta a carga, seguindo as características do PRVJT.



Fig. 1 – Solução antes da inserção do novo consumidor C5.
Fonte: (Oliveira, 2007)

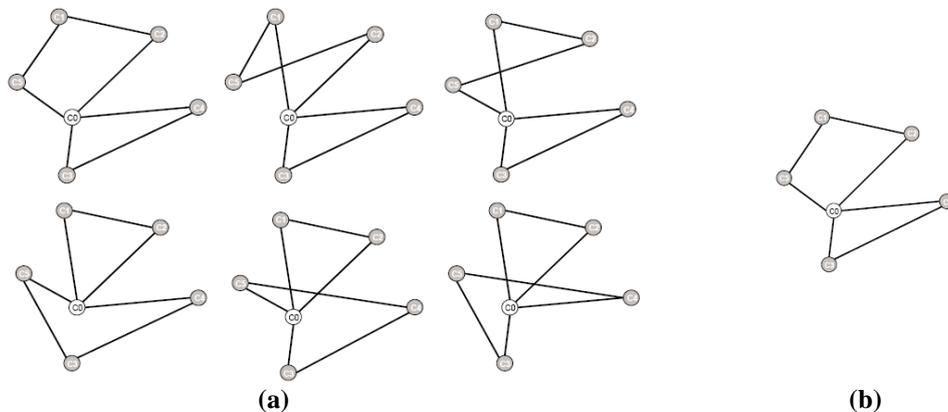


Fig. 2 – Soluções viáveis (a) e a melhor solução (b) utilizando o PFIH.
Fonte: (Oliveira, 2007)

Caso aconteça de uma inserção violar as regras do problema, deve-se criar uma nova rota para que este consumidor seja atendido e, continuar este procedimento até que todos os consumidores presentes na instância sejam atendidos. Além disso, a inserção (consumidor em evidência) é testada entre todos os consumidores já inseridos nas rotas (Fig. 2.a), sendo aceita a solução de menor perturbação no valor da distância das rotas (Fig. 2.b).

Com essa característica de implementação, o uso do PFIH fica restrito apenas ao atendimento de restrições e inserção inicial de consumidores nas rotas, garantindo a validação das primeiras soluções geradas.

5.1.1.1. BUSCA LOCAL

O emprego de operadores de vizinhança possui grande poder quanto à otimização dos valores finais das soluções do PRVJT. Isto se dá, uma vez que estes são construções combinatórias que elegem conjuntos de rotas mais prósperas e as insere em uma solução viável. Estes operadores trabalham de forma a selecionar uma rota ou um conjunto aleatório das mesmas para que se obtenha um número maior de rotas viáveis nas soluções obtidas.

Neste trabalho são utilizados cinco operadores para busca local em vizinhança, sendo

quatro deles já amplamente conhecidos na literatura (SWAP, SCRAMBLE, INVERTION e INSERTION), o quinto operador (OP5), uma nova implementação proposta por Oliveira, et. al. (2006), trata explicitamente parâmetros pesquisados na melhoria de problemas de roteamento de veículos (distância total percorrida na solução).

O primeiro e mais simples operador utilizado é o operador SWAP (Fig. 3), segundo Eiben & Smith (2010) possui sua definição como uma forma de resolução do Problema do Caixeiro Viajante (PCV), ou “*Traveling Salesman Problem*” (TSP). É obtido através de troca de 2 consumidores (c_1, c_2) de quaisquer rotas (r_1, r_2).



Fig. 3 – Operador SWAP.
Fonte: (Oliveira, 2007)

Outra operação baseada em mudanças aleatórias é encontrada no operador INSERTION (Fig. 4). É obtido retirando um consumidor de qualquer rota de y e o reinserindo-o em qualquer posição de qualquer rota de y .



Fig. 4 – Operador INSERTION.
Fonte: (Oliveira, 2007)

O operador SCRAMBLE (Fig. 5) é obtido escolhendo uma seqüência contínua q qualquer de consumidores em uma rota r escolhida aleatoriamente de y e posteriormente embaralhando os consumidores da seqüência n gerando a seqüência q' que substituirá q em r .

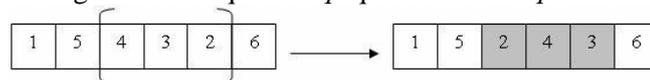


Fig. 5 – Operador SCRAMBLE.
Fonte: (Oliveira, 2007)

O quarto Operador denominado INVERTION (Fig. 6), é obtido escolhendo uma seqüência s qualquer de consumidores em uma rota r escolhida aleatoriamente de y e, posteriormente os inverte sistematicamente gerando uma nova seqüência s' que substituirá s em r .



