



UM ALGORITMO DE BUSCA TABU ADAPTATIVO APLICADO A PROBLEMAS DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS COM PEDIDOS DE COLETA E ENTREGA

Fermín Alfredo Tang Montané

Universidade Cândido Mendes - Campos.
Rua Anita Peçanha, 100, Parque São Caetano
CEP 28040320, Campos dos Goytacazes, RJ - Brasil
E-mail: tang@ucam-campos.br

RESUMO

Variantes do problema de roteamento de veículos clássico consideram clientes que fazem pedidos de coleta e entrega, simultâneos ou não. As entregas são realizadas a partir de um único depósito no início de cada rota, enquanto que as coletas são conduzidas até o depósito no fim da rota. Uma característica deste tipo de problemas é que a carga do veículo em uma rota qualquer é composta por pedidos de entrega e coleta.

No presente artigo descreve-se um algoritmo de busca tabu para resolver estes problemas. O algoritmo é uma extensão de um trabalho anterior que incorpora um mecanismo adaptativo para guiar a busca no espaço de soluções. Este mecanismo consiste em identificar padrões na trajetória de busca e em perturbar os valores dos parâmetros de busca tabu de acordo com o padrão observado. Resultados computacionais são reportados para um conjunto de 640 problemas teste com entre 50 e 100 clientes.

PALAVRAS CHAVE. Roteamento de Veículos. Busca Tabu Adaptativa. Pedidos de Coleta e Entrega. Metaheurísticas.

ABSTRACT

Variations of the classical Vehicle Routing Problem (VRP) consider clients that require pick-up and/or delivery service, simultaneously or not. Deliveries are supplied from a single depot at the beginning of the vehicle's service, while pick-up loads are taken to the same depot at the conclusion of the service. One important characteristic of this type of problems is that a vehicle's in any given route is a mix of pick-up and delivery loads.

In this paper we describe a tabu search algorithm to solve these problems. This algorithm is an extension of a previous work that incorporates an adaptive mechanism for guiding the search in the solution space. This mechanism works identifying specific patterns in the search trajectory and defining perturbations on the values of selected tabu parameters according to the observed pattern. Computational results are reported for a set of 640 test problems with between 50 and 100 clients.

KEYWORDS. Vehicle Routing. Adaptive Tabu Search. Pick-up and Delivery Service. Metaheuristics.

1. Introdução

Variantes do Problema de Roteamento de Veículos Clássico (VRP) consideram clientes que fazem pedidos de coleta e entrega, simultâneos ou não. As entregas são realizadas a partir de um único depósito no início de cada rota, enquanto que as coletas são conduzidas até o depósito no fim da rota. Uma característica deste tipo de problemas é que a carga do veículo em uma rota qualquer é composta por dois tipos de itens de natureza diferente. Este tipo de problemas é observado com frequência na indústria de transporte de alimentos e bebidas, especificamente nos casos em que além da entrega de um tipo de produto é necessário recolher outros produtos com prazo de validade vencida. Outra aplicação importante dos problemas de roteamento de veículos com pedidos de coleta e entrega acontece na indústria petrolífera. O problema surge no contexto de transporte de trabalhadores entre o continente e os centros de exploração e produção de petróleo em alto mar (plataformas marítimas e embarcações), tarefa que é realizada por uma frota de helicópteros. Periodicamente as tripulações das plataformas precisam ser renovadas. No Brasil, a empresa estatal PETROBRAS realiza este tipo de operações aéreas na Bacia de Campos, região norte do Estado do Rio de Janeiro.

Abordaremos duas variantes de roteamento com pedidos de coleta e entrega. O Problema de Roteamento de Veículos com Pedidos de Coleta e Entrega Simultâneo (PRVCES) e o Problema de Roteamento de Veículos com Pedidos de Coleta e Entrega (PRVCE). No primeiro caso, os clientes fazem pedidos de coleta e entrega, os quais devem ser atendidos de maneira simultânea pelo mesmo veículo. No segundo caso, o cliente somente pode fazer um tipo de pedido (coleta ou entrega). Em ambos casos, dois tipos de carga coexistem no veículo que atende uma rota; a carga que ainda não foi entregue e a carga que já foi recolhida. Observa-se que o PRVCE é um caso particular do PRVCES no qual uma das demandas é zero.

O PRVCES pode ser definido matematicamente da seguinte maneira. Seja $G = (V, A)$ um grafo onde $V = \{v_0, \dots, v_n\}$ representa o conjunto de vértices e $A = \{(v_i, v_j) : v_i, v_j \in V, i \neq j\}$ é o conjunto de arcos. O vértice v_0 representa o depósito que serve de base para a frota de veículos. Cada vértice $v_i \in V \setminus \{v_0\}$ representa um cliente que tem associadas duas demandas: coleta r_i e entrega e_i . Consideramos que todos os arcos são não orientados, i.e arestas. Cada aresta (v_i, v_j) tem associada um custo não negativo, c_{ij} , que representa o custo de percurso. Além disso, temos que Q representa a capacidade do veículo. Parte-se da hipótese de que o número de veículos disponíveis é ilimitado. O problema PRVCES consiste em determinar as rotas que serão utilizadas de maneira que: (1) as rotas se iniciam no depósito e terminam no depósito; (2) cada cliente é visitado exatamente uma vez; (3) ambas as demandas dos clientes são atendidas; (4) a carga máxima na rota não excede a capacidade do veículo utilizado; e (5) a distância total percorrida é minimizada.

