

UMA ABORDAGEM INTEGRADA PARA O PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO DE VEÍCULOS E TRIPULANTES DE ÔNIBUS

Jorge von Atzingen

Cláudio Barbieri da Cunha

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes

Escola Politécnica, Universidade de São Paulo

Gustavo Peixoto Silva

Instituto de Ciências Exatas e Biológicas, Universidade Federal de Ouro Preto

RESUMO

Na maioria das cidades brasileiras, o ônibus é o principal, senão o único meio de transporte público de passageiros. A fim de evitar o declínio na sua utilização em muitas cidades, inúmeras medidas devem ser tomadas, incluindo um esforço para reduzir custos e, em decorrência, as tarifas pagas pelos usuários. Nesse contexto, a programação eficiente de veículos e tripulações é essencial para essa redução de custos, uma vez que representa uma parcela significativa dos mesmos. Este trabalho trata do Problema de Programação de Veículos e de Tripulantes de Ônibus em que ambas as programações são determinadas simultaneamente e de maneira integrada. É proposta uma heurística baseada em Busca em Vizinhança Variável para a solução desse problema complexo. São apresentados resultados de experimentos computacionais com dados reais de uma empresa de transporte coletivo. Os resultados obtidos comprovam a eficiência da abordagem integrada em comparação com três outras abordagens encontradas na literatura.

ABSTRACT

In most Brazilian cities, bus has become the main, and oftentimes the only mean of public transportation. In order to cope with the decline of bus usage in many cities, several measures must be taken, including an effort to reduce overall costs and, as a result, fares paid by the users. In this context, an efficient scheduling of vehicles and crews is essential to achieve cost reduction, since it accounts for a major part of overall costs. In this paper we deal with the Bus Vehicle Crew Scheduling Problem in which bus and crew schedules are simultaneously determined in an integrated fashion. We propose a heuristic based on Variable Neighborhood Search (VNS) to solve this complex integrated problem. Computational results for real-world problems are presented, showing the effectiveness of this novel approach in comparison with other three approaches found in the literature.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, o transporte coletivo urbano por ônibus é o principal meio de transporte público utilizado pelas pessoas nos seus deslocamentos para realização das suas atividades diárias cotidianas, incluindo trabalho, escola, compras, lazer, etc. Segundo dados do IBGE (2007), cerca de 135 milhões de pessoas vivem nas cidades, o que corresponde a três em cada quatro habitantes de uma população que atinge 180 milhões de habitantes. Destes, cerca de 75% vive em áreas urbanas de médio e grande porte, com mais de 100 mil habitantes, e que possui algum tipo de transporte público urbano, normalmente o transporte coletivo por ônibus. De acordo com dados da ANTP - Associação Nacional dos Transportes Públicos (2007), o transporte por ônibus atende aproximadamente 95% dos deslocamentos urbanos, contando com uma frota de 95 mil veículos.

Por outro lado, existe uma percepção mais ou menos generalizada entre os diversos agentes, poder público, operadoras e usuários, que o transporte coletivo urbano por ônibus enfrenta dificuldades, consubstanciada por uma perda de demanda e de produtividade. Segundo dados recentes da NTU – Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos, na média nacional, os sistemas de transporte público transportam hoje cerca de 35% menos passageiros do que transportavam em 1995. Contribuem para essa situação diversos fatores, entre os quais o crescimento do transporte clandestino através de peruas e vans, os crescentes congestionamentos urbanos e a falta de prioridade para o transporte coletivo, o valor elevado

das tarifas, entre outros.

A tarifa no transporte coletivo por ônibus corresponde ao valor pago pelos usuários, ou a contrapartida financeira dos usuários, pelos serviços ofertados. No Brasil, é sempre definida pela autoridade governamental que opera, diretamente ou por delegação, o serviço de transporte público, e determinada com base no custo médio por passageiro pagante transportado, apurado através de uma planilha tarifária. Dentre os itens que compõem o custo da tarifa, os custos da frota de veículos (englobando depreciação e remuneração de capital) e salário das tripulações (motoristas e cobradores), em conjunto com o custo do combustível, representam uma parcela significativa do valor total da tarifa, que pode atingir até cerca de 70%. Assim, uma alocação eficiente dos veículos às linhas, de forma a atender à programação de viagens em cada linha, e das tripulações aos veículos, são essenciais para a obtenção de uma tarifa justa, privilegiando os usuários do transporte público, na sua maioria pessoas de baixa renda, que não dispõem de outra alternativa para seus deslocamentos diários. Adicionalmente, um sistema de transporte coletivo eficiente corresponde a uma importante alternativa para a melhoria da qualidade de vida nos centros urbanos, pois permite reduzir as viagens realizadas por automóvel, acarreta diminuição dos congestionamentos, da poluição ambiental, dos acidentes e da queima de combustíveis fósseis que contribuem para o aquecimento global.