Fig. 6 – Operador INVERTION.
Fonte: (Oliveira, 2007)

O quinto Operador, OP5, atua de forma heurística, possuindo complexidade $O(n^3)$. No início da execução do OP5, m consumidores são retirados de cada rota da solução y , sendo o valor de m diferente em cada rota r seguindo o critério de aleatoriedade. Após isso, é gerada uma nova solução ainda inválida h que recebe os consumidores retirados de y seguindo o método PFIH até que se forme uma solução completa para o PRVJT. Por implementar o método PFIH o quinto operador mantém uma grande vantagem quanto aos outros quatro, uma vez que não há necessidade de verificar a quebra de restrições (pois o PFIH gera apenas rotas válidas para o PRVJT) e, por seus mecanismos heurísticos de escolha da melhor posição de inserção do consumidor em h , o OP5 permite a otimização quanto ao tempo de busca no PRVJT.

5.1.2. GRASP

O algoritmo iterativo proposto por Feo & Resende (1989) intitulado GRASP, é uma meta-heurística onde cada iteração é composta por duas partes.

Neste trabalho, inicialmente é construída uma solução viável através do PFIH para o problema proposto, em seguida, se inicia a fase de busca local, que tem por objetivo melhorar a

solução gerada inicialmente. Cada iteração do GRASP acontece de forma independente, uma vez que nenhuma execução da meta-heurística leva em conta informações das iterações anteriores. Com esta característica o critério de parada do GRASP é implementado estabelecendo-se o número máximo de iterações do algoritmo. Ao fim de suas iterações, o GRASP apresenta a melhor solução obtida em relação a todas as execuções aplicadas.

A fase de busca local direciona a solução à melhoria dos resultados obtidos na fase de construção do GRASP. Nesta fase, percorre-se a vizinhança no espaço de busca da solução corrente a fim de se obter resultados de melhor qualidade. Em problemas onde o objetivo é a minimização de uma função f , entende-se que uma solução t é melhor que uma y gerada anteriormente se $f(t) < f(y)$. Se não existir uma melhor solução na vizinhança, a atual é considerada um ótimo local.

5.1.3. PROBLEMA DE PARTICIONAMENTO DE CONJUNTOS (PPC)

Vários problemas em otimização combinatória podem ser descritos como um Problema de Particionamento de Conjunto (PPC). Para o PRVJT, cada coluna gerada corresponde a uma rota viável candidata a pertencer à solução do problema. As linhas obtidas correspondem aos consumidores que deverão ser atendidos por uma única rota.

$$\min \sum_{r \in R} c_r x_r \quad \text{sujeito a} \quad (11)$$

$$\sum_{r \in R} \alpha_{ir} x_r = 1 \quad \forall i \in C \quad (12)$$

$$x_r \in (0, 1) \quad \forall r \in R \quad (13)$$

A Equação (11) corresponde à função objetivo do PPC. O conjunto R representa todas as rotas possíveis para o problema. A cada rota r existe um custo associado, c_r . O objetivo do problema consiste em encontrar o conjunto de rotas de menor custo sujeito às restrições do problema (no PRVJT, restrições de capacidade e janela de tempo).

A Equação (12) (restrição do PPC) assegura que cada consumidor será atendido por uma única rota uma única vez.

Conforme a Equação (13) (restrição do PPC), a variável de decisão x_r é binária, sendo igual a 1 (um) se a rota r fizer parte da solução e 0 (zero) caso contrário. O parâmetro α_{ir} é igual a 1 (um) se o consumidor i é atendido pela rota r e 0 (zero) caso contrário.

Assim, todas as rotas geradas ao longo da execução do algoritmo são armazenadas, para posteriormente servirem de entradas ao PPC. Através da modelagem proposta do PPC para o PRVJT são feitas combinações de diversas rotas para gerar uma solução válida ao problema, no qual o resultado final é igual ou superior à melhor solução até então encontrada.

5.2. META-HEURÍSTICA APLICADA AO PRVJT

Para a elaboração do sistema apresentado no decorrer deste trabalho, foi criado um meta-modelo baseado nas iterações da meta-heurística GRASP. Esse novo meta-modelo utiliza um método de geração heurística de colunas para a resolução do PRVJT juntamente com execuções do GRASP. Essa característica evidencia um paralelismo de execuções, garantindo o desenvolvimento evolutivo deste meta-modelo.

Esta adaptação possui sua principal diferença quanto ao uso padrão do GRASP no armazenamento de suas soluções, para que estas possam ser utilizadas em novas buscas. Isso também possibilita a ocorrência da adição de um novo ciclo de iterações no meta-modelo adaptado. Assim, a adaptação promove a ordenação dos métodos heurísticos empregados no sistema proposto. Outra característica do meta-modelo é a capacidade dos parâmetros do sistema serem calibrados de acordo com as necessidades de utilização.