No presente artigo, propomos uma heurística de busca tabu adaptativa. O artigo está organizado da seguinte maneira. Na seção 2, se apresenta uma breve revisão bibliográfica dos algoritmos desenvolvidos para resolver os problemas PRVCES e PRVCE. A descrição da heurística de busca tabu adaptativa proposta é realizada na seção 3. Na seção 4 apresentamos os resultados computacionais enquanto na seção 5 apresentamos as conclusões do trabalho.

2. Breve Revisão Bibliográfica

O PRVCES foi inicialmente estudado por Min(1989) no contexto de um sistema de distribuição para bibliotecas públicas, considerando veículos de igual capacidade. Foi proposta uma heurística clássica de agrupar primeiro, rotear depois. O agrupamento dos clientes é realizado com base em sua proximidade geográfica, enquanto que o roteamento consiste em resolver uma extensão do problema do caixeiro viajante com restrições de capacidade adicionais de coleta e entrega simultâneas (PCVCES).

Mosheiov (1998) estudou a caso particular do PRVCES em que todas as demandas são iguais à unidade. O autor propôs uma formulação matemática e desenvolveu heurísticas

construtivas com base no princípio clássico de primeiro rotear, depois agrupar, também denominado de particionamento do tour.

Salhi e Nagy (1999) propuseram quatro heurísticas construtivas para o PRVCE, que consiste basicamente em construir uma solução parcial, contendo somente clientes de entrega e em seguida inserir clientes de coleta segundo diferentes critérios de inserção até produzir uma solução completa. Dethloff (2001) propôs uma formulação matemática para o PRVCE e desenvolveu heurísticas construtivas com base no princípio da inserção mais barata. As quatro heurísticas propostas pelo autor utilizam diferentes medidas para avaliar o custo da inserção de um cliente. Vale a pena mencionar que as medidas utilizadas consideram tanto a distância percorrida como a capacidade utilizada na rota. Duas heurísticas de busca local foram desenvolvidas por Montané e Galvão (2002). A primeira delas é uma adaptação da heurística de particionamento do tour proposta por Beasley (1983) enquanto que a segunda segue o princípio de varredura de Gillet e Miller (1974). Os procedimentos desenvolvidos por Montané e Galvão (2002) resolvem problemas do caixeiro viajante com pedidos de coleta e entrega simultâneos (PCVCE) para cada rota individual, adaptando métodos desenvolvidos originalmente para o caso não simultâneo. Montané e Galvão também propuseram uma formulação matemática alternativa para o PRVCE. Mais recentemente, Nagy e Salhi (2005) desenvolveram uma heurística de busca local, que admite soluções com um certo grau de inviabilidade. Os autores introduzem os conceitos de viabilidade fraca e forte para uma rota que atende pedidos de coleta e entrega. A heurística proposta por estes autores, inicialmente admite rotas com viabilidade fraca, sendo que no transcurso do algoritmo aplica mecanismos para restaurar a viabilidade da rota.

Montané e Galvão(2006) desenvolveram uma metaheurística com base em Busca tabu para resolver o PRVCE. Este algoritmo utiliza três tipos de movimentos para calcular soluções adjacentes intra-rota: realocação, intercâmbio e cruzamento. Além disso, utiliza um procedimento 2-opt para calcular soluções adjacentes inter-rota. Os parâmetros tabu são ajustados no início do algoritmo e são mantidos fixos durante a execução do mesmo. Este algoritmo obteve soluções de boa qualidade que superaram amplamente as melhores soluções calculadas nos trabalhos prévios. Conjuntos de problemas com até 400 nós foram resolvidos. Além disso, os autores calcularam limites inferiores para medir a qualidade de seus resultados. Um algoritmo similar foi desenvolvido de maneira independente por Bianchessi e Righini (2006). Este o algoritmo é um pouco mais sofisticado que o anterior. Entre as características que devem ser destacadas, temos: (i) o uso do princípio de particionamento do tour não consecutivo para o cálculo das soluções iniciais; (ii) a implementação de um movimento que combinam triplas de rotas e (iii) o ajuste dinâmico dos parâmetros da busca tabu. Os autores resolveram problemas com até 100 nós.

Um algoritmo exato para o PRVCE com janelas de tempo foi proposto por Angelelli e Mansini (2003) com base em um algoritmo de branch and bound.

