

UM MODELO HÍBRIDO DE FLUXO EM REDES PARA RESOLVER O PROBLEMA DO RODÍZIO DE TRIPULAÇÕES

Suelaine Débora Gonçalves de Andrade

Universidade Federal de Ouro Preto
Departamento de Computação - ICEB
suelaine.andrade@gmail.com

Gustavo Peixoto Silva

Universidade Federal de Ouro Preto
Departamento de Computação – ICEB
gustavo@iceb.ufop.br

RESUMO

O Problema de Rodízio de Tripulações (PRT) do sistema de transporte público deve atribuir a cada tripulação uma sequência de jornadas para os dias do horizonte de planejamento. O objetivo do PRT é minimizar as horas-extras da escala, compensando-as com ociosidades entre jornadas. Este é o princípio do banco de horas permitido pela legislação, desde que sejam respeitadas as restrições operacionais e leis trabalhistas. Neste trabalho o problema foi resolvido em duas etapas, utilizando modelos de fluxo em redes. Na primeira etapa é obtida uma escala semanal com um modelo que gera soluções cuja diferença entre horas-extras e ociosidades é pequena. A segunda etapa combina as semanas geradas inicialmente, tendo como objetivo compensar ao máximo as horas-extras com as ociosidades semanais ao longo do período de planejamento. O modelo combinado foi testado e os resultados mostram que ele tira proveito das características de cada etapa, gerando soluções mais econômicas.

PALAVRAS CHAVE. Transporte Público. Rodízio de Tripulações, Fluxo em Redes.

Logística e Transportes

ABSTRACT

The Crew Rostering Problem (CRP) of the public transportation system should assign to each crew a sequence of shifts in the days inside the planning horizon. The CRP goal is to minimize the scale's overtime by compensating them with idleness between shifts. This is the hours bank's principle allowed by law, since the operational constraints and labor laws are respected. In this work the problem was solved in two stages, using network flow models. In the first stage, a weekly scale is obtained by a model that generates solutions in which the difference between overtime and idleness is small. The second stage combines the initially generated week, aiming to compensate the most of the overtimes with the weekly idleness throughout the planning horizon. The combined model was tested and the results show that it takes benefit of the characteristics of each stage, generating more economic solutions.

KEYWORDS. Public Transportation. Crew Rostering. Network Flows.

Logistics and Transports

1. Introdução

Conforme apontado em Vasconcelos (2001), as condições gerais de transporte e trânsito são insatisfatórias para a maioria da população: as grandes cidades dos países em desenvolvimento apresentam níveis baixos de serviço de transporte público, altos índices de acidentes de trânsito, congestionamento, poluição ambiental e invasão dos espaços habitacionais e de vivência coletiva por tráfego inadequado. A insatisfação dos motoristas e cobradores e o aumento no preço das passagens pode agravar estes problemas pela perda de passageiros, que muitas vezes optam pelo transporte privado, causando um aumento no número de veículos circulando na cidade, amplificando a poluição, os engarrafamentos e o stress causado pelo trânsito.

O planejamento do sistema de transporte urbano torna-se de fundamental importância para garantir um desempenho satisfatório do modelo de circulação urbana. A escala de trabalho otimizada traz benefícios para motoristas e cobradores, que podem contar com uma divisão mais imparcial das atividades, o que torna o ambiente de trabalho mais amigável, beneficiando também os passageiros. Por outro lado, as empresas poderão contar com uma diminuição nos gastos com horas- extras, o que diminui a pressão sobre os preços das tarifas.

O transporte público compreende um complexo processo de planejamento sob a responsabilidade do poder público e das empresas prestadoras de serviços de transporte. Alguns autores dividem este processo em cinco fases: i) definição das linhas e traçados, ii) do quadro de horários, iii) a programação de veículos, iv) a programação de tripulações e v) o rodízio das tripulações. A primeira fase do planejamento deve definir os traçados a serem percorridos cobrindo todas as áreas da cidade com trajeto o mais direto possível, a fim de diminuir as distâncias e os tempos de percurso. Na segunda fase, é gerado um quadro de horários que define para cada linha, o horário de partida, de acordo com a demanda local. Estas etapas são de competência do poder público e não das empresas operadoras.

Na terceira fase é resolvido o problema de programação de veículos, também conhecida na literatura como *Vehicle Scheduling Problem*. Esta tarefa é de responsabilidade das empresas e consiste em criar uma rotina diária de operações para uma frota de veículos de forma a atender as viagens definidas anteriormente. Seu objetivo é cumprir todas as viagens e reduzir os custos minimizando o número de veículos, os tempos de ociosidade e o número de deslocamentos sem passageiros. As restrições operacionais dizem respeito ao tempo mínimo que o veículo deve permanecer na garagem, o tempo máximo que um veículo pode ficar parado em um ponto final, o máximo de trocas de linhas realizada pelo veículo entre outras.