Nesse contexto, o presente artigo trata do problema de programação de veículos e tripulantes no transporte coletivo por ônibus urbano. Trata-se de um problema complexo, em que o número de possibilidades e combinações é muito elevado, dificultando uma programação manual de maneira eficiente, buscando otimizar os custos de mão-de-obra e dos veículos. É proposta uma nova abordagem inédita, baseada na metaheurística VNS (*Variable Neighborhood Search*), que permite considerar de maneira integrada a programação de veículos e tripulações. Essa abordagem integrada é testada considerando-se dados reais do transporte coletivo, e comparada com outras abordagens clássicas, em que os problemas são resolvidos de forma sequencial e independente.

Este artigo está organizado da seguinte forma: na próxima seção é apresentado o problema de programação de veículos e tripulantes, seguindo-se, na seção 3, a descrição detalhada da metaheurística proposta. Na seção 4 são relatados os resultados dos experimentos computacionais realizados, seguindo-se, na seção 5, as considerações finais.

2. O PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO DE VEÍCULOS E TRIPULANTES

Em um sistema de transporte coletivo urbano por ônibus, o planejamento operacional e a programação dos serviços, incluindo veículos e tripulantes (motoristas e cobradores), são, devido à sua grande complexidade, geralmente decompostos em quatro etapas, conforme mostrado na Figura 1.

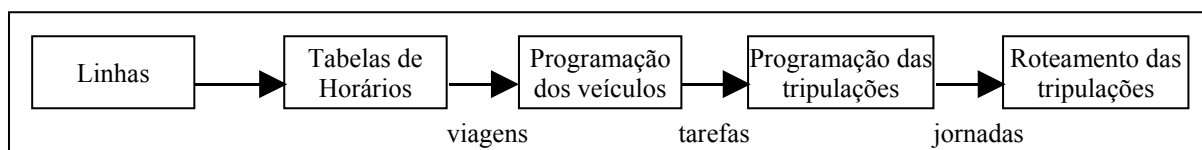


Figura 1: Relação entre as operações no sistema de transporte público

As decisões sobre a estrutura dos serviços, isto é, as linhas que compõem cada serviço, seus

respectivos itinerários e frequências, assim como o tipo de veículo utilizado, são de atribuição do poder público, e tomadas com base nas demandas de passageiros, nos serviços requeridos, na infra-estrutura viária disponível e nas condições de tráfego e de circulação dos veículos. Como resultado, define-se uma Ordem de Serviço de Operação (OSO) para cada linha, contendo todas as informações operacionais, incluindo itinerários de ida e volta, pontos terminais, frota a ser alocada, e tabela de viagens, que indica as viagens correspondentes a cada horário e respectivos locais de partida e de chegada. Com base nas programações a serem cumpridas, cabe à empresa operadora a programação de veículos e de tripulantes.

O problema de programação dos veículos (PPV) consiste em definir quantos e quais veículos serão utilizados nas linhas a serem operadas, bem como a alocação de cada veículo às viagens diárias programadas. Como resultado, obtém-se, para cada veículo, o chamado “bloco”, ou seja, o conjunto de viagens designadas a cada veículo ao longo do dia, começando e terminando na garagem, sua seqüência, e todos os aspectos espaciais e temporais relacionados, incluindo locais e horários de partidas e chegadas das viagens a serem realizadas, assim como os eventuais percursos ociosos nos deslocamentos entre viagens consecutivas. Cada bloco mostra também as Oportunidades de Troca (OT). Uma OT é um intervalo de tempo suficiente, em um ponto apropriado, para haver a troca das tripulações.

O problema de programação dos tripulantes (PPT) consiste em formar tarefas a partir dos blocos dos veículos e atribuir essas tarefas aos tripulantes, definindo assim as jornadas de trabalho dos tripulantes. Cada tarefa é um conjunto de viagens compreendidas entre duas OT's: uma no início e outra no final da tarefa. Assim, durante a realização da tarefa, não é possível que haja troca de tripulação. Uma tarefa corresponde à chamada escala de um tripulante (ou de uma dupla, motorista/cobrador). A programação de uma tripulação é formada por um conjunto de tarefas, denominado jornada. As jornadas podem ser divididas em dois tipos: pegada simples ou dupla pegada, conforme o tempo ocioso existente entre as tarefas. No primeiro tipo, as tarefas são realizadas de uma única vez e os intervalos de tempo entre as tarefas são inferiores a duas horas. Caso ocorra um intervalo igual ou superior a duas horas, a jornada é classificada como do tipo dupla pegada. Este intervalo não é contabilizado na remuneração da tripulação, que fica liberada durante este tempo. Após o término do intervalo, o tripulante deve retornar ao trabalho para realizar as tarefas remanescentes.

Ao se reunir as tarefas formando as jornadas (ou escalas), deve-se levar em conta inúmeras restrições operacionais e trabalhistas. Restrições trabalhistas são impostas pelo governo e sindicatos, já as operacionais representam a gestão da empresa e acordo entre ela e seus funcionários. Essas restrições podem ser classificadas em dois tipos: restrições essenciais, ou seja, aquelas de caráter obrigatório e que devem ser satisfeitas para gerar uma escala viável; e restrições não essenciais, aquelas cujo atendimento melhoram a qualidade da escala gerada, mas que, se não satisfeitas, não geram escalas inviáveis.