3. Heurística de Busca Tabu Adaptativa para problemas de Coleta e Entrega

A heurística de Busca Tabu Adaptativa proposta no presente artigo é uma extensão do algoritmo desenvolvido em Montané e Galvão (2006) que incorpora um mecanismo adaptativo para guiar a busca no espaço de soluções. Este mecanismo consiste em identificar padrões na trajetória de busca e em perturbar os valores dos parâmetros de busca tabu de acordo com o padrão observado. Nesta seção descrevemos os elementos que conformam o algoritmo. As Subseções 3.1 e 3.2 descrevem os princípios adotando na construção de soluções iniciais para o algoritmo de Busca Tabu Adaptativo. Na Subseção 3.3 se descrevem os movimentos de busca local que definem a vizinhança. As Subseções 3.4 e 3.5 tratam detalhes da memória de curto prazo e da condição tabu. Na Subseção 3.6 descreve-se o processo de busca adaptativa que foi adotado. E finalmente a Subseção 3.7 mostra a integração entre o algoritmo tabu e processo adaptativo.

3.1. Critérios usados no Agrupamento de Clientes

Dois critérios foram usados para agrupar os clientes, usando alternativamente limites superiores ou inferiores sobre a carga máxima que o veículo pode transportar. Quando limites superiores são usados, a solução do PCV para cada grupo de clientes assim obtido produz uma rota viável. Quando limites inferiores são usados é preciso resolver um PRVCES para produzir uma rota viável para cada grupo de clientes.

Definimos a demanda líquida de um cliente i , $dl(i)$, como a diferença entre as demandas de coleta e entrega deste cliente. Se $dl(i) < 0$ a carga do veículo será reduzida em $dl(i)$ após o mesmo visitar o cliente i ; se $dl(i) > 0$ sua carga será incrementada em $dl(i)$ após esta visita. Dado um grupo de clientes, a menor carga máxima acontece quando o veículo visita em primeiro lugar todos os clientes com $dl(i) \leq 0$ e somente depois os clientes com $dl(i) > 0$; a maior carga máxima acontece quando o veículo visita primeiro todos os clientes com $dl(i) > 0$.

A primeira estratégia usada para agrupar os clientes adiciona novos clientes a um grupo somente se o valor da menor carga máxima não excede a capacidade do veículo; esta estratégia não garante a viabilidade da rota depois que o grupo é formado e um PRVCES deve ser resolvido para produzir a rota correspondente. A segunda estratégia adiciona novos clientes a um grupo somente se o valor da maior carga máxima não excede a capacidade do veículo; esta estratégia garante uma rota viável e a solução de um PCV produz a rota desejada para o grupo de clientes assim formado.

3.2. Heurísticas Construtivas para a Busca Tabu

Quatro procedimentos heurísticos foram implementados para obter uma solução inicial para a busca tabu, combinando as duas estratégias de agrupamento e os dois procedimentos de roteamento descritos acima. Denotaremos estas heurísticas como GRI1, GRI2, GRS1 e GRS2, respectivamente.

- Procedimento GRI1 – O particionamento de um tour inicial é realizado de acordo com a estratégia da menor carga máxima. Neste caso é necessário resolver um PCVCES para obter um tour viável para cada grupo de clientes. Uma heurística 2-opt melhora a rota inicial produzida pelo algoritmo PCVCES.
- Procedimento GRI2 – O particionamento do tour inicial é feito de acordo com a estratégia da maior carga máxima. O particionamento do tour inicial produz neste caso uma rota viável para cada grupo de clientes; heurísticas para o PCV clássico são então usadas para reduzir o comprimento das rotas.
- Procedimento GRS1 – A admissão de um novo cliente a um grupo é feita de acordo com a estratégia da menor carga máxima. Se o novo cliente passa pelo primeiro teste de viabilidade, ele é então roteado para determinar se a restrição de máxima distância será satisfeita com sua inclusão no grupo. O princípio de *inserção viável mais barata* é usado para rotear os clientes.
- Procedimento GRS2 - Similar ao procedimento GRS1, a única diferença sendo que a admissão a um grupo é feita de acordo com a estratégia da maior carga máxima.

3.3. Definição da Vizinhança

Usamos quatro tipos de movimentos para definir as vizinhanças da busca tabu. Três destes são movimentos inter-rota e o quarto é um movimento intra-rota que melhora as rotas produzidas pelos movimentos inter-rota. Os movimentos inter-rota são os movimentos de *Realocação*, *Intercâmbio* e *Cruzamento*; o movimento intra-rota é um procedimento 2-opt.

Realocação: Este movimento consiste em remover um cliente de uma das rotas e incluí-lo em outra rota diferente. O movimento é em princípio avaliado para todos os pares possíveis de rotas e para cada cliente em cada uma das duas rotas.