A quarta fase engloba o Problema de Programação diária de Tripulações, PPT ou *Bus Crew Scheduling Problem*, que é responsável por gerar uma escala de trabalho para as tripulações que conduzirão a frota de ônibus em operação. Estas escalas, ou conjunto de jornadas devem contemplar todas as viagens definidas na etapa anterior para cada tipo de dia da semana: dias úteis, sábados e domingos/feriados. Este é um problema de particionamento para o qual não existe algoritmo polinomial para a sua resolução exata.

Após esta fase é necessário definir uma sequência das jornadas a serem executadas por cada tripulação durante todo o horizonte de planejamento, tal que seja minimizado o total de horas extras pagas pela empresa, assim como equilibrar o tempo médio de trabalho das tripulações. Este problema tem como dados de entrada as jornadas diárias de trabalho, sendo que os dias úteis têm um número de jornadas maior do que as do sábado, que por sua vez tem mais jornadas do que nos domingos. Isso se deve à redução de viagens nos finais de semana e feriados. Neste processo é utilizado o conceito de banco de horas, em que as horas extras realizadas por um motorista em um dia podem ser compensadas com as horas ociosas em um outro dia. Este problema é conhecido como Problema do Rodízio de Tripulações, PRT ou *Crew Rostering Problem*.

O PRT e o PPT são muito estudados com aplicações na área de transporte público urbano, como também no transporte aéreo e no ferroviário. O foco principal deste artigo está nesta última fase do planejamento operacional, especificamente no PRT de sistemas de transporte público.

O modelo proposto em Carraresi e Gallo (1984) atribui um peso a cada jornada de acordo com o seu custo em função de suas horas extras ou ociosas. Segundo os autores, este problema de encontrar um balanceamento das jornadas para um dado intervalo de tempo é formulado como minimizar o peso máximo total das jornadas ligadas a uma tripulação. Este modelo formula o PRT para um horizonte de m dias, cada dia com n jornadas. Conforme provado pelos autores, o PRT é NP-Completo, mas se o número de dias m for fixo é possível encontrar um algoritmo que resolva o problema em tempo polinomial. Um algoritmo de solução heurística que resolve iterativamente diversos problemas de designação com gargalo é apresentado no trabalho. Resultados teóricos e computacionais são apresentados, o que indica que o algoritmo é bastante efetivo. No entanto, não é fornecida uma solução completa ao PRT pois não trata a questão das folgas. Este modelo não é facilmente extensível a horizontes maiores do que uma semana, sendo que em problemas reais, um único rodízio cobre várias semanas. Estes modelos poderiam, entretanto, ser úteis se combinados com procedimentos que tratem de outros aspectos do problema.

Em Yunes et al. (2000), o PRT é modelado e resolvido com a técnica de Programação por Restrições e Programação Inteira - PI. Ele trata do sistema de transporte público brasileiro, especificamente de uma companhia que opera em Belo Horizonte, MG. Neste modelo, limitantes inferiores foram obtidos com relaxação em programação linear e usados para avaliar a qualidade da solução encontrada. É apresentada também uma heurística de geração de colunas que combina programação inteira e programação por restrições sobre uma formulação de particionamento de conjuntos. O objetivo principal é encontrar a solução mais barata em termos de número de tripulantes e carga de trabalho balanceada em um horizonte de um mês. As conclusões gerais desse trabalho afirmam que o modelo de Programação Inteira encontrou rodízios factíveis para instâncias pequenas, já a lógica por restrições melhorou os resultados e factibilidade para instâncias reais em poucos segundos, enquanto o modelo de particionamento de conjuntos encontrou soluções ótimas para instâncias pequenas. Os autores afirmam também que encontrar prováveis soluções ótimas para grandes instâncias do problema ainda é uma tarefa difícil.

Em um trabalho mais recente, Mayrink e Silva (2010) constrói o sequenciamento das jornadas baseado no modelo de Carraresi e Gallo (1984), considerando as características particulares da realidade do caso abordado. Assim, a partir dos dados do primeiro dia do horizonte, é construída uma rede bipartida e resolvido um problema de designação para fazer a alocação do segundo dia do horizonte. Este modelo minimiza o total de horas extras tentando compensá-las com horas ociosas. Neste trabalho, a definição do rodízio mensal, sem as folgas, é dividida em duas etapas: i) geração de um rodízio semanal e ii) criação do rodízio mensal com o sequenciamento otimizado dos rodízios semanais. Posteriormente é resolvido um modelo de programação inteira para a alocação das folgas. Este modelo nem sempre atinge o ótimo, mas ainda assim, as soluções obtidas se mostraram superiores com consideráveis melhorias em relação à solução “bruta” fornecida pela empresa

Em Nurmi et al. (2012) é apresentada uma forma de planejar os dias de folga das tripulações em uma base anual e as jornadas em uma base mensal em uma empresa finlandesa de transporte urbano. Os dias de folga e jornadas são planejados e alocados usando um algoritmo que inclui características de heurísticas populacionais, assim como heurísticas não populacionais como *Simulated Annealing*, busca tabu e cadeias de ejeção. As restrições do problema são classificadas nos tipos: cobertura, regulamentação, operacionais, preferências operacionais e pessoais. O algoritmo para o método de solução do PRT é baseado em um método de busca local em população, na técnica de cadeias de ejeção e procedimentos Lin-Kernighan (Lin e Kernighan, 1973). A principal heurística é a busca gulosa de subida da encosta (*hill-climbing*).

