

OTIMIZAÇÃO DE ESCALAS DE SERVIÇO DE TRIPULAÇÕES – ESTUDO DE CASO EM UMA EMPRESA DE TRANSPORTE URBANO NA REGIÃO METROPOLITANA DE NATAL/RN

Miriam Karla Rocha

Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Avenida Senador Salgado Filho, Lagoa Nova, Natal - RN
miriamkrocha@hotmail.com

Dario José Aloise

Universidade Estadual do Rio Grande do Norte
Rua Almino Afonso 478, Centro, Mossoró – RN
aloisedj@gmail.com

Caroline Thennecy de Medeiros Rocha

Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Avenida Senador Salgado Filho, Lagoa Nova, Natal - RN
thennecy@gmail.com

Laura Silvia Bahiense da Silva Leite

Universidade Federal do Rio de Janeiro
Av. Horácio Macedo 2030, Cidade Universitária, Rio de Janeiro - RJ
laura.bahiense@gmail.com

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo “construir” escalas de serviços de tripulações de ônibus urbano de forma a minimizar o custo com horas extras. Para tanto foi desenvolvido um modelo matemático por meio de um estudo de caso em uma empresa de transporte urbano na região metropolitana de Natal. Este problema de uma maneira geral é conhecido na literatura como Problema de Programação de Tripulação (PPT) e classificado como NP-difícil. A modelagem matemática do problema leva em consideração restrições tais como: realização de todas as viagens, jornada diária máxima permitida e intervalo de repouso e/ou alimentação. Foi utilizado o aplicativo Xpress-MP para implementar e validar o modelo proposto. Para os exemplares - instâncias - testados o modelo apresentou uma redução da hora extra entre 38% e 84%.

PALAVRAS CHAVE. Escala de serviço, transporte urbano, estudo de caso, programação matemática.

Área principal (AdP - PO na Administração Pública)

ABSTRACT

This paper aims to "build" rostering urban bus crews to minimize the cost of overtime. For this purpose a mathematical model was developed based on case study in an urban transport company in the metropolitan region of Natal. This problem is usually known in the literature as the Crew Scheduling Problem (CSP) and classified as NP-hard. The mathematical programming takes into account constraints such as: completion of all trips, daily and maximum allowable range of home and / or food. We used the Xpress-MP software to implement and validate the proposed model. For the tested instances the application of the model allowed a reduction in overtime from 38% to 84%.

KEYWORDS. Rostering, urban bus, case study, mathematical programming.

Main area (AdP – OR in Public Administration)

1. Introdução

Em Natal-RN e cidades circunvizinhas, como Parnamirim, Macaíba e São Gonçalo do Amarante, as empresas de transporte coletivo utilizam as jornadas semanais de trabalho das equipes ou tripulações (motoristas e cobradores) com padrão ideal de duração de 44 horas, e cada funcionário trabalha 6 dias por semana. As jornadas semanais com duração maior do que o padrão ideal representam um custo maior para a empresa, pois o que excede as 44 horas é contabilizado como hora extra, e o valor pago pela hora extra é 65% maior do que a hora normal. Jornadas semanais com duração menor do que o padrão ideal representam ociosidade para a empresa e devem ser evitadas também, já que a empresa é obrigada a pagar pelas 44 horas nestes casos.

O ideal seria que a jornada de trabalho de cada equipe (tripulação – motorista e cobrador ou somente o motorista) fosse 7h20min por dia, que totalizaria 44 horas semanais, podendo ter no máximo 2h00 extras diárias, ou seja, a jornada diária de trabalho para cada equipe de ônibus não deve ultrapassar a 09h20min, que é o tempo máximo de trabalho permitido por lei.

As principais etapas que compõem o planejamento dos transportes públicos são (SOUSA et al., 2000; DIAS et al., 2001; CEDER, 2002): definição da rede de atendimento, definição da tabela de horários, escalonamento dos veículos às viagens e escalonamento das tripulações. Weider (2007) divide o planejamento dos transportes públicos em duas grandes fases: o planejamento estratégico, que compreende o projeto da rede de atendimento, o planejamento das linhas e definição da tabela de horários; e o planejamento operacional que consiste na programação dos veículos, na alocação de serviços e no rodízio das tripulações (motoristas e cobradores).

O planejamento estratégico, geralmente, é de responsabilidade do poder público. Por este motivo, foi focado o planejamento operacional neste estudo – alocação das tripulações aos serviços – pois representam um custo oneroso para as empresas de transporte público.