Intercâmbio: Este movimento consiste em trocar clientes entre duas rotas. O movimento é em princípio avaliado para todos os pares possíveis de rotas e para todas as combinações possíveis de trocas de clientes entre duas rotas.

Cruzamento: Este movimento consiste em dividir cada uma das duas rotas escolhidas em duas seções. Isto é realizado removendo um arco de cada rota e inserindo dois novos arcos que conectam respectivamente a seção inicial da primeira rota com a seção final da segunda rota e vice-versa. O movimento é em princípio avaliado para todos os pares possíveis de rotas e para todas as possíveis partições de cada uma das duas rotas.

2-Opt: Este é um movimento intra-rota cujo objetivo é melhorar as soluções obtidas por qualquer um dos três movimentos descritos acima. O movimento consiste em substituir dois arcos não adjacentes, pertencentes à rota que está sendo considerada, por dois outros arcos que não pertencem à rota, tal que a conectividade da rota seja re-estabelecida. O processo é repetido até que não seja mais possível reduzir o comprimento das rotas.

3.4 – Memória de Curto Prazo

Uma estrutura com base em memória recente foi implementada para evitar a ocorrência de ciclos. Cada movimento é caracterizado por dois conjuntos de arestas, que definem seus atributos: (i) arestas que serão inseridas na solução; (ii) arestas que serão removidas da solução. A memória de curto prazo mantém uma lista com as arestas que foram usadas (inseridas ou removidas) no passado recente. A mesma lista tabu é usada para armazenar tanto as arestas inseridas como as arestas removidas, uma vez que sempre é possível identificar se uma aresta foi inserida ou removida apenas observando a solução corrente.

3.5. Permanência na Lista Tabu (“*Tabu Tenure*”) e Regra de Ativação Tabu

Os valores para o “*tabu tenure*” das arestas que são inseridas e removidas, como consequência de um movimento de busca local, foram denominados: (i) tempo de permanência e (ii) tempo de exclusão, respectivamente. Uma vez que o número de arestas que não pertence à solução é maior que o número de arestas que esta presente nela, os valores foram definidos de maneira que o tempo de permanência de uma aresta presente na solução corrente sempre fosse inferior ao tempo de exclusão de uma aresta removida. Estes valores foram escolhidos de maneira proporcional ao número de nós do problema. Foram utilizados os seguintes valores fixos (0,3; 0,5). Na presente implementação qualquer aresta que receba a condição tabu na iteração t fica proibida até a iteração $t+q$, onde q é o valor do “*tabu tenure*”. O critério de aspiração usado remove o estado tabu de um movimento se este conduz a uma solução melhor que a melhor solução encontrada até então.

Sobre a regra de ativação tabu temos que um movimento é considerado tabu quando o número de arestas envolvidas no movimento que foi executado na iteração corrente excede a um nível máximo admissível. Este nível máximo admissível é denominado de tolerância e costuma ser diferente para cada tipo de movimento. Desta maneira, quando menor a tolerância os movimentos se tornaram tabu com mais frequência e a busca fica mais restrita. Vale observar que



o número de arestas envolvidas no movimento compreende tanto as arestas que são inseridas como aquelas que são removidas.

3.6 – O Procedimento de Busca Adaptativa

O conceito de busca adaptativa foi introduzido por Pureza e França (1996) como uma estratégia complementar da meta-heurística busca tabu e aplicado inicialmente ao problema do Caixeiro Viajante (PCV), e mais recentemente ao Problema de Agrupamento Capacitado (França *et al*, (1999)) e ao Problema de Roteamento de Veículos (PRV), Pureza e França (2001).

A busca adaptativa foi proposta como uma maneira de controlar a trajetória seguida por uma meta-heurística durante o processo de busca por novas soluções. O controle sobre a trajetória de busca procura melhorar o desempenho geral da meta-heurística, reduzindo o tempo necessário para atingir soluções de boa qualidade e ao mesmo tempo permitindo que novas melhores soluções sejam encontradas. Embora a metodologia tenha sido desenvolvida no contexto da busca tabu, seus princípios também podem ser aplicados a outros tipos de meta-heurísticas. Esta estratégia procura identificar e reagir a três padrões de trajetórias:

- (i) período de estagnação.- caracterizado por pequenas variações no custo das soluções observadas.
- (ii) trajetória ascendente.- caracterizada pelo aumento contínuo no custo das soluções observadas (problemas de minimização).
- (iii) trajetória descendente.- caracterizada pela diminuição contínua no custo das soluções observadas (problemas de minimização).