A diferença entre a escala de tripulantes e o rodízio de tripulantes é que a primeira refere-se à programação de um dado dia, que pode ser dia útil, sábado ou domingo, e o segundo termo refere-se à programação individual para um período maior, normalmente um mês, considerando folgas, descansos aos domingos e férias, respeitando a legislação trabalhista.

O Problema de Programação Integrada dos Veículos e Tripulantes (PPVT) consiste em resolver simultaneamente o PPV e o PPT, isto é, atribuir as viagens a cada um dos veículos e

as tarefas a cada um dos tripulantes, de tal modo que, o custo operacional total seja mínimo.

Na maioria das situações práticas, a programação dos veículos afeta a programação das tripulações e vice-versa. Por exemplo, um veículo que possua um maior número de oportunidades de troca, permite uma maior flexibilidade na programação dos tripulantes e, conseqüentemente, uma possível redução do custo operacional desta tripulação. Portanto pode-se presumir que uma abordagem integrada do problema pode proporcionar melhores resultados que uma abordagem seqüencial, em que geralmente é feita primeiro a programação dos veículos e depois da tripulação. Entretanto, devido à complexidade das formulações matemáticas que consideram o problema como um todo, a maioria dos trabalhos encontrados na literatura aborda os problemas de forma seqüencial, sendo a resolução integrada dos problemas de programação dos veículos e das tripulações relativamente recente e ainda com poucos trabalhos. Isso se deve à sua magnitude, o que torna a sua resolução fortemente dependente de equipamentos computacionais de grande capacidade.

Segundo Freling *et al.* (1999), os tipos de abordagens para a resolução do problema de programação de veículos e de tripulantes podem ser classificados em: independente, seqüencial e integrada. A abordagem seqüencial pode ser subdividida em tradicional e inversa, enquanto que a abordagem integrada pode ser subdividida em nível 1 e nível 2.

A abordagem tradicional foi a primeira a ser utilizada e consiste em resolver o PPV e posteriormente o PPT. A abordagem seqüencial inversa é uma variação desta, a qual consiste em inverter a ordem de resolução dos problemas, isto é, resolver primeiramente o PPT e em seguida o PPV (Marinho *et al.*, 2004; Silva *et al.*, 2004; Souza *et al.*, 2004; Atzingen, 2006).

Na abordagem independente, a programação dos veículos é resolvida ignorando-se a programação dos tripulantes; na seqüência, a programação dos tripulantes é determinada independentemente dos resultados obtidos pela programação dos veículos. O grande problema dessa abordagem é que os resultados obtidos resultam, na maioria dos casos, inviáveis do ponto de vista prático, pois apesar de se obter a solução ótima para o PPV e para o PPT, dificilmente essas duas soluções são compatíveis entre si, o que impede a sua aplicação (Freling *et al.*, 1999).

A abordagem integrada começou a ser estudada mais recentemente, tendo em vista a evolução dos computadores, uma vez que devido à sua grande complexidade, o custo computacional desta abordagem era proibitivo. Existem dois níveis de abordagem integrada, o primeiro consiste em resolver simultaneamente a programação dos veículos e dos tripulantes, o qual é um problema complexo devido às suas grandes dimensões. Existem alguns modelos computacionais para a sua resolução que não podem ser aplicados a problemas de grandes dimensões devido às limitações computacionais existentes (Freling *et al.*, 1999; Friberg e Haase, 1999; Haase *et al.*, 2001). Huisman e Wagelmans (2006) apresentam resultados de um modelo matemático exato que considera o primeiro nível de abordagem integrada para problemas com aproximadamente 300 viagens diárias. Entretanto, esse número é bastante reduzido considerando-se o porte típico de uma empresa de ônibus no Brasil, que normalmente é responsável por mais de 1.000 viagens diárias; como o PPVT corresponde a um problema de natureza combinatória, em que o número de combinações, em termos de blocos de veículos e escalas de tripulantes, cresce exponencialmente com o tamanho do problema, torna-se impossível resolver instâncias reais através de modelos exatos de

programação linear inteira usando os pacotes (“*solvers*”) disponíveis comercialmente.

O segundo tipo de abordagem integrada é baseado na resolução do PPV considerando características dos tripulantes de tal forma que, a programação dos tripulantes é facilitada pela programação dos veículos. Os artigos científicos encontrados na literatura mostram diversos casos de aplicação deste tipo de abordagem a problemas com dados reais (Freling *et al.* 2001, Freling *et al.*, 2003, Huisman *et al.*, 2001, Huisman *et al.*, 2003, Huisman e Wagelmans, 2004; Atzingen, 2006; Atzingen *et al.*, 2006).

De acordo com Freling *et al.* (2003), a abordagem integrada do PPT e do PPV sempre permitirá obter resultados superiores ou iguais aos resultados da abordagem seqüencial, e resultados inferiores ou iguais aos resultados da abordagem independente, tendo em vista que essa última considera cada problema de forma independente, e leva a soluções inviáveis. Entretanto, a abordagem independente é útil, pois permite determinar os limitantes inferiores para a solução ótima do PPVT.