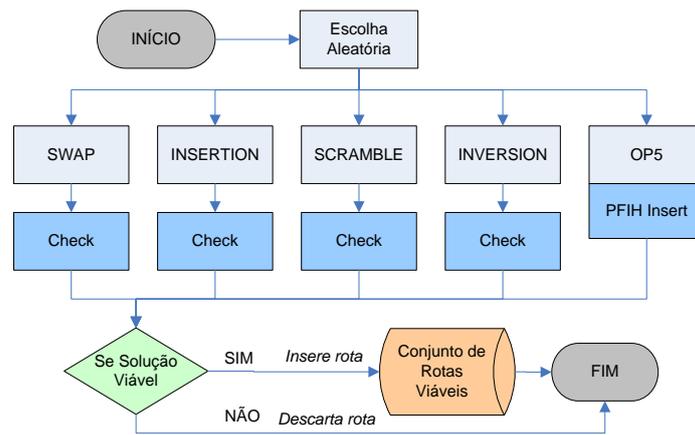


Fig. 7 – Busca Local.

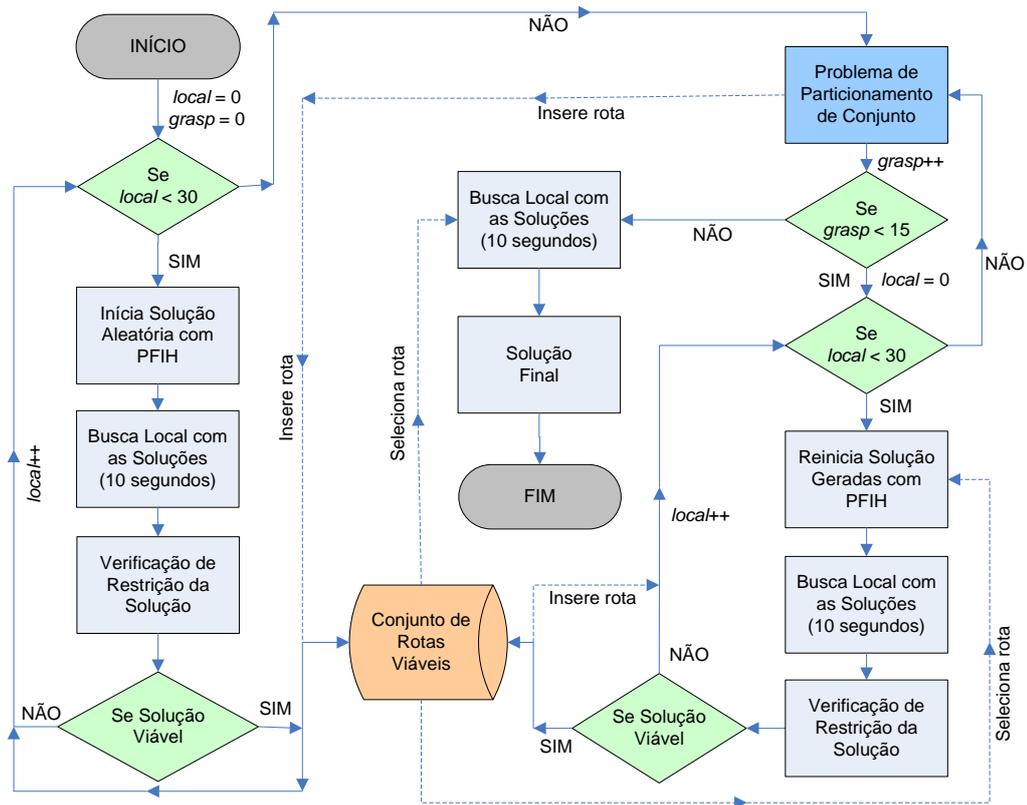


Fig. 8 – GRASP Evolutivo.

Assim, a adaptação do GRASP desenvolvida para resolução do PRVJT possui grande dinamicidade, pois trabalha com a combinação das técnicas do Modelo de Particionamento de Conjuntos junto com a Busca Local, que modifica as rotas utilizando os operadores de vizinhança a fim de melhorar as soluções já encontradas (Fig. 7).

O funcionamento do sistema proposto pode ser observado na Fig. 8. Neste fluxograma são descritas duas variáveis empíricas, *local* e *grasp*, representando respectivamente número de iterações da busca local e número de execuções da meta-heurística GRASP.