A identificação dos padrões de trajetória é realizada comparando as médias dos custos das soluções observadas durante dois períodos de avaliação consecutivos. Os períodos de avaliação também denominados de horizontes de avaliação precisam ser segmentos relativamente pequenos da trajetória de busca. A busca adaptativa funciona modificando os níveis de restritividade impostos ao processo de busca, mais especificamente, perturbando a regra de ativação tabu. Como foi mencionado na Subseção 3.5, perturbar a regra de ativação tabu equivale a modificar a tolerância dos movimentos à condição tabu. O procedimento de busca adaptativa implementado segue as mesmas diretrizes da versão proposta por Pureza e França (2001) para o (PRV), sendo que foi necessário definir uma tolerância adicional para o movimento de cruzamento. A descrição do procedimento de busca adaptativa implementado é dada a continuação:

Descrição do Procedimento de Busca Adaptativa (PBA)

Este procedimento é executado cada vez que o horizonte de avaliação for concluído, i.e quando a iteração corrente it atinge o ponto da próxima avaliação: $it = prox_aval$.

Passo 0 Atualiza as média anterior e calcula a media corrente dos custos observados no último período de avaliação.

$med_ante = med_corr$

$med_corr = \text{média (custos observados)}$

Gera de maneira aleatória o parâmetro hoz , utilizado para definir a amplitude do próximo horizonte de avaliação, no intervalo $[h_{min}, h_{max}]$.

Passo 1 Se $(it_sm=0)$, houve atualização da melhor solução, então ajusta o nível de restritividade sem levar em consideração o tipo de trajetória de busca. Modificar a regra de ativação tabu de maneira a torná-la o menos restritiva possível. Modificar as

tolerâncias correspondentes aos três movimentos: TR=5, TI=7, TC=3. Definir a iteração da próxima avaliação: $\text{prox_aval} = \text{it} + \text{hoz}/2$ e Ir ao Passo 8; Caso contrário, ir ao Passo 2.

Passo 2 Calcula a seguinte medida de variação entre a média anterior e a media corrente:

$$\text{diff} = (\text{med_ante} - \text{med_corr}) / \text{med_ante}.$$

Ajusta o nível de restritividade com base em diff (trajetória de busca observada).

Passo 3 Se $|\text{diff}| \leq 0,0025$, ir ao Passo 4; Caso contrário ir ao Passo 5

Passo 4 (Trajetória de Estagnação): A trajetória corrente é de estagnação. Modificar a regra de ativação tabu de maneira a torná-la o mais restritiva possível. Modificar as tolerâncias correspondentes aos três movimentos: TR=0, TI=0, TC=0.

Definir a iteração da próxima avaliação: $\text{prox_aval} = \text{it} + \text{hoz}/2$. Ir ao Passo 8.

Passo 5 Se $\text{diff} < 0$, ir ao Passo 6; Caso contrário, se $\text{diff} > 0$ ir ao Passo 7.

Passo 6 (Trajetória de Ascendente): A trajetória corrente é ascendente. Modificar a regra de ativação tabu de acordo com o valor de diff. Modificar as tolerâncias correspondentes aos três movimentos: TR=0, TI=0, TC=0.

Faixa de Diff	TR	TI	TC
($-\infty$, -0,03)	5	7	3
(-0,03 , -0,025)	4	6	3
(-0,025 , -0,02)	3	5	3
(-0,02 , -0,015)	3	4	2
(-0,015 , -0,005)	3	3	2
(-0,005 , -0,0025)	2	2	1

Definir a iteração da próxima avaliação: $\text{prox_aval} = \text{it} + 2*\text{hoz}$. Ir ao Passo 8.

Passo 7 (Trajetória de Descendente): A trajetória corrente é descendente. Se o nível de restritividade é o menor admitido TR=5, TI=7, TC=3 aumentar o nível de restritividade TR=4, TI=6, TC=2 e definir a iteração da próxima avaliação: $\text{prox_aval} = \text{it} + 2*\text{hoz}$. Caso contrário, definir a iteração da próxima avaliação: $\text{prox_aval} = \text{it} + \text{hoz}$. Em ambos casos ir ao Passo 8.

Passo 8 Termina.

3.7 – Algoritmo de Busca Tabu Adaptativo (BTA)

Este algoritmo é basicamente uma extensão do algoritmo proposto por Montané e Galvão (2006). A principal modificação consiste em guardar os custos das soluções observadas durante os períodos de avaliação e perturbar os valores das tolerâncias como mostrado no procedimento (PBA), sempre que o período de avaliação conclui. Damos apenas um esboço do algoritmo BTA sem muito grau de detalhamento.

Descrição do Algoritmo de Busca Tabu Adaptativo (BTA)

Passo 0 (Inicialização): Gerar uma solução inicial usando um dos seguintes procedimentos heurísticos: GRI1, GRI2, GRS1, GRS2.

Passo 1 (Fase Busca Tabu) Executar o algoritmo de busca tabu começando da solução inicial corrente.

(a) Se (it = prox_aval) então executar o Procedimento de Busca Adaptativa (PBA);

Caso contrário, guardar o custo da solução corrente.

O algoritmo é executado até que uma das seguintes regras de parada seja satisfeita: (i) Não existe movimento viável; (ii) o número máximo de iterações foi atingido.

