

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Descrição dos problemas ferroviários

A alta complexidade de um sistema ferroviário exige que um grande número de decisões inter-relacionadas sejam tomadas permanentemente para garantir a viabilidade da sua operação, procurando também, índices crescentes de eficiência e robustez. Como tais decisões dependem de um grande volume de informações e exigem atenção a inúmeros detalhes técnicos, a única abordagem viável para controlar, planejar e operar uma ferrovia é dividir o problema de operação global em subproblemas menores, de dimensões, complexidades e estrutura apropriadas para serem resolvidos separadamente.

Os problemas de transporte ferroviário podem ser classificados de diversas maneiras. Por exemplo, problemas de ferrovias de carga ou de passageiros; problemas locais (envolvendo apenas operações locais de pátios ou trechos) ou globais (decisões que envolvem a maioria os recursos da ferrovia). Nos concentramos aqui em problemas globais de transporte ferroviário de carga.

Tais problemas também podem ser classificados quanto ao horizonte de planejamento. Os problemas estratégicos tratam de decisões mais estruturais da ferrovia, com impacto de longo prazo e efeito duradouro, como por exemplo, a aquisição de novos equipamentos; construção, melhoria ou mesmo desativação de trechos; construção de silos para depósitos de mercadorias e outros. No nível tático, os problemas têm impacto de curto e médio prazos e são também chamados de problemas de planejamento. Normalmente, esses problemas consistem em definir estratégias a serem adotadas na ferrovia, modos de operação e planos válidos por um período razoável de tempo (por exemplo um mês). Nessa classe de problemas estão, por exemplo, o *Problema de Planejamento de Atendimento a Demandas* e o *Problema*

da *Elaboração da Grade de Trens*. Estes problemas estão descritos mais adiante.

A curtíssimo prazo, existem os problemas operacionais que dizem respeito a decisões que devem ser tomadas imediatamente, ou no máximo em um dia. Esse último tipo de problemas deve considerar o maior número de detalhes possível e serve para ajustar os planos previamente definidos à realidade, levando-se em conta todos os imprevistos ocorridos. Dentro desta classe se encontram o *Problema de Fluxo de Vagões*, o *Problema de Fluxo de Locomotivas*, o *Problema de Escala de Trens* e o *Problema de Escalonamento de Maquinistas*.

Alguns exemplos de problemas ferroviários estão descritos abaixo:

Problema de Planejamento de Atendimento as Demandas:

Consiste em definir as metas de atendimento para um determinado período - usualmente um mês - levando-se em conta as capacidades da malha e o tamanho da frota de vagões. Ele é de grande importância, pois define diretrizes de atendimento que vão servir como base para todo o planejamento e operação mensal, afetando de maneira crítica todo o funcionamento de uma ferrovia. Em um contexto em que a demanda supera a capacidade de atendimento, ele determina o subconjunto das demandas a atender para maximizar o retorno (lucro ou receita). Esse problema pode ser tanto de nível estratégico, pois avalia o impacto (na receita ou lucro) de investimentos em vagão, capacidade de tração e em novos trechos de malha, quanto de nível tático, já que determina o plano de atendimento que maximiza o retorno através de uma melhor utilização da capacidade e auxilia na alocação de tração e na elaboração das grades de trens. Fukasawa et al. [18] propõe um modelo para a solução desse problema.

Problema da Elaboração da Grade de Trens: Determina a grade de trens, isso é, ele sugere o itinerário e os horários de cada trem na malha de modo a maximizar o atendimento das demandas. Na grade estão todos os trens com os dias da semana em que vão circular e os horários que chegam e partem de cada pátio. Esse problema é de nível tático, servindo de base para que a escala de trens possa ser realizada. Em Caprara et al. [7] é desenvolvido um modelo para definir a grade dos trens em uma única rota ligando duas estações, com algumas estações intermediárias.