Tendo em vista estes pontos, este trabalho objetiva propor um modelo matemático que minimize as horas extras das jornadas de trabalho das tripulações possibilitando para a empresa de transporte a redução de custos trabalhistas das linhas, uma vez que representa a maior parcela dos custos da empresa. Foram feitas simulações (testes) com os dados reais da empresa para avaliar o comportamento do modelo.

Para alcançar este objetivo foi feito um estudo de caso em uma empresa de transporte urbano de passageiros, localizada na região metropolitana de Natal, mais precisamente situada em Parnamirim. Esta empresa é responsável pela operação de 12 linhas de ônibus intermunicipais, com frota empenhada de 74 veículos e 164 motoristas.

A organização do presente estudo inicia-se com essa abordagem introdutória, seguida pela seção 2, fundamentos teóricos, na qual se aborda o problema de programação de tripulação. A seção 3, metodologia, traz os métodos de pesquisas utilizados durante o atual estudo. Posteriormente, a seção 4 apresenta o modelo matemático proposto. Em seguida, os resultados obtidos com a modelagem matemática podem ser observados na seção 5. Na seção 6, encontram-se as considerações finais do estudo, além de sugestões para possíveis trabalhos futuros e finalmente na seção Referências são apresentadas as bibliografias utilizadas na pesquisa.

2. Referencial Teórico

De forma ampla, esse problema é conhecido na literatura científica como Alocação de Pessoas (Staff Schedule) ou também de Escala de Serviço (Rostering) e pode se referir a quaisquer cenários que envolvam equipes e designação de escalas (hospitais, supermercados, farmácia, delegacia entre outros). No entanto, para tripulações de ônibus existe uma denominação mais específica que é o Problema de Programação de Tripulações (Crew Scheduling Problem).

O problema de alocação de pessoas e escala de serviço é classificado como NP-difícil (Hadwan e Ayob, 2010), assim como o problema de programação de tripulações (MARTELLO e

TOTH, 1986). Por este motivo, é muito difícil encontrar boas soluções com restrições com alto nível de dificuldade e problemas complexos e é ainda mais difícil determinar soluções ótimas que minimizem custos, atendem preferências de empregados, distribuem igualmente as mudanças entre os empregados e satisfaçam as restrições do local de trabalho.

Alocação de pessoas, ou escalas de serviços, é o processo de construção de horários para que o pessoal da organização possa satisfazer a demanda de bens ou serviços. O primeiro passo é determinar o número de funcionários envolvidos no processo, com habilidades particulares, necessários para atender a demanda do serviço. Cada um dos membros do pessoal é alocado de acordo com o nível do pessoal exigido e os diferentes horários, e deveres designado a cada um. Todos os regulamentos industriais e acordos trabalhistas devem ser observados durante a implantação do modelo. (Ernst et al, 2004)

O problema de programação de tripulações (PPT) consiste em alocar tripulações para o cumprimento de viagens em sistemas de transportes. Um caso particular do PPT é o problema de escalonamento de motoristas de ônibus (Bus Driver Scheduling Problem) no qual se deve construir um conjunto viável de tarefas efetuadas por uma equipe de trabalho (motorista e cobrador) em um dia de trabalho, de modo que todas as equipes cubram as escalas dos veículos. (WREN e ROSSEAU, 1995).

O PPT consiste em criar jornadas de trabalho para os tripulantes de forma a viabilizar a execução de todas as viagens da empresa. Além disso, esta distribuição de trabalho deve ser realizada de maneira a minimizar os custos com mão-de-obra e ao mesmo tempo obedecer à legislação trabalhista e as regras operacionais sob as quais a empresa atua. (SIMÕES, 2009)

3. Metodologia

Primeiramente foi feito um modelo matemático para o problema com base na empresa estudada. Este modelo apresenta restrições, tais como: cumprimento de todas as viagens, jornada máxima permitida, tempo para repouso e/ou alimentação respeitando a legislação trabalhista e os acordos com o Sindicato dos Trabalhadores em Transporte dos Rodoviários (Convenção trabalhista 2010/2011). Posteriormente este modelo foi implementado no MP-Xpress (*software* de otimização).

Das linhas de ônibus ativas na empresa foram escolhidas três: linha 1 com 23 viagens; linha 2 com 26 viagens e linha 3 com 46. Esta seleção constituiu a segunda etapa do trabalho (seleção dos exemplares).

