Um Novo Enfoque para a Atribuição de Escalas de Serviço de Longa Duração em Empresas de Transporte

Fábio Gavião
Faculdade de Administração e Informática – FAI
Santa Rita do Sapucaí, MG
gaviao_tsi@uol.com.br

Luiz A.N. Lorena
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/LAC
São José dos Campos, SP
lorena@lac.inpe.br

Edson L.F. Senne
Universidade Estadual Paulista – UNESP/FEG
Guaratinguetá, SP
elfsenne@feg.unesp.br

Resumo

Este trabalho descreve uma nova heurística para a resolução de problemas de atribuição de escalas de serviço de longa duração para empresas de transporte. Problemas desta natureza são classificados como NP-Hard devido ao seu grau de complexidade. A abordagem procura reduzir a complexidade elaborando modelos mais simples que são resolvidos em etapas seqüenciais e com realimentação até que um critério de otimização seja atingido.

Palavras-chave: *problema de escalonamento de pessoal, escalas de serviço, escalas de folga, cobertura de conjuntos, problema de atribuição.*

1. Introdução

O problema de escalonamento de pessoal (PEP) em empresas de transporte consiste na criação e atribuição de escalas de serviços a funcionários, dentro de um período de tempo pré-estipulado. Trata-se de um problema estudado há mais de 50 anos (Ernst *et al*., 2004b), e classificado como *NP-Hard* (Karp, 1972; Shen e Kwan, 2001). A solução deve atender a todas as restrições operacionais e trabalhistas e a objetivos da empresa, tais como: atender a demanda de serviços exigida pelo seu mercado, porém ao menor custo possível e procurando satisfazer os funcionários envolvidos. Grande parte dos trabalhos desenvolvidos nesta área tem usado técnicas heurísticas, como geração de colunas (Panton e Ryan, 1999), e metaheurísticas como algoritmos genéticos (Holland, 1975; Go ldberg, 1989; Collin, 1995), busca tabu, (Glover e Laguna, 1997), *simulated annealing* (Kiretal et al., 1983), entre outros.

Ernst *et al*. (2004a) mostram que a tendência para o equacionamento e solução deste problema, por eles denominado de problema de *crew rostering*, tem sido a divisão do problema em subproblemas, os quais são resolvidos de forma independente ou agrupada.

Neste trabalho propõe-se uma nova heurística que equaciona um subproblema de cada vez. levando a uma baixa interação entre as etapas, além de levar em conta a experiência de uma empresa típica da área. O trabalho apresenta o estabelecimento das etapas a serem resolvidas, os conjuntos de dados de entrada e de saída de cada etapa, a forma de combinar os dados intermediários para gerar resultados a serem aproveitados em outras etapas, e a geração de parâmetros para a verificação da qualidade da solução obtida.

2. O problema de escalonamento de pessoal considerado

Neste trabalho, considera-se o PEP para empresas de transporte coletivo interurbano. Assim, é importante estabelecer alguns termos usados nesta área, tais como:

- **Viagem:** é uma tarefa ou trabalho de condução de passageiros de um ponto a outro, tendo horário de embarque e de desembarque a cumprir.
- **Turno diário:** é a combinação de várias viagens visando formar uma seqüência de trabalho para um motorista durante o período de um dia.
- **Jornada:** é equivalente ao turno diário de trabalho de um motorista. As jornadas podem ser de expediente e de folga remunerada.
- **Demanda de jornadas:** é a quantidade de jornadas que devem ser cumpridas por dia na empresa.

- **Escala de serviço:** é uma combinação de uma ou mais jornadas de expediente e folga que pode ser atribuída a um motorista.
- **Escala de folga:** é uma combinação de dias de expediente intercalados por dias de folga que podem ser atribuídos a um motorista.
- **Tipos ou padrões de folga:** são padrões de escalas de folga adotados pela empresa. Por exemplo: 3x1, 4x2, 5x1, etc., onde o primeiro número indica o número de dias consecutivos referentes a escalas de serviço e o segundo número indica o número de dias consecutivos referentes a escalas de folga remunerada.
- **Linhas de serviço:** uma linha de ônibus da empresa, com local e horário de embarque inicial, final e intermediários bem estabelecidos.
- **Motoristas regulares:** são motoristas contratados como funcionários da empresa.
- **Motoristas cobre-turnos:** são motoristas sem vínculo empregatício com a empresa, contratados para prestação de serviços temporários.