6. EXPERIMENTOS

Por existir uma grande quantidade de publicações que utilizam heurísticas e meta-heurísticas na resolução do PRVJT e a fim de buscar uma maior qualidade nos resultados, utiliza-

se o padrão de testes adotado pela maioria dos autores, as instâncias de Solomon (1987), possibilitando assim um maior número de comparação e análise dos resultados obtidos.

O método de comparação deste trabalho se dá pela verificação dos valores de distância total percorrida nas soluções geradas para cada uma das instâncias. A comparação realizada evidência a soma dos valores do total das instâncias, e também os valores isolados considerados parâmetros atrativos para medida de qualidade.

6.1. BASE DE DADOS – INSTÂNCIAS DE SOLOMON

Para os testes foram utilizadas 56 instâncias de Solomon (1987), possuindo 100 consumidores cada e um depósito central, onde cada uma das rotas se inicia e termina. As instâncias possuem informações do posicionamento geográfico dos consumidores (coordenadas euclidianas X e Y), de demanda, janela de tempo e tempo de serviço de cada consumidor, além de também fornecer o número máximo de veículos e a capacidade de cada um deles.

As instâncias são organizadas em três grupos com características comuns, sendo que cada grupo contém dois subgrupos cada. As instâncias são dos tipos C (Clusterizadas), R (Randomizadas) e RC (união das características de R e C). As instâncias C apresentam os consumidores organizados de forma aglomerada, as do tipo R os consumidores são dispostos aleatoriamente no espaço do problema, enquanto no terceiro grupo são encontrados consumidores aglomerados e dispersos aleatoriamente. Uma melhor visualização da distribuição dos consumidores (coordenadas euclidianas) pode ser vista na Fig. 9, onde o ponto em vermelho é o depósito central e os em azul os consumidores.

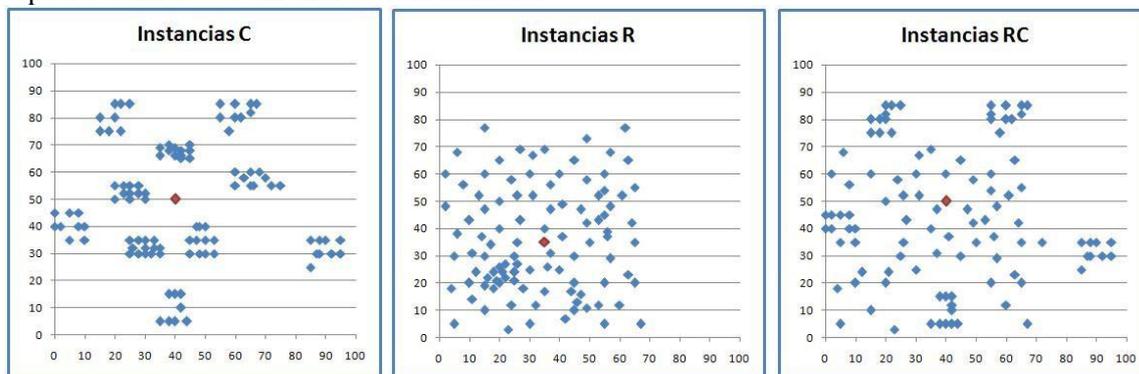


Fig. 9 – Disposição dos consumidores nos três grupos de instâncias de Solomon (1987).

Os subgrupos são C1, C2, R1, R2, RC1 e RC2 sendo os tipos C1, R1 e RC1 instâncias que os consumidores possuem altas demandas de carga necessitando de um número maior de veículos para atender toda a demanda. Já os tipos C2, R2 e RC2 apresentam na solução poucos veículos, uma vez que os consumidores necessitam de pouca carga. A descrição dos arquivos e o código destes podem ser encontrados no site: <http://w.cba.neu.edu/~msolomon/problems.htm>.

7. ANÁLISE COMPARATIVA

Para uma melhor compreensão do sistema gerado são apresentados os melhores resultados obtidos, juntamente com a média da distância total e o desvio padrão de cada instância, além de apresentar a melhor distância percorrida por outros trabalhos para cada instância. Assim, através das Tabela 1 a Tabela 6 são mostrados os valores obtidos para cada uma das 56 instâncias.

Os valores que superaram os trabalhos comparados em relação à distância apresentam a marca **. Os que igualaram possuem a marca *.

PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

Tabela 1 – Melhores Resultados para a classe C1 das instâncias de Solomon.