Passo 2 (Re-inicialização): Gerar uma nova solução inicial utilizando uma das heurísticas (GRI1, GRI2, GRS1, GRS2) não utilizada até então. Repetir os Passos 1-5 até que todos os quatro procedimentos heurísticos sejam utilizados para produzir uma solução inicial.

4. Resultados Computacionais

O algoritmo de busca tabu adaptativo (BTA) foi implementado em Pascal para o entorno Delphi 7.0 e executado em um PC Pentium 4 3.0 Ghz com 1.0GB de RAM. Este algoritmo foi testado utilizando dois conjuntos de dados disponíveis na literatura: (i) os dados propostos por Dethloff (2001) para o problema PRVCES, que compreende 40 problemas teste com 50 clientes; e (ii) os dados propostos por Bianchessi e Righini (2006) para o problema PRVCE, formado por 600 problemas com 50 ou 100 clientes. Os resultados obtidos pelo algoritmo de busca tabu adaptativo (BTA) para ambos os conjuntos de dados são comparados com os resultados obtidos por outros dois algoritmos da literatura: o algoritmo de busca tabu proposto por Montané e Galvão (2006), que denominaremos de busca tabu não adaptativa (BTNA) e o algoritmo de busca tabu proposto por Bianchessi e Righini (2006) que será denotado como BTBR. Os resultados correspondentes ao conjunto de dados para o PRVCES são mostrados nas Tabelas 1 e 2, enquanto os resultados correspondentes ao conjunto de dados para o PRVCE são mostrados nas Tabelas 3 e 4.

A Tabela 1 mostra os resultados obtidos pelas três heurísticas BTNA, BTBR e BTA para as instâncias do PRVCES. Os resultados são apresentados de maneira agregada, de maneira que cada linha da tabela representa um grupo de 10 problemas. Apresentam-se resultados referentes ao custo da solução, número de veículos e tempo computacional (T.C.) que correspondem às médias dos respectivos valores para as instâncias de cada grupo. A tabela mostra que a heurística adaptativa (BTA), proposta neste artigo, produziu as melhores soluções, seguida pela heurística BTNA de Montané e Galvão (2006).

A Tabela 2 compara os resultados obtidos pelas três heurísticas BTBR, BTNA e BTA para as instâncias do PRVCES com a finalidade de determinar qual foi a que teve o melhor desempenho, assim como medir o grau de superioridade da heurística dominante. Para isso calcula-se a porcentagem de melhoria que cada heurística obteve sobre a heurística RCRS de Dethloff (2001). A % de melhoria mostrada nesta tabela é calculada como a média de $(\text{Custo RCRS} - \text{Custo da heurística}) / \text{Custo RCRS} * 100\%$ para todas as instâncias do grupo. Esta tabela mostra que a heurística BTBR obteve uma melhoria média de 8,42%, enquanto que a heurística BTNA obteve uma melhoria média de 8,75%. O melhor desempenho, no entanto, corresponde à heurística adaptativa BTA, proposta neste artigo. Esta heurística obteve uma melhoria média de 9,19%.

A penúltima coluna da tabela mostra a diferença entre a % de melhoria das heurísticas BTA e BTNA. Podemos afirmar que a abordagem adaptativa produziu uma melhora de 0,45% sobre a abordagem não adaptativa. Já a última coluna da tabela mostra da diferença entre a % de melhoria das heurísticas BTA e BTBR. Neste caso a abordagem adaptativa produziu uma melhora de 0,77% sobre a heurística de Bianchessi e Righini.

Tabela 1 - Resultados das heurísticas para as instancias do PRVCEs

		Dethloff RCRS	Montané, Galvão BTNA			Bianchessi, Righini BTBR (Complex)			Montané BTA		
Prob.	Nós	Custo	Veíc.	Custo	T.C**	Veíc.	Custo	T.C*	Veíc.	Custo	T.C**
SCA3	50	746,57	4,0	676,59	12,12	4,0	684,60	59,47	4,0	674,20	6,11
CON3	50	597,27	4,0	564,27	12,05	4,0	568,50	59,36	4,0	562,80	6,22
SCA8	50	1166,43	9,2	1041,12	16,13	9,0	1035,70	17,05	9,1	1033,38	10,10
CON8	50	860,59	9,2	776,62	16,17	9,0	776,40	15,14	9,1	771,83	10,08
Médias		842,72	6,6	764,65	14,12	6,5	766,30	37,76	6,6	760,55	8,13

*Segundos de CPU PC 1.6 Ghz.