Mesquita et al. (2011) apresenta uma formulação de programação por metas binária e não linear para a integração do Problema de Integração entre Veículos e Rodízio de Tripulações, o PVRT. Este modelo é aproximado por uma nova metodologia de programação por metas que garante soluções factíveis para o PVRT. Primeiro o PPV é resolvido para todos os dias no horizonte de planejamento. De acordo com os autores, diferentes valores de alguns parâmetros do algoritmo, controlados pelo usuário, produzem diferentes soluções. Posteriormente, usando essas

soluções como ponto de partida e cobrindo o horizonte de planejamento, o PRT é abordado em um contexto de programação não cíclica, por um modelo binário, multi-objetivo que considera tanto os interesses da empresa quanto os dos motoristas. Este problema também é resolvido por uma aproximação de programação por metas que levam a soluções mensais quase ótimas. A fim de avaliar a qualidade das diferentes soluções do PVRT, a qualidade das soluções do rodízio foram medidas de perspectivas diferentes do custo. E por fim enfatizam que o PRT analisado tem grande gama de aplicações.

Já em Leite (2012), também é utilizado um modelo de fluxo em redes, mas diferentemente de Carraresi e Gallo (1984) a rede é construída para o período completo de uma única vez. Este modelo também minimiza o total de horas extras tentando compensá-las com as horas ociosas. A rede é resolvida transformando-a em um problema de circulação, e aplicando-se o algoritmo *Out-of-Kilter* (Ahuja, 1993) para escolher a melhor combinação de jornadas. A solução deste modelo permite definir um rodízio para o período mas não faz a alocação das folgas dos tripulantes, além das “folgas naturais” provenientes dos sábados e domingos. Os resultados de Leite (2012) não são mais eficientes do que aqueles obtidos por Mayrink e Silva (2010), considerando a soma do total de horas-extras e o total de horas ociosas. Entretanto, ao comparar a diferença entre as horas extras e as horas ociosas, nota-se que o valor obtido pelo modelo de Leite (2012) é menor. Naturalmente que as horas-extras de uma sequência de jornadas não podem ser compensadas com as horas ociosas de outra sequência, mas é possível combinar as duas propostas gerando uma escala para uma semana utilizando o modelo de Leite (2012) e combinar as semanas ao longo do horizonte de planejamento pelo método proposto por Mayrink e Silva (2010). Desta maneira, o objetivo é compensar o máximo de horas extras com ociosas de uma mesma sequência, minimizando o custo total.

Neste trabalho o PRT será resolvido em duas etapas sem a preocupação com a alocação das folgas. Na primeira etapa será gerada uma escala semanal pelo modelo proposto por Leite (2012) e na segunda etapa as semanas serão combinadas da mesma forma que foi proposto por Mayrink e Silva (2010). Desta maneira pretende-se tirar proveito das melhores características de cada modelo e gerar uma solução ainda melhor.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: a Seção 2 define o problema abordado. As etapas procedimentos e algoritmos executados para se alcançar os objetivos deste trabalho são mostradas na Seção 3. Na Seção 4, são apresentados os resultados obtidos e comparados com os resultados de uma empresa de transporte público e, a Seção 5 mostra as conclusões e diretrizes para trabalho futuro.

2. O Rodízio de Tripulações

As empresas de transporte público são encarregadas de cumprir diariamente um quadro de horários de viagens para cada linha sob sua responsabilidade. Estas viagens são distribuídas entre os veículos da frota que entrará em operação. As tripulações, compostas por motoristas e cobradores devem realizar um conjunto de viagens que deve ser executado, chamado de jornadas diárias. No entanto estas jornadas apresentam diferentes características como horários de início e término, tempo de duração e turno de trabalho. Para realizar o planejamento destas jornadas, muitas empresas ainda utilizam o sistema de escala fixa. Nele as tripulações realizam as mesmas jornadas de trabalho todos os dias. A vantagem deste sistema é a simplicidade na sua construção, além da facilidade de implementação pois não há variação nas tarefas a serem realizadas pelas tripulações ao longo do horizonte de planejamento. Por outro lado, é bastante oneroso para as empresas, já que as jornadas com horas-extras são acumuladas ao final do período, e elas não são compensadas com as jornadas que têm horas ociosas. Além disso, o esquema de jornadas fixadas pode se bastante injusto para os funcionários devido ao critério de seleção das jornadas, que é baseado no tempo de casa. Nele, os motoristas mais antigos podem escolher as jornadas que mais os atraem, que são aquelas com maior quantidade de horas-extras ou jornadas com muita ociosidade.