O modelo foi avaliado em simulações, cujos resultados foram comparados com os obtidos empiricamente na empresa. Os testes foram executados em um computador Intel Core 2 Duo, 2,66 GHz, 3,93 GB de RAM.

4. Modelagem Matemática

O modelo matemático tem como objetivo principal a redução de horas extras, consequentemente a redução de cargas trabalhistas.

O modelo matemático é apresentado a seguir.

Parâmetros:

hs_i : horário da saída da viagem i .

hc_i : horário da chegada da viagem i .

tm : tempo morto para a linha (exemplar) analisada.

Variáveis:

$$y_i^k = \begin{cases} 1, & \text{se a tripulação } k \text{ realizar a viagem } i. \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$w_{ij}^k = \begin{cases} 1, & \text{se a tripulação } k \text{ realizar a viagem } j \text{ imediatamente depois da viagem } i. \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$x_{ij}^k = \begin{cases} 1, & \text{se a tripulação } k \text{ realizar uma ou mais viagens entre as viagens } i \text{ e } j. \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

HE_k : Hora extra da tripulação k .

Função objetivo:

$$\text{Min } z = \sum_{k=1}^m HE_k \quad (4.1)$$

Restrições:

$$\sum_{k=1}^m y_i^k = 1 \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (4.2)$$

$$y_i^k + y_j^k \leq 1$$

$$\forall k = 1, \dots, m; \forall i = 1, \dots, n; \forall j = 1, \dots, n \text{ tal que } j > i \text{ e } hc_i > hs_j \quad (4.3)$$

$$\sum_{l=i+1}^{j-1} y_l^k \leq x_{ij}^k * (j - i - 1) \quad (4.4)$$

$$\forall k = 1, \dots, m; \forall i = 1, \dots, n; \forall j = 1, \dots, n \text{ tal que } j > i + 1$$

$$\sum_{l=i+1}^{j-1} y_l^k \geq x_{ij}^k \quad (4.4)$$

$$\forall k = 1, \dots, m; \forall i = 1, \dots, n; \forall j = 1, \dots, n \text{ tal que } j > i + 1$$

$$w_{ij}^k \leq y_i^k$$

$$\forall k = 1, \dots, m; \forall i = 1, \dots, n; \forall j = 1, \dots, n \text{ tal que } j > i$$

$$w_{ij}^k \leq y_j^k$$

$$\forall k = 1, \dots, m; \forall i = 1, \dots, n; \forall j = 1, \dots, n \text{ tal que } j > i$$

$$w_{ij}^k \geq y_i^k + y_j^k - x_{ij}^k - 1 \quad (4.5)$$

$$\forall k = 1, \dots, m; \forall i = 1, \dots, n; \forall j = 1, \dots, n \text{ tal que } j > i$$

$$w_{ij}^k \leq 1 - x_{ij}^k$$

$$\forall k = 1, \dots, m; \forall i = 1, \dots, n; \forall j = 1, \dots, n \text{ tal que } j > i$$

$$\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{\substack{j=i+1 \\ 1 \leq hs_j - hc_i \leq 3}}^n w_{ij}^k = 1 \quad \forall k = 1, \dots, m \quad (4.6)$$

$$\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{\substack{j=i+1 \\ hs_j - hc_i > 3}}^n w_{ij}^k = 0 \quad \forall k = 1, \dots, m \quad (4.7)$$

$$(hc_j - hs_i) * (y_i^k + y_j^k - 1) - Intervalo_k \leq (9,33 - tm)$$

$$\forall k = 1, \dots, m; \forall i = 1, \dots, n; \forall j = 1, \dots, n; \forall j > i$$

$$Onde: Intervalo_k = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{\substack{j=i+1 \\ 1 \leq hs_j - hc_i \leq 3}}^n w_{ij}^k * (hs_j - hc_i) \quad \forall k = 1, \dots, m \quad (4.8)$$

$$HE_k \geq ((hc_j - hs_i) * (y_i^k + y_j^k - 1) - Intervalo_k) - (7,33 - tm)$$

$$\forall k = 1, \dots, m; \forall i = 1, \dots, n; \forall j = 1, \dots, n; \forall j > i \quad (4.9)$$

$$y_i^k \in \{0,1\} \quad \forall k = 1, \dots, m; \forall i = 1, \dots, n$$

$$w_{ij}^k, \alpha_{ij}^k \in \{0,1\} \quad \forall k = 1, \dots, m; \forall i = 1, \dots, n; \forall j = 1, \dots, n \quad (4.10)$$

$$HE_k \geq 0 \quad \forall k = 1, \dots, m \quad (4.11)$$

A função equação 4.1 objetiva minimizar as horas extras de cada tripulação (equipe) – é considerada hora extra qualquer excedente a 7h20min, por exemplo, se uma tripulação k tiver uma jornada de 7h50min, a hora extra, neste caso, seria igual 30min (0,5h).