**Segundos de CPU Pentium 4 3.0 Ghz.

Tabela 2 – Comparação entre as heurísticas para as instancias do PRVCEs

		% Melhoria sobre RCRS			Dif.	
Prob.	Nós	BTBR	BTNA	BTA	BTA-BTNA	BTA-BTBR
SCA3	50	8,21	9,30	9,62	0,32	1,41
CON3	50	4,66	5,38	5,63	0,25	0,97
SCA8	50	11,11	10,63	11,30	0,67	0,19
CON8	50	9,71	9,68	10,23	0,55	0,52
Médias		8,42	8,75	9,19	0,45	0,77

A Tabela 3 mostra os resultados obtidos pelas três heurísticas BTNA, BTBR e BTA para as instâncias do PRVCE. Os resultados são apresentados de maneira agregada, de maneira que cada linha da tabela representa um grupo de 50 problemas. Apresentam-se resultados referentes ao custo da solução, número de veículos e tempo computacional (T.C.) que correspondem às médias dos respectivos valores para as instâncias de cada grupo. Esta tabela mostra que a heurística adaptativa (BTA), proposta neste artigo, produziu as melhores soluções, seguida pela heurística BTBR de Bianchessi e Righini (2006). É importante observar, no entanto, que as soluções calculadas pela heurística BTA utilizam em média 17,95 veículos enquanto que as soluções calculadas pela heurística BTBR utilizam em média 17,79.

A Tabela 4 compara os resultados obtidos pelas três heurísticas BTBR, BTNA e BTA para as instâncias do PRVCE com a finalidade de determinar qual foi a que teve o melhor desempenho, assim como medir o grau de superioridade da heurística dominante. Para isso calcula-se a percentagem de melhoria que uma heurística com resultados superiores (dominante) obteve sobre outra heurística com resultados piores (dominada). A % de melhoria mostrada nesta tabela é calculada como a média de $(\text{Custo da heurística dominada} - \text{Custo da heurística dominante}) / \text{Custo da heurística dominada} * 100\%$ para todas as instâncias do grupo.

A primeira coluna desta tabela mostra a % de melhoria da heurística BTBR de Bianchessi e Righini (2006) sobre a heurística não adaptativa BTNA de Montané e Galvão (2006). Observa-se que os resultados produzidos pela heurística BTBR foram em média 1,09% superiores aos resultados da heurística BTNA. As colunas 2 e 3 da tabela comparam os resultados da heurística adaptativa BTA, proposta no presente artigo, com as heurísticas BTNA e BTBR respectivamente. A coluna 2 mostra que a heurística BTA consegue uma melhoria média de 1,66% sobre a heurística BTNA, enquanto que a coluna 3 mostra que a melhoria média da heurística BTA

sobre a heurística BTBR é de 0,57%. Conclui-se que para as instâncias do PRVCE, a heurística adaptativa BTA foi superior as outras duas heurísticas.

Tabela 3 – Resultados das heurísticas para as instancias do PRVCE

Prob.	Nós	Montané, Galvão BTNA			Bianchessi, Righini BTBR (Complex)			Montané BTA		
		Custo	Veíc.	T.C.	Custo	Veíc.	T.C.*	Custo	Veíc.	T.C.**
1-D	50	3032,40	17,56	-	3017	17,10	6,81	3010,65	17,34	14,03
2-D	50	2928,80	16,98	-	2905	16,58	7,11	2886,95	16,74	13,72
3-D	50	2868,76	16,30	-	2853	15,92	8,03	2839,15	16,06	13,48
4-D	100	5492,42	32,80	-	5410	31,78	22,68	5402,30	32,20	54,21
5-D	100	5425,44	31,94	-	5355	31,10	20,54	5330,65	31,36	53,90
6-D	100	5436,36	32,26	-	5362	31,26	19,04	5336,92	31,58	54,86
1-2D	50	1672,64	8,60	-	1655	8,44	15,95	1638,13	8,48	10,18
2-2D	50	1602,74	8,32	-	1588	8,08	18,45	1577,51	8,12	9,96
3-2D	50	1584,38	7,98	-	1567	7,90	20,51	1555,83	7,92	9,81
4-2D	100	2921,98	15,72	-	2891	15,50	46,26	2873,46	15,64	41,68
5-2D	100	2887,42	15,36	-	2852	15,02	48,89	2831,54	15,06	40,90
6-2D	100	2865,60	15,32	-	2816	14,84	48,79	2795,30	14,92	41,11
Média		3226,58	18,26		3189,25	17,79	23,59	3173,20	17,95	29,82

*Segundos de CPU PC 1.6 Ghz.