O PRT, em contraste com o sistema de escala fixa, busca estabelecer uma carga de trabalho mais imparcial aos funcionários e uma distribuição igualitária das horas-extras. A ideia principal é permitir que jornadas com diferentes características sejam intercaladas, com o objetivo de compensar as horas extras com horas ociosas de jornadas de dias posteriores. Assim, o PRT visa determinar um conjunto de escalas mensais (ou periódicas) de trabalho, cada uma composta de uma sequência de jornadas diárias de trabalho a serem atribuídas a uma tripulação, com o objetivo de se produzir jornadas mais equilibradas em termos de tempo de trabalho e de horas extras, para reduzir os gastos, respeitando as regras trabalhistas e operacionais da empresa. Para cada tipo de dia (dia útil, sábado e domingo/feriados) existe um conjunto de jornadas que devem ser cumpridas, denominadas jornadas diárias. Elas apresentam características que as distinguem das outras como:

1. horário de início, que indica o turno da jornada,
2. horário de término, em que o funcionário está liberado do expediente de trabalho,
3. turno da jornada, estabelecido de acordo com o horário de início da jornada,
4. ociosidade ou hora-extra quando a duração de uma jornada é inferior ou superior à carga normal de trabalho,
5. tipo: *simples*, quando a jornada não é de dupla-pegada nem noturna; *dupla pegada*, quando ocorre uma interrupção superior a duas horas durante o horário de trabalho e *noturna* que aponta se a jornada inicia entre 22 e 4 horas. As jornadas noturnas tem uma remuneração diferenciada para o período trabalhado entre 22:00 e 04:00.

Neste trabalho, a carga normal é de 6 horas e 40 minutos e o dia foi dividido em 4 turnos, cada um com 6 horas de duração, sendo o primeiro com início às 4:00 da manhã e término às 9:59, o segundo inicia às 10, com término às 15:59, e assim por diante. O sequenciamento destas jornadas deve obedecer a uma série de restrições, tanto de ordem operacional quanto trabalhista, que variam de acordo com convenções coletivas vigentes no município em que a empresa atua e que contemplem os critérios adotados por ela. As restrições consideradas são:

1. O horizonte de planejamento sempre se inicia em uma segunda feira.
2. O tempo mínimo de descanso entre o término de uma jornada e o início da próxima jornada deve ser maior ou igual a 11 horas.
3. Nenhuma tripulação pode trabalhar mais de seis dias consecutivos sem uma folga.
4. Dentro de uma mesma semana, as tripulações devem executar jornadas dos dias úteis pertencentes ao mesmo turno de trabalho.
5. As tripulações que cumprem jornadas do tipo dupla-pegada têm o direito de folgar todos os domingos do horizonte de planejamento.
6. Dentro do horizonte de planejamento, considerado de cinco semanas, todas as tripulações têm direito a pelo menos uma folga no domingo.
7. No decorrer de todos os dias do horizonte de planejamento as tripulações cumprem somente um dos tipos de jornadas .
8. Nos finais de semana não é necessário respeitar as restrições de turno de trabalho e de dupla-pegada ou noturno
9. Para uma mesma tripulação, as horas-extras de uma jornada podem ser compensadas com as horas ociosas de uma outra jornada atribuída à tripulação deste que executadas no mesmo período de planejamento.

Baseado nestas características é que foi implementado um método de resolução para o PRT, o qual é apresentado a seguir.

3. Métodos de Resolução do PRT

O PRT apresenta como dados de entrada as jornadas geradas na fase do Problema de Programação diária das Tripulações (PPT). Neste trabalho, a resolução do PRT, ou rodízio mensal das tripulações foi dividido em duas etapas. A primeira etapa consiste na geração de um rodízio semanal que, em tese, permite um alto grau de compensação de horas extras com horas ociosas. Esta etapa é realizada empregando o modelo proposto por Leite (2012). Na segunda etapa é definido o rodízio mensal, combinando os rodízios semanais sucessivamente por meio de um modelo de assinalamento que minimiza os custos totais da escala, conforme apresentado por Mayrink e Silva (2010).

Um rodízio semanal é um conjunto de jornadas diárias que deve ser cumprida por uma tripulação a cada dia ao longo de uma semana, ou seja, iniciando na segunda-feira e terminando no domingo. Dessa forma cada rodízio semanal deve armazenar várias informações referentes às jornadas que o constitui. As informações especificam o tipo das jornadas presentes no rodízio e a sua distribuição ao longo da semana. Estas características incluem:

1. Número de identidade: número inteiro associado a um rodízio que o distingue dos outros.
2. Dupla-pegada: indica se as jornadas de trabalho dos dias úteis presentes no rodízio são do tipo dupla pegada
3. Noturno: indica se as jornadas de trabalho dos dias úteis do rodízio são do tipo noturno.
4. Turno: indica o turno das jornadas dos dias úteis presentes no rodízio.
5. Ociosidade: é a soma dos tempos de ociosidade de todas as jornadas.
6. Hora-extra: é a soma das horas-extras de todas as jornadas. Um rodízio semanal terá horas-extras, horas ociosas ou será totalmente equilibrado, quando ao final da semana não há horas-extras nem mesmo horas ociosas.
7. Custo: mostra o custo final do rodízio que é a diferença entre o total de horas-extras e de horas ociosas ao final da semana
8. Horário de início: horário de início da primeira jornada atribuída ao rodízio.
9. Horário de término: horário de término da última jornada atribuída ao rodízio.
10. Sequência das jornadas: é uma lista de inteiros que armazena a sequência das jornadas a serem realizadas ao longo da semana.