Em Atzingen (2006) foi proposta uma metodologia para resolver o PPVT, na qual é utilizado o segundo tipo de abordagem integrada, isto é, considera que a programação dos veículos deve levar em conta características pertinentes aos tripulantes como tempo de folga e hora extra. Desta forma, é obtida uma programação dos veículos capaz de facilitar a resolução da programação dos tripulantes reduzindo o custo operacional total.

3. METAHEURÍSTICA DE BUSCA EM VIZINHANÇA VARIÁVEIS PARA O PPVT

Tendo em vista ser o PPVT um problema de natureza combinatória, cujo tempo de processamento é não polinomial, ou seja, cresce exponencialmente com o tamanho do problema, e tendo em vista que as instâncias reais encontradas na prática, em particular no caso do transporte coletivo urbano por ônibus no Brasil representarem mais de mil viagens a serem realizadas por dia, torna-se necessária uma abordagem heurística para a sua solução, uma vez que os algoritmos exatos, apesar de todos os avanços, são incapazes de obter soluções ótimas, mesmo em tempos de processamento elevados.

Estratégias de solução heurísticas apóiam-se, em geral, em alguma abordagem intuitiva, na qual a estrutura particular do problema pode ser considerada e explorada de forma inteligente, a fim de se obter uma solução satisfatória, e considerando-se o compromisso qualidade versus esforço computacional para obtê-la (Silver, 2004). Segundo Cunha (2006), O termo *metaheurística*, introduzido pela primeira vez por Glover (1986), é a união de duas palavras gregas: *heurística*, derivada do verbo *heuriskein* ($\epsilon\upsilon\rho\iota\sigma\kappa\epsilon\iota\upsilon$), que significa “encontrar”, e o sufixo *meta*, que significa “além, acima” (no sentido de superior). Assim, as metaheurísticas podem ser definidas como as estratégias e técnicas mais recentes e avançadas, que guiam outras heurísticas a fim de se encontrar soluções melhores, ultrapassando o ponto de parada das heurísticas tradicionais. Segundo Ernst *et al.* (2004) o termo metaheurística define qualquer algoritmo que segue uma regra de trabalho, a qual é adaptada para cada tipo de problema a ser resolvido. Isto inclui qualquer método de busca local que aplica técnicas complexas para explorar ou guiar buscas em uma vizinhança. As metaheurísticas são consideradas como algoritmos inteligentes e, portanto fazem parte da área de inteligência artificial ou inteligência computacional para otimização (Ernst *et al.*, 2004). Entre as metaheurísticas mais conhecidas e amplamente utilizadas com sucesso pode-se citar, entre outras, algoritmos genéticos, busca tabu, têmpera simulada (*simulated annealing*), busca em

vizinhança de grande porte (do inglês “*very large-scale neighborhood search*”), GRASP (“*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*”), busca em vizinhança variável (do inglês “*variable neighborhood search - VNS*”) e “*scatter search*”.

Neste trabalho propõe-se o método de busca em vizinhança variável, ou simplesmente VNS, para a resolução do problema integrado de veículos e tripulantes. O VNS é um método de busca local que consiste em explorar o espaço de soluções através de trocas sistemáticas de estruturas de vizinhança. Contrariamente a outras metaheurísticas baseadas em métodos de busca local, o método VNS não segue uma trajetória, mas sim explora vizinhanças gradativamente mais “distantes” da solução corrente e focaliza a busca em torno de uma nova solução se, e somente se, um movimento de melhora é realizado. O método também inclui um procedimento de busca local a ser aplicado sobre a solução corrente. Esta rotina de busca local também pode usar diferentes estruturas de vizinhança.

As soluções vizinhas ou vizinhança de uma solução são todas as modificações que podem ser feitas em na solução corrente, ou solução atual, de tal forma a gerar uma nova solução distinta. Uma estrutura de vizinhança é uma forma pré-determinada de se percorrer o espaço de soluções vizinhas à solução corrente. O pseudocódigo desta metaheurística é apresentado pela Figura 2. Detalhes desse algoritmo são apresentados em Mladenovic & Hansen (1997).

```

Início VNS
1. Seja  $s_0$  uma solução inicial e  $r$  o número de estruturas de vizinhança;
2.  $s \leftarrow s_0$ ;
3. Enquanto tempo < tempo_máximo faça
4.    $k \leftarrow 1$ ;
5.   enquanto ( $k \leq r$ ) faça
6.     Gere um vizinho qualquer  $s' \in N^{(k)}(s)$ ;
7.      $s'' \leftarrow \text{BuscaLocal}(s')$ ;
8.     Se  $f(s'') < f(s)$  então  $s \leftarrow s''$ ;  $k \leftarrow 1$ ;
9.     senão  $k \leftarrow k + 1$ ;
10.    Fim-se;
11.  Fim-enquanto;
12. Fim-enquanto;
13. Retorne  $s$ ;
Fim VNS

```

Figura 2: Pseudocódigo da metaheurística VNS.