3. As etapas de solução do problema

Neste trabalho, propõe-se um método heurístico para resolver o PEP nas seguintes etapas:

- Etapa 1: Determinação do número de escalas de folga (DNEF).
- Etapa 2: Determinação das escalas de serviço viáveis (DESV).
- Etapa 3: Determinação das escalas de serviços definitivas (DESD).
- Etapa 4: Determinação dos pares de escalas de serviço e de folga (DPE).
- Etapa 5: Atribuição dos pares de escalas aos motoristas (APEM).

A Figura 1 ilustra as etapas propostas para a solução do problema.

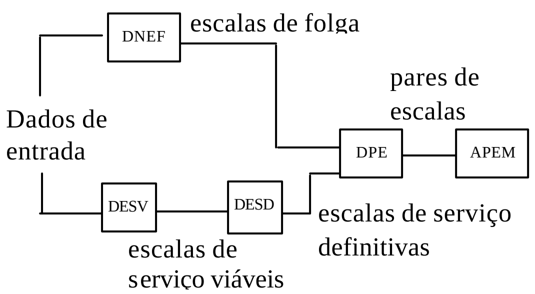

Figura 1. Etapas para solução do PEP

Deve-se observar que as etapas 1 e 2 podem ser desenvolvidas em paralelo, uma vez que estas etapas não dependem uma da outra. Na etapa 4 obtém-se uma solução que deve satisfazer a todos as restrições operacionais e trabalhistas da empresa, além do maior número possível de objetivos da empresa. No entanto observa-se na prática, que o resultado obtido na etapa 4 pode não ser uma boa solução. Por exemplo, quando o número de motoristas encontrado na etapa 4 for maior do que o número de motoristas previstos pela expectativa de demanda usada na etapa 1, a diferença corresponde ao número de motoristas cobre-turnos a serem contratados. Existem alternativas para tentar minimizar o número de motoristas cobre-turnos. A descrição dos métodos utilizados em cada uma das etapas de solução propostas para o PEP é apresentada na seção a seguir.

4. Modelagem e solução dos subproblemas

4.1 A determinação do número de escalas de folga

Nesta etapa, o problema a ser resolvido é o de determinar o número mínimo de motoristas diários para satisfazer a demanda de jornadas da empresa durante um período desejado. Este problema pode ser formulado como um problema de cobertura de conjuntos da forma mostrada a seguir:

$$\text{Min} \sum_{j=1}^{n} x_j, \text{ sujeito a: } \sum_{j=1}^{n} a_{ij} x_j \geq d_i \quad (i = 1, \ldots, m),$$

$a_{ij} \in \{1,0\}$, $x_j \in Z^+$, $d_i \in Z^+$ onde, m é o número de dias da escala; n é a quantidade de padrões de folga da empresa; a_{ij} é a matriz de cobertura, tal que $a_{ij} = 1$ se o dia i for um dia de expediente no padrão de folga j. Caso contrário, ou seja, se o dia i for um dia de folga no padrão de folga j, $a_{ij} = 0$; x_j é a variável de decisão do problema representando o número de escalas de folga de cada padrão de folga da empresa; d_i é a demanda diária de jornadas de trabalho.