3.1 Primeira Etapa - Escala Semanal

Nesta etapa, é utilizado o modelo apresentado por Leite (2012), cujo objetivo é sequenciar as jornadas diárias. Para isto foi criada uma rede, sendo os nós as jornadas e os arcos as possíveis ligações entre elas. Por exemplo, para uma tripulação, um caminho de um nó i da coluna (k) a um nó j da coluna ($k+1$), representa a possibilidade, caso esta ligação satisfaça a todas as restrições, de que esta tripulação faça a jornada i no dia k e a jornada j no dia $k+1$. Cada arco recebe um custo que representa o custo de execução dessas jornadas, que pode ser definido como $c_{ij} = |c_i + c_j|$. Em que, c_i = Diferença entre Horas-extras e Ociosidade da jornada i e c_j = Diferença entre Horas-extras e Ociosidade da jornada j . A Figura 1 ilustra uma situação de ligações entre a segunda-feira e a terça-feira.

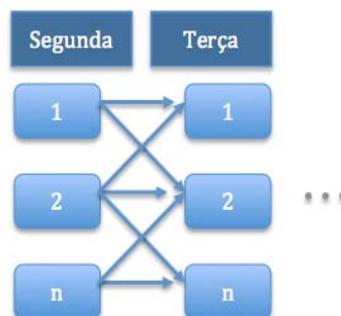


Figura 1. Ligações entre Jornadas.

A rede que denota este problema semanal é construída por camadas, sendo que a cada camada são acrescentados os arcos de um dia para o outro. Para forçar que todas as jornadas sejam realizadas uma única vez, é necessário duplicar os nós referentes aos dias intermediários da semana, criar arcos ligando-os com custo zero, limites inferior e superior iguais a um, como pode ser observado na Figura 2 .

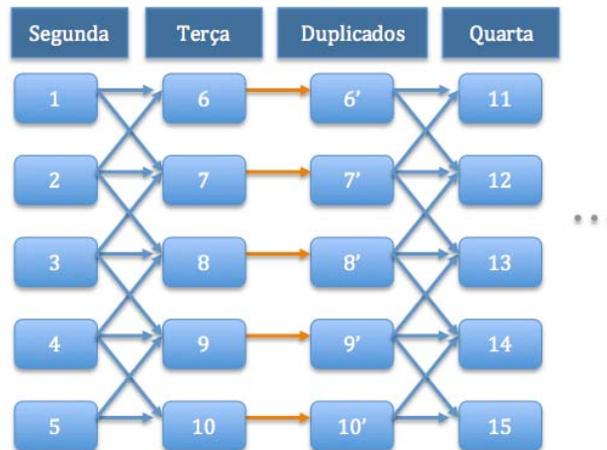


Figura 2. Duplicação dos nós.

Na Figura 2, os arcos na cor laranja representam a ligação entre os nós de terça-feira e os duplicados deste dia. Estes arcos forçam a execução das jornadas por uma única tripulação ao longo de todo o rodízio. O processo se repete até o domingo, incluindo a possibilidade de ligação entre a sexta-feira e o sábado, sexta-feira e domingo, e a sexta-feira e o sábado com a segunda-feira, como pode ser visto nos arcos em laranja da Figura 3, que representam as ligações de sexta a segunda-feira, sendo que este último dia representa a segunda-feira da próxima semana.

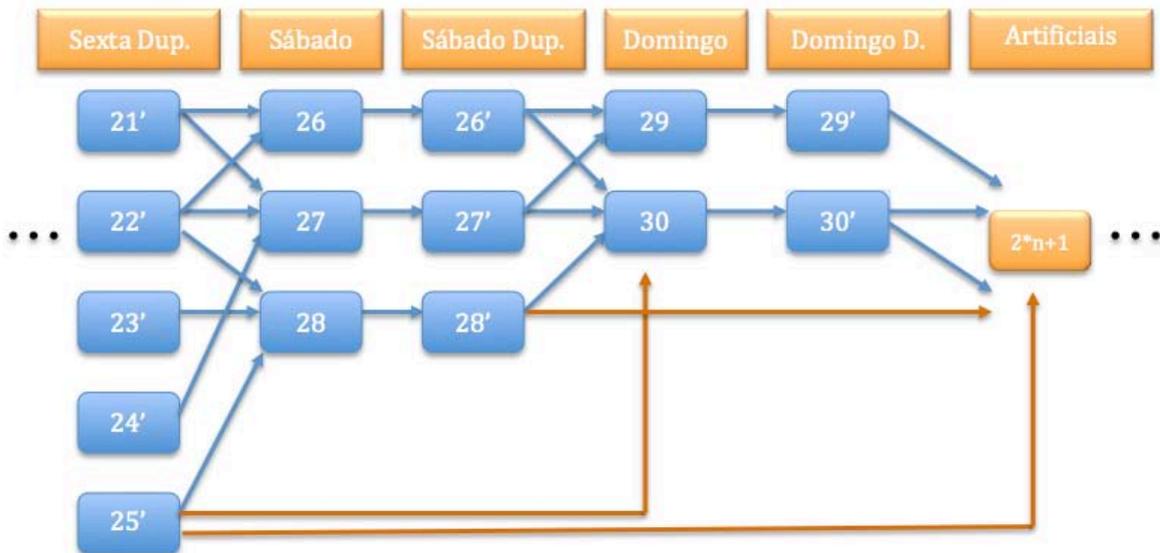


Figura 3. Ligações do final de semana.