A restrição 4.2 garante que todas as viagens (índice i) sejam realizadas. Para toda viagem i deve existir, exatamente, uma tripulação k que a realize.

A restrição 4.3 garante que cada tripulação k só fará a próxima viagem j quando chegar da viagem anterior i . Nesta restrição, houve a necessidade de se criar o índice j (que também se refere a uma viagem), para comparar se o hc_i (horário de chegada da viagem i) é maior que o hs_j (horário de saída da viagem j).

As restrições 4.4 servem para encontrar o valor da variável auxiliar, x_{ij}^k , que será igual a 1 se a tripulação k realizar uma ou mais viagens entre as viagens i e j ; 0, caso contrário.

As restrições 4.5 servem para encontrar o valor da variável auxiliar, w_{ij}^k , que será igual a 1, se a tripulação k realizar a viagem j imediatamente depois de realizar a viagem i ; 0, caso contrário. Esta variável auxiliar servirá para encontrar o intervalo de repouso e/ou alimentação das tripulações que minimize as horas extras.

A restrição 4.6 garante que cada tripulação k tenha somente 1 (um) intervalo de repouso e/ou alimentação de no mínimo 1 hora e no máximo de 3 horas na sua jornada de trabalho diária.

Para duas viagens consecutivas com uma diferença de 1h à 3h entre o horário de saída (hs_j) e o horário de chegada (hc_i) esta restrição permitirá escolher um par de viagens (i e j) consecutivas que satisfaz este intervalo e que minimize a quantidade de horas extras na função objetivo.

O intervalo de repouso e/ou alimentação é uma condição imposta pelo sindicato dos rodoviários do RN, e deve ser igual ou superior a 1h e igual ou inferior a 3h entre duas viagens consecutivas de uma mesma tripulação.

A restrição 4.7 garante que cada tripulação k não tenha nenhum intervalo superior a 3 horas na jornada.

A equação restrição 4.8 garante que nenhuma jornada de cada tripulação k ultrapasse a jornada máxima permitida que é de 9h20min (9,33h). Para qualquer par de viagens que a tripulação k fizer a diferença entre hc_j e hs_i menos o intervalo da equipe k não deve ultrapassar a 9,33h.

A equação restrição 4.9 atribui o valor da hora extra de cada tripulação k . É calculado da seguinte forma: a jornada da tripulação menos 7h20min (7,33h), desta forma qualquer excedente a 7,33h será hora extra.

As restrições 4.10 e 4.11 demonstram o caráter binário e não negativo das variáveis, respectivamente.

5. Resultados

Nesta seção são mostrados comparativos entre os resultados obtidos por meio da modelagem matemática implementada no MP-Xpress e os resultados empíricos da empresa.

As tabelas 1,2 e 3 apresentam o comparativo da linha 1 que possui 23 viagens diárias, a linha 2 com 26 viagens e a linha 3 com 46 viagens, respectivamente.

Tabela 1 - Linha 1 (23 viagens)

EMPRESA			MODELAGEM	
Equipe	Jornada	Hora extra	Jornada	Hora extra
1	7h05min	0min	5h30min	0min
2	7h05min	0min	7h05min	0min
3	7h25min	5min	7h05min	0min
4	7h05min	0min	7h45min	25min
5	5h50min	0min	7h20min	0min
6	7h55min	35min	7h10min	0min
Total		40 min		25min
Redução ->			38%	

Tabela 2 - Linha 2 (26 viagens)

EMPRESA			MODELAGEM	
Equipe	Jornada	Hora extra	Jornada	Hora extra
1	7h35min	15min	7h30min	10min
2	7h45min	25min	7h25min	5min
3	9h10min	1h50min	7h20min	0min
4	7h25min	5min	8h45min	1h25min
5	7h40min	20min	7h25min	5min
Total		2h55min		1h45min
Redução ->			40%	