No VNS, parte-se de uma solução inicial qualquer e, a cada iteração, seleciona-se aleatoriamente um vizinho s' dentro da vizinhança $N^{(k)}(s)$ obtida através da estrutura de vizinhança de ordem k ($1 \leq k \leq r$) a partir da solução s corrente. Esse vizinho s' é então submetido a um procedimento de busca local. Se a nova solução obtida s'' , resultante dessa busca local, for melhor que a solução s corrente, isto é, $f(s'') < f(s)$, a busca prossegue a partir da nova solução encontrada s'' , reiniciando a partir da primeira estrutura de vizinhança $N^{(1)}(s)$. Caso contrário, a busca prossegue a partir da próxima estrutura de vizinhança $N^{(k+1)}(s)$. Este procedimento é encerrado quando uma condição de parada for atingida, tal como o tempo máximo de processamento computacional, o número máximo de iterações ou número máximo de iterações consecutivas sem melhorias. A solução s' é gerada aleatoriamente no passo 6 do pseudocódigo da Figura 2, de forma a evitar ciclagem, situação que pode ocorrer caso alguma regra determinística seja utilizada.

Para a aplicação do VNS, é necessária a geração de uma solução inicial, que no caso do PPVT é obtida através de uma heurística construtiva, cujo pseudocódigo é apresentado pela Figura 3. A heurística construtiva para a geração da solução inicial atribui cada viagem ao veículo disponível, isto é, não alocado mais próximo do local de início dessa viagem; após todas as viagens terem sido atribuídas a algum veículo, a heurística divide estas viagens em tarefas e atribui cada tarefa à tripulação livre mais próxima do local de realização desta tarefa.

Início *Gera Solução Inicial para o PPVT*

1. Para cada viagem *i* faça
2. Veículo livre mais próximo \leftarrow viagem *i*;
3. Fim-para;
4. Para cada veículo *j* faça
5. Para cada viagem *i* faça
6. Se (tempo_troca_trip < tempo_min)
7. então tarefa *k* \leftarrow viagem [*i*] + viagem [*i*+1]; *k*++;
8. senão tarefa *k* \leftarrow viagem [*i*]; *k*++;
9. Fim-se;
10. Fim-para;
11. Fim-para;
12. Para cada tarefa *k* faça
13. tripulação livre mais próxima \leftarrow tarefa *k*;
14. Fim-para;

Fim *Gera Solução Inicial para o PPVT*

Figura 3: Pseudocódigo da heurística construtiva.

No PPVT, a vizinhança do espaço de solução é explorada (passo 6) considerando quatro estruturas de vizinhança:

- i. PPV – movimento de realocação, que consiste em atribuir uma viagem de um veículo a outro veículo, conforme ilustrado na Figura 4;
- ii. PPV – movimento de troca, consiste em trocar uma viagem de um veículo com outra viagem de outro veículo, conforme ilustrado na Figura 5;
- iii. PPT – movimento de realocação, que consiste em atribuir uma tarefa de um tripulante a outro tripulante de maneira análoga ao movimento ilustrado na Figura 4;
- iv. PPT – movimento de troca, que consiste em trocar uma tarefa de um tripulante com uma tarefa de outro tripulante, de forma análoga ao movimento ilustrado na Figura 5.

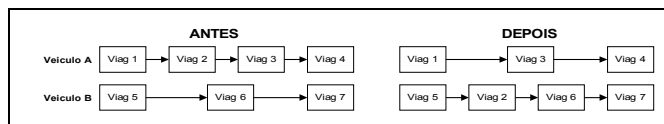


Figura 4: Movimento de Realocação para o PPV

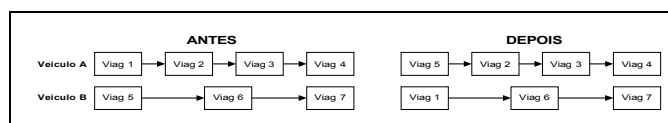


Figura 5: Movimento de Troca para o PPV

As restrições de designação dos veículos e de escala das tripulações são tais que permitem definir o problema através das regras operacionais adotadas pelas empresas, assim como as leis trabalhistas atendidas. Com base na experiência prática e na interação com as empresas operadoras, foram consideradas, no processo de resolução do PPVT as seguintes restrições operacionais ditas *essenciais*, isto é que não podem ser violadas:

Para os veículos:

- Um veículo não pode realizar duas viagens ao mesmo tempo, isto é, não pode haver sobreposição de viagens;
- Um veículo deve iniciar e terminar a sua jornada diária de trabalho na garagem;
- Um veículo não pode ficar mais de 23 horas e 30 minutos fora da garagem por dia;
- Para um veículo ser considerado como fazendo uma jornada dupla pegada (jornadas compostas por dois períodos de trabalho) deve haver um intervalo entre duas viagens superior a 2 horas somado com o tempo de deslocamento do veículo até a garagem;
- O número de veículos com dupla pegada estará limitado a um determinado valor.