Instância	Melhores Trabalhos Publicados		Este Trabalho		
	Distância	Trabalhos	Distância	Média	D. Padrão
* C101	828,94	(Rochat & Taillard, 1995)	828,94	828,94	0,00
* C102	828,94	(Rochat & Taillard, 1995)	828,94	828,94	0,00
* C103	828,06	(Rochat & Taillard, 1995)	828,06	828,06	0,00
* C104	824,78	(Rochat & Taillard, 1995)	824,78	824,78	0,00
* C105	828,94	(Rochat & Taillard, 1995)	828,94	828,94	0,00
* C106	828,94	(Rochat & Taillard, 1995)	828,94	828,94	0,00
* C107	828,94	(Rochat & Taillard, 1995)	828,94	828,94	0,00
* C108	828,94	(Rochat & Taillard, 1995)	828,94	828,94	0,00
* C109	828,94	(Rochat & Taillard, 1995)	828,94	828,94	0,00
* Total	7.455,42		7.455,42		

Tabela 2 - Melhores Resultados para a classe C2 das instâncias de Solomon.

Instância	Melhores Trabalhos Publicados		Este Trabalho		
	Distância	Trabalhos	Distância	Média	D. Padrão
* C201	591,56	(Rochat & Taillard, 1995)	591,56	591,56	0,00
* C202	591,56	(Rochat & Taillard, 1995)	591,56	591,56	0,00
* C203	591,17	(Rochat & Taillard, 1995)	591,17	591,17	0,00
* C204	590,60	(Rochat & Taillard, 1995)	590,60	590,60	0,00
* C205	588,88	(Rochat & Taillard, 1995)	588,88	588,88	0,00
* C206	588,49	(Rochat & Taillard, 1995)	588,49	588,49	0,00
* C207	588,29	(Rochat & Taillard, 1995)	588,29	588,29	0,00
* C208	588,32	(Rochat & Taillard, 1995)	588,32	588,32	0,00
* Total	4.718,87		4.718,87		

Tabela 3 - Melhores Resultados para a classe R1 das instâncias de Solomon.

Instância	Melhores Trabalhos Publicados		Este Trabalho		
	Distância	Trabalhos	Distância	Média	D. Padrão
* R101	1.642,88	(Alvarenga & Mateus, 2004)	1.642,88	1.642,88	0,00
R102	1.472,62	(Alvarenga & Mateus, 2004)	1.472,81	1.472,81	0,00
* R103	1.213,62	(Rochat & Taillard, 1995)	1.213,62	1.213,66	0,05
** R104	976,61	(Jung & Moon, 2002)	976,60	976,61	0,00
* R105	1.360,78	(Jung & Moon, 2002)	1.360,78	1.360,78	0,00
* R106	1.239,37	(Oliveira, Cunha, & Mateus, 2008)	1.239,37	1.239,67	0,40
R107	1.073,34	(Jung & Moon, 2002)	1.074,41	1.075,95	1,13
** R108	948,57	(Alvarenga, 2005)	938,88	943,90	4,05
* R109	1.151,84	(Jung & Moon, 2002)	1.151,84	1.152,11	0,27
R110	1.072,41	(Jung & Moon, 2002)	1.073,46	1.078,16	5,03
* R111	1.053,50	(Jung & Moon, 2002)	1.053,50	1.054,03	0,53
R112	953,63	(Rochat & Taillard, 1995)	955,97	967,19	10,25
** Total	14.159,17		14.154,12		

PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

Tabela 4 - Melhores Resultados para a classe R2 das instâncias de Solomon.

Instância	Melhores Trabalhos Publicados		Este Trabalho		
	Distância	Trabalhos	Distância	Média	D. Padrão
* R201	1.147,80	(Oliveira, et. al., 2007)	1.147,80	1.149,84	2,00
R202	1.034,35	(Jung & Moon, 2002)	1.040,12	1.041,24	0,56
R203	874,87	(Oliveira, et. al., 2007)	880,50	883,25	3,23
R204	735,80	(Oliveira, et. al., 2007)	736,59	738,06	0,74
R205	954,16	(Oliveira, et. al., 2007)	956,08	961,60	3,69
R206	879,89	(Jung & Moon, 2002)	884,85	887,47	1,43
R207	797,99	(Oliveira, et. al., 2007)	800,79	807,13	9,51
R208	705,45	(Jung & Moon, 2002)	706,74	715,00	5,42
R209	859,39	(Jung & Moon, 2002)	860,11	872,25	11,95
R210	910,70	(Jung & Moon, 2002)	912,53	922,48	5,14
R211	755,82	(Oliveira, et. al., 2007)	755,84	762,27	6,39
Total	9.656,22		9.681,95		

Tabela 5 - Melhores Resultados para a classe RC1 das instâncias de Solomon.