Tabela 3 - Linha 3 (46 viagens)

Equipe	EMPRESA		MODELAGEM	
	Jornada	Hora extra	Jornada	Hora extra
1	7h45min	25min	7h46min	26min
2	6h00min	0min	6h00min	0min
3	6h30min	0min	6h05min	0min
4	6h55min	0min	6h15min	0min
5	8h31min	1h11min	7h00min	0min
6	6h26min	0min	6h10min	0min
7	6h30min	0min	6h50min	0min
8	6h31min	0min	7h05min	0min
9	6h31min	0min	6h15min	0min
10	6h30min	0min	6h27min	0min
11	4h29min	0min	6h38min	0min
12	6h17min	0min	6h27min	0min
13	6h27min	0min	6h30min	0min
14	8h23min	1h03	6h21min	0min
15	6h22min	0min	6h38min	0min
Total		2h39min		26min
Redução ->			84%	

Por meio da análise dos resultados, se pode afirmar que para os três exemplares testados houve uma redução expressiva das horas extras variando entre 38% e 84%

6. Conclusões Finais

Este trabalho apresentou um modelo de complexidade elevada devido ao alto grau de dificuldade das restrições modeladas, além disso, foi feita uma simulação com dados reais em uma empresa de transporte urbano na região metropolitana de Natal. Desta forma, este estudo de caso proporcionou avaliar o comportamento do modelo matemático com um problema da vida real e consequentemente mensurar os benefícios que esta aplicação traria em uma empresa de transporte urbano.

Os resultados obtidos com a modelagem matemática foram satisfatórios. Para os três exemplares testados o modelo apresentou uma melhoria significativa, reduzindo o total de horas extras das linhas de ônibus, e consequentemente, os custos da empresa. O objetivo deste trabalho que era propor um modelo matemático que reduzisse as horas extras e consequentemente os encargos trabalhistas foi alcançado.

Para trabalhos futuros, sugere-se testar exemplares maiores (superior a 50 viagens diárias), além disso, a implementação conjunta de métodos heurísticos ou meta-heurísticos específicos para o problema. Isso porque, apesar de esses métodos não garantirem a otimalidade das soluções, seu compromisso com soluções de boa qualidade e, tempos computacionais razoáveis os tornam bastantes atraentes na resolução aproximada de problemas NP-difíceis, como o aqui abordado.

Referências

- Ceder, A.** Urban transit scheduling: framework, review and examples. *Journal of Urban Planning and Development*, v. 128, n. 4, p. 225 – 244, 2002
- Convenção Coletiva de Trabalho.** 2010/2011. Natal-RN.

- Dias, T. G.; et al.**, Evaluating a DSS for Operational Planning in Public Transport Systems: Ten Years of Experience with the GIST System. In: VOSS, S.; DADUNA, J. R. (Eds.) Computer-aided Transit Scheduling, Lecture
- Ernst, A. T.** et al. Staff scheduling and rostering: A review of applications, methods and models. *European Journal of Operational Research* 153, p. 3-27, 2004.
- Hadwan, M., Ayob, M.** A Constructive Shift Patterns Approach with Simulated Annealing for Nurse Rostering Problem. *Proceedings 2010: International Symposium on information Technology – Visual informatics*. Art. nº 5 561304, 2010.
- Martello, S.; Toth, P.** A heuristic approach to the bus driver scheduling problem. *European Journal of the Operational Research Society*, vol. 24, n. 1, p. 106–117, 1986.
- Simões, E. M. L.** Algoritmo para Programação Integrada de veículos e Tripulantes no Sistema de Transporte Público por Ônibus. Dissertação. Mestre em Ciência da Computação. Universidade Federal de Minas Gerais.
- Sousa, J. P; Et Al.**, Um Sistema de Apoio à Decisão para o Planejamento Operacional de Transportes Colectivos. In: *Casos de Aplicação da Investigação Operacional*, McGraw-Hill, p. 109 –130, 2000.
- Weider, S.** Integration of vehicle and duty scheduling in public transport. *Der. Rer. nat. Thesis*. Technischen Universität Berlin, Berlin. 2007.
- Wren, A.; Rosseau, J. M.** Bus Driver Scheduling – an Overview. In: DADUNA, J. R.; BRANCO, I.; PAIXÃO, J. M. P. (Eds.) *Computer-aided Transit Scheduling. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, Springer, vol. 430, p. 173–183, 1995.