Para as tripulações:

- Uma tripulação não pode realizar mais de uma tarefa ao mesmo tempo, ou seja, não pode haver sobreposição de tarefas;
- As trocas das tripulações só podem ocorrer nas Oportunidades de Trocas, ou seja, em determinados pontos e entre viagens com mais do que um dado intervalo de tempo;
- As trocas das tripulações só podem ocorrer entre grupos de linhas predeterminadas, ou seja, grupos de linhas com as mesmas características;
- Existem dois tipos de jornadas ditas pegada simples e dupla pegada. A jornada tipo pegada simples tem duração de 7 horas e 10 minutos com direito a uma pausa para descanso e/ou alimentação. A dupla pegada tem duração total de 6 horas e 40 minutos dividida em duas etapas separadas por pelo menos duas horas de interrupção. Neste caso a tripulação não tem direito a pausa para descanso/alimentação;
- A pausa na jornada do tipo pegada simples deve ser no mínimo de 30 minutos podendo este intervalo ser fracionado, desde que pelo menos um deles seja maior ou igual a 15 minutos;
- O número de tripulações com dupla pegada deve estar limitado a um certo valor;
- As jornadas de trabalho podem ser acrescidas de até duas horas extras.

As restrições ditas *não-essenciais*, isto é, que correspondem a características desejáveis da programação resultante da resolução do PPVT são:

Para os veículos:

- O tempo ocioso de um veículo deve ser minimizado;
- O número de veículos utilizados deve ser o menor possível;
- O número de vezes que um veículo realiza uma troca de linha deve ser mínimo;
- O tempo total de viagem vazia, ou seja, de viagem estando o veículo fora de operação deve ser o menor possível.

Para as tripulações:

- O tempo ocioso de uma tripulação deve ser o menor possível;
- O número de horas extras deve ser minimizado;
- O número de tripulações deve ser mínimo;
- O número de vezes que uma tripulação troca de veículo deve ser reduzido;

▪O número de vezes que uma tripulação com dupla pegada finaliza a primeira pegada em um ponto e inicia a segunda pegada em um outro ponto deve ser reduzido.

3.1. Função de avaliação

A função de avaliação, ou função objetivo, serve para avaliar a qualidade de uma solução vizinha obtida através de um movimento realizado por uma das estruturas de vizinhança utilizada pela metaheurística VNS. Além dos atributos clássicos da programação, medidos pelo número de veículos utilizados e número de tripulantes alocados, a função objetivo proposta visa avaliar uma solução para o PPVT que leva em conta a penalização de cada uma das restrições essenciais e não-essenciais que forem infringidas. Para cada restrição infringida é atribuído um peso numérico conforme a importância daquela restrição para a empresa de transporte coletivo, ou seja, a função objetivo não representa um valor monetário para o custo operacional de uma determinada programação, mas determina um valor numérico representativo da qualidade de cada solução para o PPVT. A qualidade de uma solução não é determinada somente pelo custo operacional, mas também depende de fatores inerentes a sua aplicabilidade como, por exemplo, a quantidade de vezes que um veículo ou um tripulante pode alternar entre duas linhas de ônibus distintas.

Assim, a função objetivo proposta é dada pelo somatório dos produtos dos pesos pelas restrições essenciais e não essenciais. Os pesos utilizados na função objetivo foram calculados conforme uma expressão matemática na qual o valor do peso aumenta conforme a violação da restrição. Por exemplo, caso exista uma sobreposição de viagens de 3 minutos, o peso desta violação será de 50 unidades por minuto de sobreposição, aumentando o valor da função objetivo em 150 unidades. Caso esta sobreposição de viagens seja de 20 minutos, o peso será de 80 unidades, aumentando o valor da função objetivo em 1.600 unidades.

Os valores dos pesos variam dentro de uma faixa entre 1 e 50 unidades para as restrições não essenciais e entre 50 e 100 unidades para as restrições essenciais. A faixa de valores é um dado de entrada para o PPVT, definida em conjunto com a empresa a partir das características desejáveis para a solução e ajustada empiricamente de acordo com a realidade local. Por exemplo, caso a empresa julgue importante reduzir o número de vezes que uma tripulação muda de veículo durante a jornada de trabalho, esta restrição possuirá um peso maior na função objetivo. Esse tipo de abordagem é fundamental para permitir gerar programações de veículos e tripulantes que sejam consideradas viáveis pelos operadores do transporte público.

4. EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

A abordagem integrada baseada em VNS para o PPVT proposta neste trabalho foi testada com dados reais de uma empresa de transporte coletivo de uma grande cidade brasileira e comparada com os resultados obtidos pelas abordagens convencionais descritas acima. Os testes foram realizados em um total de 24 problemas diferentes, os quais contêm as programações de viagens a serem realizadas em três tipos de dias: úteis, sábados e domingos.

Neste estudo de caso tanto o dimensionamento da frota quanto a programação foram desenvolvidos por iniciativa do órgão de gestão do transporte coletivo. Entretanto, a abordagem proposta é aplicável tanto a casos em que essas tarefas são de atribuição do poder público, quanto em situações em que o poder público define apenas a programação horária de cada a linha e a frota necessária para operá-la, cabendo à empresa operadora decidir todo o detalhamento da alocação/utilização da frota, bem como a programação de pessoal, de acordo

com os limites impostos pela legislação em vigor.