Instância	Melhores Trabalhos Publicados		Este Trabalho		
	Distância	Trabalhos	Distância	Média	D. Padrão
* RC101	1.623,58	(Rochat & Taillard, 1995)	1.623,58	1.623,58	0,00
* RC102	1.461,23	(Jung & Moon, 2002)	1.461,23	1.461,40	0,25
* RC103	1.261,67	(Shaw, 1998)	1.261,67	1.262,49	0,72
RC104	1.135,48	(Cordeau, Laporte, & Mercier, 2001)	1.137,37	1.141,53	4,97
* RC105	1.518,58	(Jung & Moon, 2002)	1.518,58	1.518,63	0,06
** RC106	1.377,35	(Alvarenga & Mateus, 2004)	1.376,99	1.384,58	6,70
* RC107	1.212,83	(Jung & Moon, 2002)	1.212,83	1.215,20	2,31
RC108	1.117,53	(Jung & Moon, 2002)	1.123,26	1.136,69	10,00
Total	10.708,25		10.715,51		

Tabela 6 - Melhores Resultados para a classe RC2 das instâncias de Solomon.

Instância	Melhores Trabalhos Publicados		Este Trabalho		
	Distância	Trabalhos	Distância	Média	D. Padrão
* RC201	1.265,56	(Jung & Moon, 2002)	1.265,56	1.267,38	1,82
RC202	1.095,64	(Jung & Moon, 2002)	1.098,15	1.102,66	5,88
* RC203	926,82	(Oliveira, Cunha, & Mateus, 2008)	926,82	933,32	8,35
* RC204	786,38	(Jung & Moon, 2002)	786,38	789,32	2,94
* RC205	1.157,55	(Jung & Moon, 2002)	1.157,55	1.157,61	0,06
RC206	1.054,61	(Jung & Moon, 2002)	1.064,20	1.081,31	10,08
RC207	966,08	(Jung & Moon, 2002)	970,78	982,83	12,54
* RC208	778,93	(Oliveira, et. al., 2007)	778,93	789,35	5,21
Total	8.031,57		8.048,37		

De forma geral, as 56 instâncias trabalhadas, 18 instâncias (32,15%) não superaram os melhores resultados conhecidos na literatura, 35 instâncias (62,50%) se igualaram aos melhores valores conhecidos e 3 instâncias (5,35%) alcançaram valores melhores que os já conhecidos, sendo estas as instâncias R104, R108 e RC106.

Também se pode observar (Fig. 10) o valor acumulado da distância total, que é a soma dos melhores resultados obtidos nos testes feitos sobre as 56 instâncias. Este resultado demonstra a eficiência do sistema e sua capacidade de otimização. Neste quesito obtivemos o valor total de 54.774,00 unidades na minimização da distância total, com uma diferença de 5,00 u.d. (54.779,00 u.d.) Jung & Moon (2002), e de 69,00 (54.843,00 u.d.) Oliveira, Cunha, & Mateus (2008).



Fig. 10 – Distância total acumulada.

Por fim, o tempo médio de execução do sistema variou de 1800 segundos (30 minutos) a 3600 segundos (60 minutos), tendo o tempo médio de 3000 segundos (50 minutos). Isto se deve ao tratamento do PPC, que pode encontrar no espaço de busca uma solução viável antes do tempo máximo pré-definido (Fig. 11).

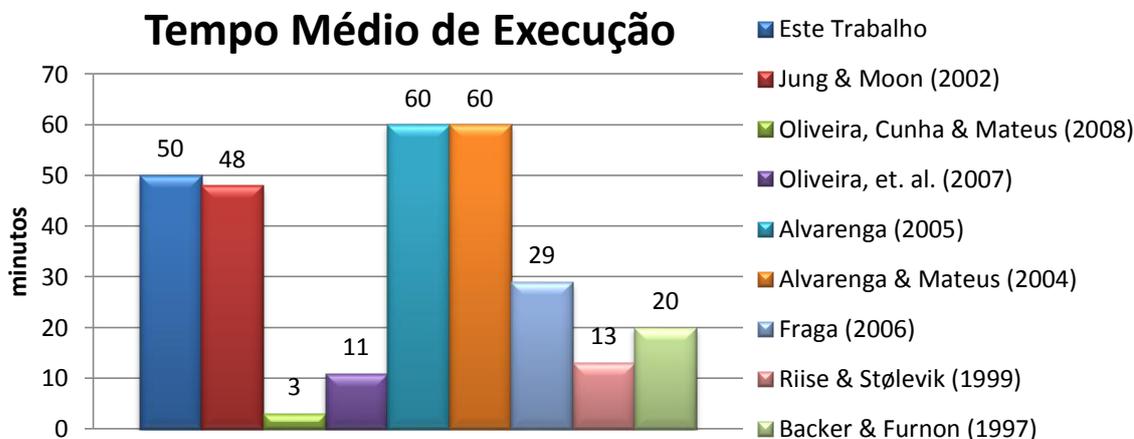


Fig. 11 – Tempo médio de execução para cada instância.