4.2 A determinação das escalas de serviço viáveis

Nesta etapa, utiliza-se da teoria de grafos para representar as restrições operacionais e trabalhistas, bem como outros objetivos da empresa (Caprara *et al.*, 1999; Shodi e Norris, 2004; Cappanera e Gallo, 2004). Dois tipos de grafo são usados. O primeiro é um grafo orientado, cíclico, conexo e não capacitado, denominado $G_c(V_c, A_c)$, com conjunto de vértices V_c que representam as jornadas diárias, e com conjunto de arcos A_c que representam as transições de uma jornada para outra. Este grafo, embora seja capaz de representar as restrições sobre intervalo mínimo entre jornadas, mesmo local de embarque e desembarque e pernoite fora do domicílio, não pode representar restrições de caráter temporal do tipo não saltar dias, não fazer mais de uma jornada no mesmo dia, etc. Assim, é necessário transformar o grafo G_c em outro grafo acíclico, orientado, temporal e com os vértices em seqüência. Este grafo, denominado $G_t(V_t, A_t)$, onde V_t é o conjunto de vértices que também representam jornadas, porém numerados seqüencialmente de 1 até a última jornada prevista no último dia da escala, e A_t é o conjunto de arcos que representam as transições de uma jornada para a outra.

O grafo G_t é representado de forma eficiente por duas estruturas de lista entrelaçadas e explorado por um algoritmo recursivo que gera as escalas de serviço respeitando os objetivos da empresa como não exceder um número máximo de horas extras e um número mínimo de horas em haver, bem como algumas regras trabalhistas como não permitir trabalhar mais do que um certo número de dias consecutivos. Ao final da exploração deste grafo obtém-se um conjunto de escalas viáveis que obedecem a todas as restrições operacionais, trabalhistas e parte dos objetivos da empresa.

4.3 A determinação das escalas de serviço definitivas

O problema desta etapa é determinar, dentre as escalas viáveis obtidas na etapa anterior, aquelas que apresentam a menor diferença de duração possível entre si. Esta restrição tem como objetivo satisfazer os funcionários da empresa, pois a menor diferença entre escalas corresponde a um tratamento mais justo entre todos. Este problema também pode ser modelado como um problema de cobertura de conjuntos da forma mostrada a seguir:

Min $\sum_{j=1}^{n} c_j x_j$, sujeito a: $\sum_{j=1}^{n} a_{ij} x_j \geq 1 \ \ (i = 1,..., m)$; $c_j = 1 + |\Delta_j| \ \ (j = 1,..., n)$; $\Delta_j = dr_j - di_j \ \ (j = 1,\ldots,n)$; $x_j \in \{1,0\}$; $dr_j \in Z^+$; $di_j \in Z^+$, onde, dr_j é a duração real da escala j, considerando os dias de folga existentes nesta escala; di_j é a duração ideal da escala prevista pela empresa para obedecer às regras operacionais e trabalhistas; Δ_j é a diferença entre as durações real e ideal; c_j é o custo associado a cada conjunto (observe que ao custo Δ_j acrescenta-se a constante 1 para evitar a ocorrência de colunas de custo nulo); a_{ij} é a matriz de cobertura tal que: $a_{ij} = 1$ se a jornada i é coberta pela escala j. Caso contrário, ou seja, se a jornada não pertence ou não é coberta pela escala j, $a_{ij} = 0$; e x_j é a variável de decisão do problema que representam as escalas escolhidas como definitivas por corresponderem ao conjunto que apresenta a menor variação de duração entre cada escala e cobre pelo menos uma vez a respectiva jornada.

4.4 A determinação dos pares de escalas de serviço e de folga

Algumas regras são usadas para calcular, numa primeira fase, o número de motoristas cobre-turnos, considerando apenas cada escala de expediente e de folga individualmente. Em seguida, é necessário escolher, dentre as diversas possibilidades de combinações, o melhor conjunto de pares de escalas de expediente e de folga. Cada padrão de folga pode ser atribuído a qualquer escala de expediente, mas existe um custo diferente para cada atribuição possível. Assim, deseja-se escolher o conjunto de atribuições com o menor custo possível. Este problema pode ser formulado como um problema de atribuição (Wolsey, 1998) da seguinte maneira: Min $\sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} c_{ij} x_{ij}$, sujeito a $\sum_{i=1}^{m} a_{ij} x_{ij} = 1 \ \ (j = 1,..., n)$ e $\sum_{j=1}^{n} a_{ij} x_{ij} \geq ef_{f_i} \ \ (i = 1,..., m)$, onde: m é a quantidade de padrões de folga com os quais a empresa trabalha (e que já foram determinados na etapa 1); n é o número de pares (escala definitiva, escala de folga); a_{ij} é a matriz de atribuição tal que, $a_{ij} = 1$ se o padrão de folga i puder ser atribuído ao par j e $a_{ij} = 0$, caso contrário.