Nessas ligações, um arco de sexta-feira para o domingo ou para o nó artificial, que representa a próxima segunda-feira denota uma ou duas folgas no rodízio respectivamente. Após este ponto, é ainda necessário transformar a rede em um problema de circulação, a fim de adaptá-la para a utilização no algoritmo *Out-Of-Kilter*. Para isto, foram criados dois nós artificiais, a origem e o destino. O primeiro com ligações para os nós do primeiro dia, que representam a

segunda-feira e os últimos com ligações dos últimos nós, que podem vir do Domingo, do Sábado ou da Sexta, como pode ser observado na Figura 4.

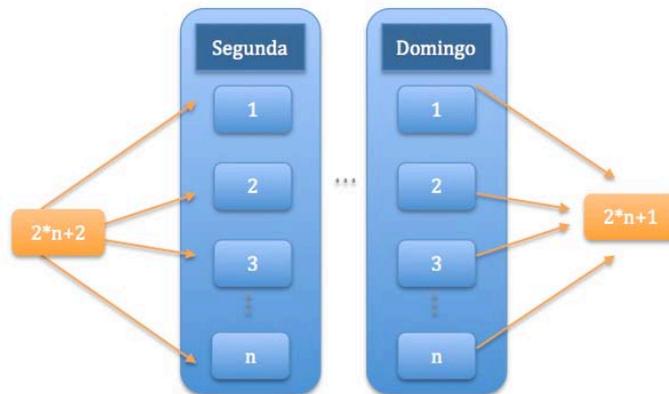


Figura 4. Transformação da Rede – Criação dos arcos artificiais.

A partir do trabalho de Leite (2012) foram também modificadas as restrições de dupla-pegada e noturno, de forma a não permitir que uma tripulação de uma jornada de dia útil cumpra tipos diferentes de jornadas no período de planejamento.

3.2 Segunda Etapa - Escala Mensal

Um rodízio mensal compreende uma sequência de rodízios semanais que deve ser cumprida por uma mesma tripulação durante o período de planejamento, que, apesar de ser denominado “mensal” pode conter entre quatro e sete semanas. De acordo com a Figura 5, o rodízio mensal inicia com os dados do primeiro rodízio semanal do horizonte, atribuindo-se a cada rodízio i a semana $k+1$, com $i = 1, \dots, n$, onde n representa o número de jornadas diárias existentes nos dias úteis e k o número de semanas já presentes no rodízio, enquanto $k+1$ é a próxima semana a ser acrescentada. A primeira semana e a segunda semana são combinadas por meio de um modelo de assinalamento onde cada nó da primeira camada é ligado a um nó da segunda camada se a ligação entre as respectivos rodízios semanais for factível. O custo nos arcos acrescentados à rede representam a soma entre as horas extra/horas ociosas da primeira semana com as horas extras/horas ociosa da segunda semana. Desta maneira o custo representa tanto a compensação de horas-extras (ociosa) de uma semana com horas ociosas (extras) da segunda semana, quanto o acúmulo de horas-extras ou ociosas das duas semanas. A partir da terceira semana até o final do horizonte é acrescida mais uma semana à escala, considerando por um lado as horas-extras/ociosas acumuladas em cada rodízio e por outro lado as horas-extras/ociosas do rodízio semanal.

A rede que representa o acréscimo da semana $k+1$ a partir dos rodízios já estabelecidos até a semana k é construída de acordo com as regras abaixo: um arco a_{ij} representa a possibilidade de se adicionar, ao rodízio i , o rodízio semanal j no período (semana) $k+1$ de operação. Cada arco é criado respeitando as restrições para se combinar uma semana com o rodízio já existente. Na rede, a partir dos rodízios já estabelecidos até a semana k , um arco a_{ij} possui um custo associado, dado por: $c_{ij} = |c_i + c_j|$, em que c_i = diferença entre o número de horas-extras e de horas ociosas acumuladas no rodízio i e c_j é essa mesma diferença referente ao rodízio semanal j .