Devido à complexidade do problema, o sistema final necessita de um demasiado valor de tempo para a apresentação de uma solução para o PRVJT. Mas esta característica é aceitável visto que o sistema proposto trabalha sobre um ambiente estático que não apresenta a necessidade de respostas em um espaço de tempo pequeno.

Tabela 7 - Processadores e linguagem de programação.

Trabalhos	Processadores	Linguagem
Este Trabalho	Core2 Quad de 2.5 GHz	Java 6.0
Jung & Moon (2002)	Pentium III de 1.0 GHz	C++
Oliveira, Cunha & Mateus (2008)	Pentium M de 1.7 GHz	Java
Oliveira, et al. (2007)	Pentium M de 1.7 GHz	Java
Alvarenga (2005)	Pentium IV de 2.4 GHz	Delphi
Alvarenga & Mateus (2004)	Pentium IV de 2.4 GHz	Delphi
Fraga (2006)	Pentium IV de 2.4 GHz	C++
Riise & Stølevik (1999)	Pentium I de 200 MHz	(não consta)
Backer & Furnon (1997)	PowerPC de 133 MHz	C++

Para os testes foram realizados experimentos utilizando as máquinas do Laboratório de Pesquisa Operacional (LaPO) da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Para cada uma das 56 instâncias de Solomon (1987) foram testados 6 vezes cada conjunto de experimentos. A máquina utilizada possui Sistema Operacional Linux, com 4Gb de RAM e processador Intel Core2 Quad de 2.5 GHz, a Tabela 7 apresenta os processadores utilizados e a linguagem de programação utilizada nos principais trabalhos.

8. DISCUSSÃO

Em vista da complexidade do Problema de Roteamento de Veículos com Janela de Tempo (PRVJT), ou seja, atender todos os consumidores de forma a minimizar as rotas utilizadas, foram combinadas diferentes meta-heurísticas a fim de obter melhores resultados.

Para comparação entre diferentes trabalhos na literatura foram utilizadas as instâncias de Solomon, devido a sua ampla utilização e instâncias heterogêneas, o qual tornou-se possível criar um *benchmarking* destes. Analisando os resultados das 56 instâncias foi possível averiguar a marca de 54.774,00 unidades na minimização da distância total, onde 18 instâncias (35,15%) não superaram os melhores resultados conhecidos na literatura, 35 instâncias (62,50%) se igualaram aos melhores valores conhecidos e 3 instâncias (5,35%) superaram os melhores resultados conhecidos na literatura.

Em suma, a maior colaboração deste trabalho foi a obtenção de resultados mais prósperos que os conhecidos atualmente e a combinação da meta-heurística GRASP com resolução do PRVJT através do Modelo de Particionamento de Conjuntos. Ao GRASP foi adicionada uma nova iteração na seqüência de execução. Assim, a cada nova iteração do GRASP, este tem condições de escapar de ótimos locais e buscar novos resultados em espaços de buscas diferentes, além de gerar rotas que serão utilizadas no PPC.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARENGA, G. B. (2005). Um algoritmo híbrido para os problemas de roteamento de veículos estático e dinâmico com janela de tempo. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Departamento de Ciência da Computação (DCC). Belo Horizonte: Biblioteca Digital da Universidade Federal de Minas Gerais.

ALVARENGA, G. B., & MATEUS, G. R. (DEZEMBRO DE 2004). A two-phase genetic and set partitioning approach for the vehicle routing problem with time windows. Fourth International Conference on Hybrid Intelligent Systems (HIS '04). DOI: 10.1109/ICHIS.2004.13, pp. 428-433. ed. IEEE (ISBN: 0-7695-2291-2).

ALVARENGA, G. B., MATEUS, G. R., & TOMI, G. D. (2007). A genetic and set partitioning two-phase approach for the vehicle routing problem with time windows. Computers & Operations Research, Vol. 34(nº 6), pp. 1561-1584.

BACKER, B. D., & FURNON, V. (1997). Meta-heuristics in Constraint programming Experiments with Tabu Search on the vehicle routing problem with time windows. In Proceedings of the 2nd International Conference on Meta-heuristics (MIC'97).

CORDEAU, J.-F., LAPORTE, G., & MERCIER, A. (2001). A unified tabu search heuristic for vehicle routing problems with time windows. Journal of the Research Society, Vol. 52, pp. 928-936.