Devido à natureza do problema, a_{ij} será uma matriz unitária, pois todos os padrões podem ser atribuídos a todos os pares; ef_{f_i} é a quantidade de escalas de folga por cada padrão de folga f_i (variáveis x_i do DNEF); c_{ij} é um vetor de m*n elementos, cada um representando os respectivos custos de se atribuir um padrão de folga i a um par j; x_{ij} é um vetor de m*n elementos, cada um representando uma variável de decisão do problema, tal que $x_{ij} = 1$, se o padrão i deve ser atribuído ao par j e $x_{ij} = 0$, caso contrário.

4.5 A atribuição dos pares de escalas aos motoristas

Encontrados os melhores pares (escala de expediente, escala de folga) e conhecendo o número de motoristas regulares da empresa, que é igual à demanda de jornadas da empresa, pretende-se atribuir cada motorista a um e apenas um par e que cada par tenha apenas um motorista a ele atribuído. Como os motoristas têm afinidades diferentes para cada escala, estima-se um peso a cada atribuição de motorista a um par de escalas. O problema está em determinar o conjunto de atribuições de menor peso. Este problema pode ser formulado como um problema de atribuição clássico (Wolsey, 1998):

Min $\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} c_{ij}x_{ij}$ sujeito a $\sum_{j=1}^{n} x_{ij} = 1 \;\; (i = 1,..., n)$; $\sum_{i=1}^{n} x_{ij} = 1 \;\; (j = 1,..., n)$; e $x \in \{1,0\}$, onde: n é a quantidade de pares obtidos na etapa anterior (que é igual ao número de motoristas); c_{ij} é o peso de atribuir o motorista i ao par j; e x_{ij} é a variável de decisão do problema, tal que $x_{ij} = 1$, se o motorista i for atribuído ao par j na solução final e $x_{ij} = 0$, caso contrário.

A atribuição de pesos, de acordo com critérios da empresa, deve levar em consideração, de um lado, as habilidades de direção que cada trajeto requer e, de outro, as capacidades de cada motorista. A solução deste problema corresponde à solução do PEP.

5. A solução dos modelos

Se a quantidade de pares encontrados na etapa 4 for exatamente igual a f_i (número de escalas de folga), o PEP poderá ser resolvido, em definitivo, na etapa 5 com a atribuição dos pares aos motoristas, pois o número de pares e de motoristas será exatamente o mesmo. Em outras palavras, isto significa que o número de motoristas cobre-turnos será igual a zero e como as escalas obtidas satisfazem a demanda de jornadas da empresa, chega-se a uma solução do problema apenas com o conjunto de motoristas regulares da empresa.

Mas, em geral, isto não ocorre, pois devido ao excedente de motoristas cobre-turnos, a quantidade total de motoristas é maior do que a demanda de jornadas. Neste caso, volta-se à primeira etapa selecionando novos padrões de folga que apresentem maior espaçamento entre os dias de folga, pois, desta forma, as chances de ocorrer motoristas cobre-turnos diminuem. O processamento é então refeito para cada um dos padrões de folga possíveis. O processamento que resultou no menor número total de motoristas (regulares e cobre-turnos) é a melhor solução para o problema. A introdução de padrões de folga artificiais pode ser considerada, caso a empresa não tenha a liberdade de usar alguns dos diversos padrões de folga.

O método heurístico proposto para a solução do PEP está sendo implementado na linguagem C++, com os modelos de programação matemática sendo resolvidos pelo software CPLEX versão 7.5. Os testes preliminares conduzidos até o momento indicam que o problema poderá ser resolvido em tempos computacionais razoáveis.