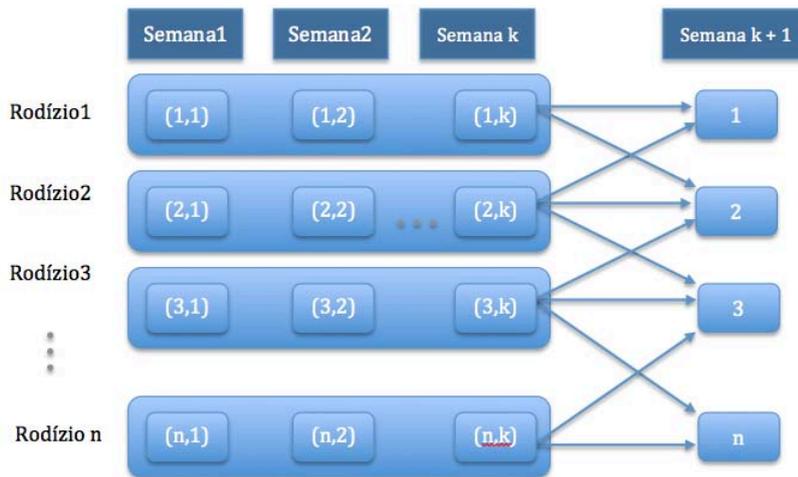


Figura 5. Rede Mensal – Formação do Rodízio Mensal

O problema é resolvido transformando-o em um problema de circulação, e aplicando-se o algoritmo *Out-of-Kilter*. Assim é necessário adicionar nós e arcos auxiliares: *i*) os nós $2n+1$ e $2n+2$ que representam a origem e o destino dos arcos do rodízio de oferta e de demanda respectivamente, *ii*) n arcos ligando o nó de oferta aos n nós dos rodízios já definidos até a semana k , com custo zero, limite inferior e superior iguais a um, *iii*) n arcos conectando os nós referentes à semana $k + 1$ ao nó de demanda, com mesmas características dos arcos anteriores, e *iv*) um arco de retorno ligando o nó de demanda ao nó de oferta, com custo e limite inferior iguais a zero e limite superior igual a um inteiro suficientemente grande, por exemplo igual a n . Matematicamente, o modelo de circulação a ser otimizado tem das as seguintes características:

$$\text{Min } \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} x_{ij} \quad \text{sujeito a} \quad (1)$$

$$\sum x_{ij} - \sum x_{ji} = 0 \quad \forall i, j \in \{1, 2, \dots, 2n+2\} \quad (2)$$

$$l_{ij} \leq x_{ij} \leq u_{ij} \quad \forall (i, j) \in A \quad (3)$$

A equação (1) procura minimizar o custo dos arcos utilizados, enquanto a (2) garante o equilíbrio de fluxo nos nós. A equação (3) assegura que o fluxo respeite os limites inferiores e superiores nos arcos. A solução deste modelo permite definir qual o rodízio responsável por cada bloco de jornadas que serão executadas na próxima semana de forma a minimizar o custo. Repete-se então esse procedimento para atribuir todas as semanas a um rodízio mensal tantas vezes quanto for o número de semanas no horizonte de planejamento.

4. Resultados

Os dois modelos combinados neste trabalho, a saber, o de Leite (2012) para gerar a escala semanal e o de Mayrink e Silva (2010) para combinar as semanas, são modelos de fluxo em redes, os quais foram resolvidos por meio do algoritmo *Out-of-Kilter*. Os algoritmos implementados neste trabalho tanto para gerar as redes, assim como o algoritmo que resolveu os modelos de fluxo em redes, foram desenvolvidos em linguagem C/C++ e testados em um computador com processador Intel i5 2.3 Ghz e 4GB de memória RAM, sob o sistema operacional *Windows Seven*.

Os testes foram realizados com dados de uma empresa que opera na cidade de Belo Horizonte – MG. Estes dados referem-se a um período de 5 semanas com início em uma segunda-feira e término em um domingo, sem a ocorrência de feriados. Estes dados não fáceis de serem obtidos visto que as empresas do setor não têm tradição em manter um sistema de informações adequado e atualizado.

A Tabela 1 mostra as características dos dados de entrada. Neste caso temos um conjunto de 104 jornadas a serem executadas em cada dia útil, com diferentes tempos de duração. Dentre este total, 4 são do tipo dupla-pegada e 13 são do tipo noturna. Somando as horas-extras das jornadas que ultrapassam as 06:40 horas de duração (tempo normal de remuneração), temos um total de 62:46 horas. E somando a ociosidade das jornadas que se encerram antes do tempo normal de remuneração temos 78:36 horas. Da mesma maneira temos os dados dos sábados e dos domingos do horizonte de planejamento. Ao resolver o PRT, é considerado que todos os dias úteis serão executadas as mesmas jornadas de trabalho, o mesmo ocorrendo com os sábados e os domingos do período. A escala gerada se constitui em um planejamento da operação das tripulações, o que não garante que elas serão cumpridas em sua exatidão, devido às intercorrências que podem acontecer no trânsito de uma cidade grande.

Tabela 1. Caracterização dos dados de entrada.

Tipo de Dia	Jornadas	Dupla-pegada	Noturna	Horas-extras	Ociosidade
Dia Útil	104	4	13	62:46	78:36
Sábado	70	11	0	45:37	26:54
Domingo	53	9	0	27:41	16:01

Nos testes realizados foram levados em consideração apenas os motoristas, pois estes são responsáveis por retirar o veículo na garagem no início da operação e retornar com o veículo à garagem ao final da operação. Os resultados obtidos através dos modelos propostos neste trabalho estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Resultados.