Foram considerados 8 problemas diferentes (cada um referente a uma garagem) para cada tipo de dia. O conjunto de problemas relativos aos dias úteis compreende um total de 3.654 viagens diárias, enquanto que os conjuntos relativos ao sábado e domingo correspondem a 2.613 e 1.914 viagens diárias, respectivamente.

A solução obtida pela abordagem independente possui o menor valor para a função objetivo e também o menor número de veículos e o menor número de tripulações, para todos os tipos de dias (útil, sábado e domingo) programados. Entretanto, a solução obtida pela abordagem independente não pode ser utilizada na prática, pois a programação dos veículos não é compatível com a programação dos tripulantes e, portanto, serve apenas como referência para os limitantes inferiores em termos de necessidades de veículos e tripulações.

Tabela 1: Resultados Obtidos para o Dia Útil

	Integrada	Seqüencial Tradicional	Seqüencial Inversa	Independente
Função Objetivo	658.634	978.682	993.760	533.118
Nº de veículos	306	305	313	304
Nº de tripulações	574	584	575	569
Viagem Morta (hh:mm)	268:30	260:43	289:57	249:49
Hora Extra (hh:mm)	12:56	23:35	00:03	00:29

A Tabela 1 apresenta o sumário dos resultados correspondente aos oito problemas para o dia útil. Pode-se observar que a solução para o PPVT obtida pela abordagem integrada consegue realizar as 3.654 viagens diárias utilizando 1 veículo a mais e 10 tripulações a menos que a abordagem seqüencial tradicional, além de proporcionar um menor número de horas extras. Os resultados também são superiores ao da programação seqüencial inversa, tanto em termos de veículos (7 a menos) quanto tripulantes (1 a menos). Entretanto, esta solução requer um maior tempo de deslocamento vazio (viagens mortas) que a programação seqüencial tradicional, e mais horas extras que a programação seqüencial inversa, como formas de permitir reduções no número de veículos e de tripulantes.

Note que os limitantes inferiores, quanto ao número mínimo de veículos necessários é 304 e de tripulantes é 569, obtidos através da programação independente, ambos muito próximos dos resultados obtidos, embora essas programações não sejam factíveis na prática, tendo em vista que a programação dos veículos não é compatível com a programação dos tripulantes.

Tabela 2: Resultados Obtidos para o Sábado

	Integrada	Seqüencial Tradicional	Seqüencial Inversa	Independente
Função Objetivo	412.198	441.935	456.302	396.755
Nº de veículos	179	180	183	178
Nº de tripulações	358	365	353	352
Viagem Morta (hh:mm)	113:25	114:21	128:16	113:25
Hora Extra (hh:mm)	03:20	01:53	05:36	04:37

Os resultados obtidos para a programação do sábado são apresentados na Tabela 2. Esses resultados mostram que a melhor solução para o PPVT é obtida pela abordagem integrada, cujo valor da função objetivo é inferior aos valores obtidos pelas demais abordagens. A solução obtida pela abordagem integrada utiliza 179 veículos e 358 tripulações para realizar

2.613 viagens e, também apresenta o menor tempo de viagem vazia para os veículos.

Tabela 3: Resultados Obtidos para o Domingo

	Integrada	Seqüencial Tradicional	Seqüencial Inversa	Independente
Função Objetivo	353.196	379.564	381.310	271.187
Nº de veículos	113	113	123	113
Nº de tripulações	272	273	226	226
Viagem Morta (hh:mm)	89:29	78:25	84:27	78:56
Hora Extra (hh:mm)	01:38	03:29	27:49	27:49

A Tabela 3 apresenta o sumário dos resultados obtidos para o domingo, o dia que corresponde ao menor número de viagens (1.914). É possível observar que nestes resultados, a diferença entre as soluções obtidas pelas diferentes abordagens é menor. No entanto, a abordagem integrada ainda apresenta a melhor solução para a programação dos veículos e dos tripulantes. Observe que quanto maiores forem as dimensões do problema maior é a capacidade da abordagem integrada reduzir os custos operacionais em relação às abordagens seqüenciais.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho abordou o problema de programação integrada de veículos e tripulantes no contexto do transporte coletivo urbano por ônibus. Trata-se de um problema relevante, tendo em vista não só a perspectiva de redução de custos para as empresas operadoras, como também a possibilidade de redução das tarifas pagas pelos usuários, buscando, assim, contribuir para evitar ou reduzir a perda de demanda de passageiros que vem sendo observada em muitas cidades.

Uma das dificuldades desse problema é a interação entre a programação dos veículos e dos tripulantes, ou seja, qualquer mudança na programação dos veículos afeta a programação dos tripulantes e vice-versa. Tendo em vista que ambos são problemas complexos, de natureza combinatória, em que o número de possíveis soluções é muito elevado, esses problemas são normalmente resolvidos de maneira seqüencial, não integrada. Buscou-se, nesse trabalho, uma abordagem integrada, em que ambos os problemas são resolvidos simultaneamente, permitindo incorporar diversas restrições que são consideradas pelas empresas para avaliar a viabilidade das programações, entre as quais, por exemplo, trocas de linhas por um veículo, trocas de veículo por uma tripulação, duplas pagadas, entre outras.