6. Conclusões

Neste trabalho procurou-se apresentar uma nova proposta de solução para o problema de escalonamento de pessoal para empresas de transporte coletivo interurbano. Trata-se de um problema complexo para o qual propõe-se um método heurístico que divide o problema original em cinco subproblemas. Cada subproblema é formulado como um problema de programação inteira, que é resolvido por um software comercial. Procurou-se, desta forma, evitar a elaboração de modelos que, de alguma forma, não sendo flexíveis, não possam ser adaptados a ambientes reais, onde as mudanças são freqüentes. Assim, para a solução do problema considera-se uma divisão de atividades que leva em consideração um baixo acoplamento entre as etapas. O baixo acoplamento das etapas da heurística implica em modelos estanques e que podem ser resolvidos independentemente. Porém, ao mesmo tempo, para não se distanciar da realidade, levou-se em conta neste estudo, a experiência de uma empresa típica da área. Espera-se, com a conclusão do trabalho, colocar à disposição de pequenas e médias empresas um sistema eficiente de apoio à decisão em problemas de escalonamento de pessoal o qual, pelas diretrizes comentadas, possa contribuir para uma maior aproximação entre as empresas e a área de pesquisa no Brasil.

7. Referências

Caprara, A.; Fischetti, M.; Guida, P.; Toth, P.; Vigo, D. Solution of Large Scale Railway Crew Planning Problems: The Italian Experience. N. Wilson (ed), Computer Aided Transit Scheduling, *Lecture notes in economical and mathematical systems*, v. 430, p. 1-18, Berlin: Springer, 1999.

Cappanera, P.; Gallo, G. A multicomodity flow approach to the crew rostering problem. *Operations Research*, v. 52, n. 4 , July-August, p. 583-596, 2004.

Colin, R.R. Genetic algorithm. In: *Modern heuristic techniques for combinatorial problems*. London: McGraw-Hill, p. 151–196. 39, 1995.

Ernst, A.T.; Jiang, H.; Krishnamoorthy, M.; Sier, D. Staff scheduling and rostering: A review of applications, methods and models. *European Journal of Operational Research*, v. 153, p. 3-27, 2004a.

Ernst, A.T.; Jiang, H.; Krishnamoorthy, M.; Owens, B.; Sier, D. An Annotated Bibliography of Personnel Scheduling and Rostering. *Annals of Operations Research*, v. 127, p. 21-144, 2004b.

Glover, F.; Laguna, M. *Tabu Search*. Kluwer Academic Publishers, Boston, 1997.

Goldberg, D.E. *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*. Boston: Addison-Wesley, 1989. 432 p.

Holland, J.H. *Adaptation in natural and artificial systems*. Michigan: University of Michigan Press, 211 p. 39, 1975.

Karp, R. *Reducibility among combinatorial problems*. Symposium on Mathematical Programming at the University of Wisconsin at Madison, Sep. 1972.

Kirkpatrick, S.; Gelatt, C. D.;Vechi, M.P.; Optimization by Simulated Annealing. *Science* v. 220, p. 671-680, 1983.

Lorena, L.A.N.; Furtado, J.C. Constructive genetic algorithm for clustering problems. *Evolutionary Computation*, v. 9, n. 3, p. 309–327, 2001.

Lorena, L.A.N.; Narciso, M.G.; Beasley, J.E. A constructive genetic algorithm for the generalized assignment problem. *Evolutionary Optimization*, 2002.

Panton, D.; Ryan, D. *Column Generation Models for Optimal Workforce Allocation with Multiple Breaks*. University of South Australia and University of Auckland, 1-17, 1999.

Shen, Y.; Kwan, R. Tabu Search for Driver Scheduling. Computer-Aided Scheduling of Public Transport. *Lectures Notes in Economics and Mathematical Systems*, v. 505, p. 121-136, 2001.

Shodi, M.S.; Norris, S.A. A flexible, fast and optimal modeling approach applied to crew rostering at London Underground. *Annals of Operations Research*, n. 127, p. 259-281, 2004.

Wolsey, L.A. *Integer Programming*. John Wiley and Sons, 1998.