**Segundos de CPU Pentium 4 3.0 Ghz.

Tabela 4 – Comparação entre as heurísticas para as instancias do PRVCE

Prob.	Nós	% Melhoria		
		BTBR sobre	BTA sobre	
		BTNA	BTNA	BTBR
1-D	50	0,51	0,72	0,21
2-D	50	0,81	1,43	0,62
3-D	50	0,55	1,03	0,49
4-D	100	1,50	1,64	0,14
5-D	100	1,30	1,75	0,45
6-D	100	1,37	1,83	0,47
1-2D	50	1,05	2,06	1,02
2-2D	50	0,92	1,57	0,66
3-2D	50	1,10	1,80	0,71
4-2D	100	1,06	1,66	0,61
5-2D	100	1,23	1,94	0,72
6-2D	100	1,73	2,45	0,73
Média		1,09	1,66	0,57



5. Conclusões

Testes computacionais foram realizados comparando o desempenho das heurísticas de busca tabu adaptativa (BTA) e não adaptativa (BTNA) na resolução de conjuntos de dados para os problemas PRVCES e PRVCE. Com relação ao conjunto de dados PRVCES, os testes computacionais mostraram que em média, a heurística BTA tem uma ligeira vantagem de 0,45% sobre a heurística BTNA. Com relação ao conjunto de dados para o PRVCE, os resultados também mostraram um melhor desempenho da heurística BTA. Neste caso, a superioridade da heurística BTA sobre BTNA é mais significativa, 1,65%. De esta maneira, fica comprovada a eficácia da busca adaptativa na melhora da qualidade das soluções.

Outro resultado positivo é o fato de que conseguimos resultados superiores daqueles existentes na literatura, tanto no conjunto de dados para o PRVCES como no conjunto de dados para o PRVCE. Em ambos casos nossos resultados foram comparados com os resultados obtidos pelo algoritmo de Bianchessi e Righini (2006). No primeiro caso a melhoria média foi de 0,77% enquanto que no segundo caso a melhoria média foi de 0,57%.

A superioridade de nossas soluções, embora possa parecer modesta, se torna mais significativa se consideramos que o algoritmo BT_BR proposto por Bianchessi e Righini (2006) utiliza uma vizinhança composta que integra 4 tipos de movimentos de busca local: RELOCATE, XWEAK, CROSS e 3-ARC-X, enquanto que nosso algoritmo adaptativo (BTA) utiliza uma vizinhança composta por apenas 3 tipos de movimentos, equivalentes aos três primeiros que foram mencionados. Além disso, deve ser mencionado que qualidade de nossas soluções iniciais é muito inferior que as utilizadas por estes autores, em média 18% piores. Em contrapartida, para compensar estas desvantagens nosso algoritmo realiza 5000 iterações contra as 2000 iterações do algoritmo BTBR.

Agradecimentos

Aos Professores Dr. Dethloff e Dr. Righini que gentilmente proporcionaram seus dados e resultados computacionais. Ao Professor Dr. Galvão pelo material sobre busca adaptativa.

O presente trabalho foi financiado com recursos da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (Faperj), processo no. E-26/ 152.675/ 2005.



Referências Bibliográficas

Angelelli E. e Mansini R. (2003), A branch-and-price algorithm for a simultaneous pick-up and delivery problem. Working Paper, Article presented at the EURO/INFORMS Meeting, 2003.

Beasley, J.E. (1983), Route First-Cluster Second Methods for Vehicle Routing, *Omega*, 11, 403-408.

Bianchessi, N. e Righini, G. (2006), Heuristic algorithms for the vehicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery, Article in Press *Computers and Operations Research*.

Dethloff, J. (2001), Vehicle routing and reverse logistics: the vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up, *OR Spectrum*, 23, 79-96.

França, P.M. Sosa N.M. e Pureza V. (1999) An adaptive tabu search algorithm for the capacitated clustering problem, *International Transactions in Operational Research*, 6, 665-678.

Gillet B.E. e Miller L.R. (1974), A heuristic for the vehicle dispatch problem, *Operations Research*, 22, 340-349.

Min, H. (1989), The multiple vehicle routing problem with simultaneous delivery and pickup points, *Transportation Research A*, 23, 377-386.

Montané, F.A.T. e Galvão, R.D (2002), Vehicle routing problems with simultaneous pick-up and delivery service, *Journal of the Operational Research Society of India (OPSEARCH)*, 39, 19-33.

Montané, F.A.T. e Galvão, R.D (2006), A Tabu Search Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pick-up and Delivery Service, *Computers & Operations Research*, 33, 595-619.

Mosheiov, G. (1998), Vehicle routing with pick-up and delivery: tour partitioning heuristics, *Computer and Industrial Engineering*, 34, 669-684.

Nagy, G. e Salhi, S. (2005), Heuristic algorithms for single and multiple depot vehicle routing problems with pickups and deliveries, *European Journal of Operational Research*, 162, 126-141.

Pureza, V.M. e Franca, P.M. (1996), An adaptive tabu metaheuristic approach based on the topology of the solution space. II ALIO/EURO Workshop on Practical Combinatorial Optimization, Valparaiso, Chile, 233-249.

Pureza, V.M. e Franca, P.M. (2001), Uma abordagem adaptativa de busca tabu aplicada ao problema de roteamento de veículos, *Revista dos Transportes Públicos*, 9, 28-47.

Salhi, S. e Nagy, G. (1999), A cluster insertion heuristic for single and multiple depot vehicle routing problems with backhauling, *Journal of the Operational Research Society*, 50, 1034-1042.