Para tanto, foi proposta uma estratégia de solução baseada na metaheurística Busca em Vizinhança Variável (VNS), e aplicada a instâncias de problemas reais encontrados na prática. Os resultados obtidos indicam que essa abordagem se mostrou adequada e comprovou ser eficiente para a aplicação em problemas de grandes dimensões, os quais podem ser aplicados na prática à realidade das cidades brasileiras, permitindo reduzir os custos operacionais do sistema de transporte público. Também ficou evidente que problemas de maior dimensão em termos do número de viagens diárias a serem realizadas, maior será a interação entre a programação dos veículos e a programação dos tripulantes e, conseqüentemente, maior será a possibilidade de redução dos custos operacionais.

A abordagem integrada do PPVT é uma tendência atual e que deve continuar a ser explorada pelos autores deste artigo através da elaboração de novas estruturas de vizinhança visando uma melhor exploração do espaço de soluções, bem como a adaptação do programa implementado a realidade de outras grandes cidades brasileiras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Nacional dos Transportes Públicos (2007). Disponível na internet via www. URL: <http://www.antp.org.br/>. Acessado em 10/06/2007.
- Atzingen, J. (2006) *Técnicas de otimização aplicadas à programação diária de veículos e de tripulações de ônibus*. 1. ed. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto. 70 p.
- Atzingen, J.; Silva, G. P.; Souza, M. J. F. (2006) Otimização integrada no sistema de transporte público. In: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, XX, Brasília. *Anais do XX ANPET*. v. II, p. 717-728.
- Cunha, C. B. (2006) *Contribuição à Modelagem de Problemas em Logística e Transportes*. 315p. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo.
- Ernst, A. T., et al. (2004) An annotated bibliography of personnel scheduling and rostering. *Operations Research*, v. 127, p. 21-144.
- Freling, R.; Wagelmans, P.; Paixão, M. (1999) An overview of models and techniques for integrating vehicle and crew scheduling. *Computer-Aided Transit Scheduling*, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, v. 471, p. 441-460.
- Freling, R.; Huisman, D.; Wagelmans, A. (2001) Applying an integrated approach to vehicle and crew scheduling in practice. *Computer-Aided Transit Scheduling of Public transport*, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, v. 505, p. 73-90.
- Freling, R.; Huisman, D.; Wagelmans, A. (2003) Models and algorithms for integration of vehicle and crew scheduling. *Journal of Scheduling*, Holanda, v. 6, n. 1, p. 63-85.
- Friberg, C.; Haase, K. An exact branch and cut algorithm for the vehicle and crew scheduling problem. *Computer-Aided Transit Scheduling*, Berlim, p. 63-80. 1999.
- Haase, K.; Desaulniers, G.; Desrosiers, J. (2001) Simultaneous vehicle and crew scheduling in urban mass transit systems. *Transportation Science*, v. 35, n. 3, p. 286-303.
- Huisman, D.; Freling, R.; Wagelmans, A. P. M. (2001) A dynamic approach to vehicle scheduling. *Econometric Institute Report*, v. 2.
- Huisman, D.; Freling, R.; Wagelmans, A. P. M. (2003) Multiple-depot integrated vehicle and crew scheduling. *Econometric Institute Report*, v. 2.
- Huisman, D.; Wagelmans, A. P. M. (2004) A solution approach for dynamic vehicle and crew scheduling. *Econometric Institute Report*, v. 2.
- Huisman, D.; Wagelmans, A. P. M. (2006) A solution approach for dynamic vehicle and crew scheduling. *European Journal of Operational Research*, n. 172, p. 453-471.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2007). Disponível na internet via www. URL: <http://www.ibge.gov.br/home/>. Acessado em 12/06/2007.
- Mladenovic, N.; Hansen, P. (1997) Variable neighborhood search. *Computers and Operations Research*, v. 24, p. 1097 – 1100.
- Marinho, E. H., et al. (2004) Busca Tabu Aplicada ao Problema de Programação de Tripulações de Ônibus Urbano. In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, XXXVI, 2004, São João Del Rei. *Anais do XXXVI SBPO*. p. 1471-1482.
- Silva, G. P.; Souza, M. J. F.; Atzingen J. (2004) Um Método Híbrido de Geração de Colunas para Otimizar a Mão de Obra do Sistema de Transporte Público. In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, XXXVI, 2004, São João Del Rei. *Anais do XXXVI SBPO*. p. 1989-1995.
- Silver, E.A. (2004) An overview of heuristic solution methods. *Journal of the Operational Research Society* n. 55(9), p. 936-956.
- Souza, M.J.F., et al. (2004) Metaheurísticas aplicadas ao Problema de Programação de Tripulações no Sistema de Transporte Público, *Tendências em Matemática Aplicada e Computacional*, v. 5, n. 12, p. 357-368.

Jorge von Atzingen (jorge.reis@poli.usp.br)

Cláudio Barbieri da Cunha (cbcunha@usp.br)

Gustavo Peixoto Silva (gustavo@iceb.ufop.br)

Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

Av. Prof. Almeida Prado, trav. 2, n 83 – São Paulo, SP, Brasil., CEP 05508-900