DANTZIG, G. B., & RAMSER, J. H. (outubro de 1959). The Truck Dispatching Problem. Management Science, Vol. 6(nº 1), pp. 80-91.

PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

EIBEN, A. E., & SMITH, J. E. (dezembro de 2010). Introduction to evolutionary computing (MIT Press ed.). Natural Computing Series, Springer.

FEO, T. A., & RESENDE, M. G. (1989). A probabilistic heuristic for a computationally difficult set covering problem. (North-Holland, Ed.) Operations Research Letters, Vol. 8(nº 2), pp. 67-71.

FRAGA, M. C. (agosto de 2006). Uma metodologia híbrida: colônia de formigas, busca tabu, reconexão por caminhos para resolução do problema de roteamento de veículos com janelas de tempo. Dissertação de Mestrado, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET/MG), Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional, Belo Horizonte.

GENDREAU, M., & POTVIN, J.-Y. (1998). Dynamic Vehicle Routing and Dispatching. In: T. G. Crainic, & G. Laporte (Eds.), Fleet management and logistics (pp. 115-126). Boston: Kluwer.

GOLDBARG, M. C., & LUNA, H. P. (2000). Otimização Combinatória e Programação Linear (Vol. 1). Rio de Janeiro: Editora Campus.

JUNG, S., & MOON, B. R. (2002). A hybrid genetic algorithm for the vehicle routing problem with time windows. Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO 02) (pp. 1309-1316). San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc.

LARSEN, J. (maio de 1999). Parallelization of the vehicle routing problem with time windows. Ph.D. Thesis, Technical University of Denmark (DTU), Informatics and Mathematical Modelling, Kongens Lyngby, Denmark.

LEONG, H. W., & LIU, M. (2006). A multi-agent algorithm for vehicle routing problem with time window. Symposium on Applied Computing (SAC '06) (pp. 106-111). New York, NY, USA: ACM

LÓPEZ-IBÁÑEZ, M., & BLUM, C. (2010). Beam-ACO for the travelling salesman problem with time windows. Computers & Operations Research, Vol. 37, pp. 1570-1583.

OLIVEIRA, H. C. (março de 2007). Um modelo híbrido estocásticos para tratamento do problema de roteamento de veículos com janela de tempo. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Centro de Informática (CIn), Recife.

OLIVEIRA, H. C., CUNHA, A. S., & MATEUS, G. R. (2008). Um algoritmo híbrido baseado na geração heurística de colunas para o problema de roteamento de veículos com janela de tempo estático. XL Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO), Vol. 40, pp. 12.

OLIVEIRA, H. C., VASCONCELOS, G. C., ALVARENGA, G. B., MESQUITA, R. V., & DE SOUZA, M. M. (abril de 2007). A robust method for the VRPTW with multi-start simulated annealing and statistical analysis. IEEE Symposium on Computational Intelligence in Scheduling (SCIS '07). Vol. 12, pp. 198-205. Honolulu, HI: DOI: 10.1109/SCIS.2007.367690.

OLIVEIRA, H. C., VASCONCELOS, G. C., MESQUITA, R. V., & SOUZA, M. M. (dezembro de 2006). Parametrical adjusting of a hybrid system for the vehicle routing problem with time windows. In: I. C. Society (Ed.), Sixth International Conference on Hybrid Intelligent Systems (HIS'06) (p. 30). Auckland, New Zealand.

RIISE, A., & STØLEVIK, M. (1999). Implementation of guided local search for the vehicle routing problem. Fonte: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.11.689&rep=rep1&type=pdf>

PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

ROCHAT, Y., & TAILLARD, E. D. (setembro de 1995). Probabilistic diversification and intensification in local search for vehicle routing. *Journal of Heuristics*, Vol. 1(nº 1), pp. 147-167.

SAVELSBERGH, M. W., & SOL, M. (fevereiro de 1995). The general pickup and delivery problem. *Transportation Science*, Vol. 29(nº 1), pp. 17-29.

SHAW, P. (1998). Using constraint programming and local search methods to solve vehicle routing problems. In: M. Maher, & J.-F. Puget (Eds.), *Principles and Practice of Constraint Programming (CP98)* (Lecture Notes in Computer Science ed., Vol. 1520, pp. 417-431). Springer Berlin / Heidelberg.

SOLOMON, M. M. (março de 1987). Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints. *Operations Research (INFORMS)*, Vol. 35(nº 2), pp. 254-265.

XU, H., CHEN, Z.-L., RAJAGOPAL, S., & ARUNAPURAM, S. (2003). Solving a Practical Pickup and Delivery Problem. *Transportation Science*, Vol. 37(nº 3), pp. 347-364.