	Jornadas	Horas-Extras	Horas Ociosas	HE – HO
Modelo Proposto	104	111:02	255:32	144:30
Leite (2012)	104	1.106:33	933:26	173:10
Mayrink e Silva(2010)	104	475:53	719:48	243:55

Os dados apresentados na Tabela 2 mostram que a solução obtida pelo modelo proposto neste trabalho foi bem melhor do que os resultados obtidos nos trabalhos anteriores. Foi possível reduzir cerca de 90% de horas-extras e 73% de horas ociosas dos resultados em relação ao resultado obtido por Leite (2012). Em relação ao resultado devido ao modelo proposto por Mayrink (e Silva), as reduções foram de 77% de horas-extras e 65% de horas ociosas. A diferença entre horas-extras e horas ociosas também superou os resultados anteriores, obtendo reduções de 17% em relação à diferença em Leite (2012) e de 41% em relação à diferença percebida em Mayrink e Silva(2010). Este último resultado, sobre o módulo da diferença entre horas-extras e horas ociosas, também é significativo pois mostra que as jornadas são mais equilibradas em termos de tempo médio de duração. Estes modelos não abordam a questão as folgas legais, e por esta razão não há a minimização no número total de jornadas. Embora este modelo tenha sido aplicado a apenas uma empresa, ele é capaz de resolver o PRT para qualquer outra empresa que obedeça às mesmas regras operacionais e leis trabalhistas.

5. Conclusões

Neste trabalho, o PRT é resolvido em duas etapas: primeiro é utilizado um modelo de fluxo em redes que representa a operação de uma semana de trabalho das tripulações da empresa. Este modelo não é eficiente para resolver o problema, mas seus resultados apresentam uma diferença significativamente reduzida entre horas extras e horas ociosas. Assim, é utilizado um segundo modelo de fluxo em redes, ou seja, o modelo de assinalamento, que combina sucessivamente as semanas do período de planejamento. Este segundo modelo combina as semanas compensando ao máximo as horas extras com as horas ociosas contidas das diferentes jornadas semanais.

Os testes comparativos foram realizados com dados reais de uma empresa de transporte público que atua em Belo Horizonte e mostraram que o modelo combinado levou a uma solução melhor do que a solução de cada modelo executado separadamente. Desta forma foi possível obter reduções significativas em relação ao total de horas extras e horas ociosas contidas na escala da empresa.

Embora o modelo híbrido seja resolvido com algoritmos de fluxo em redes, que sempre atingem a solução ótima, ele não é capaz de representar completamente o problema. Portanto não é possível garantir que a solução ótima para esta etapa do problema tenha sido alcançada. Este trabalho ainda está em fase de desenvolvimento e sua continuidade deve se dar utilizando a solução obtida como solução inicial de uma metaheurística construtiva. Esta metaheurística deve ser capaz de melhorar a solução inicial e ainda incluir as folgas legais, o que ainda não é contemplado nesta etapa do trabalho.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e à FAPEMIG pelo apoio recebido no desenvolvimento deste trabalho.

Referências

- Ahuja, R. K., Magnanti, T. L., e Orlin, J. B.** *Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1993.
- Carraresi, P. e Gallo, G.** (1984), A multi-level bottleneck assignment approach to the bus drivers rostering problem. *European Journal of Operational Research*, 16(2):163–173.
- Leite, P. V. S.** *Resolução do problema de rodizio de tripulações usando um modelo de fluxo em redes*. Monografia de Graduação – Engenharia de Controle e Automação, Universidade Federal de Ouro Preto, 2012
- Lin, S. e Kernighan, B. W.** (1973), An effective heuristic for the traveling salesman problem, *Operations Research* 21, 498–516.
- Mayrink, V. T. M. e Silva, G. P.** (2010), Otimização da escala mensal de tripulações do sistema de transporte público. *Panorama Nacional da Pesquisa em Transportes*, 1:185–197.
- Mesquita, M., Moz, M., Paias, A., Paixao, J., Pato, M., e Respicio, A.** (2011), A new model for the integrated vehicle-crew-rostering problem and a computational study on rosters. *Journal of Scheduling*, 14:319–334. 10.1007/s10951-010-0195-8.
- Nurmi, K., Kyngas, J., e Post, G.** (2012), Driver rostering for bus transit companies. *Engineering Letters*, 19(2):125–132.
- Vasconcelos, E. A.**, *Transporte Urbano espaço e Equidade: Análise das Políticas Públicas*, AnnaBlume, São Paulo - SP, 2001.
- Yunes, T. H., Mouro, A. V., e Souza, C. C.**, Modeling and solving a crew rostering problem with constraint. *Relatório Técnico, n. IC-00-04*, Universidade de Campinas, 2000 (<http://www.ic.unicamp.br/~cid/GOA-pages/pubtexts/rt00-04.ps.gz>, 5, 2012).