Problema de Fluxo de Vagões: Consiste em determinar a distribuição de vagões carregados e vazios na malha ferroviária, definindo as movimentações, anexações e desanexações para cada vagão da frota em um intervalo de vários dias (usualmente uma semana). O objetivo é escolher quanto e como atender cada demanda de modo a maximizar o retorno (lucro ou receita) no horizonte planejado. Esse problema pode ser de nível operacional, definindo que vagões serão anexados e desanexados em cada parada para cada trem; tático, auxiliando na formação de trens e permitindo analisar que demandas podem ser atendidas com diferentes grades de trens (cenários); ou estratégico, avaliando cenários com diferentes dimensões e perfis de frota. Em Fukasawa et al. [14] um modelo para esse problema é apresentado.

Problema de Fluxo de Locomotivas: Esse problema é de nível operacional e consiste em determinar o melhor plano de viagens de cada locomotiva da frota para um pequeno horizonte de planejamento (2 dias, por exemplo). De acordo com a situação da frota de locomotivas no momento e com a necessidade de tração em cada trecho da malha do horizonte de planejamento determina-se a composição de locomotivas que formará cada trem, assim como as locomotivas que serão rebocadas por trens de modo a maximizar o atendimento com o menor custo possível. Em Ahuja et al. [2] e em Kocjan et al. [16] são apresentados modelos para esse tipo de problema.

Problema da Escala de Trens: O problema da escala de trens tem como objetivo adaptar a grade de trens para a realidade atual da malha. A cada instante, eventos como quebra de locomotiva, interdição temporária de um trecho ou pátio e cancelamento de demandas, acontecem e a grade precisa ser ajustada para se adequar à nova situação. Na escala são definidos quais trens da grade efetivamente circularão e que novos trens devem ser criados; os horários de partida dos trens são ajustados; a composição de locomotivas é adaptada de acordo com a disponibilidade e necessidade atual.

Problema de Escalonamento de Maquinistas (Problema de Equipagem): O problema de escalonamento de maquinistas trata da alocação de maquinistas a trens. Os trens podem precisar de um ou dois maquinistas de acordo com os equipamentos disponíveis (por ex. GPS) e com a posição de cada locomotiva no trem (existem duas posições possíveis para a locomotiva no trem: frente curta e frente comprida. Por questões de segurança, sempre que a primeira locomotiva do trem estiver na posição de frente comprida é necessário

um novo maquinista). O objetivo é diminuir o custo de contratação de pessoal de operação, obedecendo as regras de trabalho da legislação local específica do setor e coordenando o plano de equipagem com o planejamento dos trens. Os índices a serem melhorados são trem.km/maquinista-irregular, horas de descanso fora da residência e outros. Tipicamente, o problema de escalonamento de pessoal pode se dividido em dois, o de programação (Scheduling) e o de escalação (Rostering), como é demonstrado em Caprara et al. [8].

Muitos desses subproblemas podem ser combinados em um único problema. Em Brucker et al. [4] e Cordeau et al. [11] é apresentado um modelo de multifluxos para resolver o *Problema do Fluxo de Vagões e Locomotivas* simultaneamente para o transporte de passageiros. No transporte ferroviário de passageiros normalmente os mesmos trens circulam semanalmente; sendo assim, as composições e os vagões carregados que vão em cada trem já estão pré-definidos, o que não ocorre no transporte de carga.

Diversos estudos desses e de outros subproblemas, tanto em transporte ferroviário de passageiros como de carga, estão disponíveis na literatura. Para maiores detalhes, são sugeridos ao leitor interessado dois artigos: uma pesquisa de Cordeau et al. [10] e um artigo sobre otimização discreta em ferrovias de Bussieck et al. [5].

Grande parte desses subproblemas são intimamente ligados, e nem sempre podem ser resolvidos de maneira independente.

2.2 O modelo de multifluxos

O modelo de multifluxos é uma abordagem muito comum para resolver problemas de transporte. Como o problema estudado foi modelado e formulado com base no modelo de multifluxos, será dada nesta seção uma breve introdução sobre o mesmo. Durante esta e demais seções da dissertação, assume-se que o leitor tenha conhecimentos básicos de programação linear e inteira. Ao leitor interessado, recomenda-se a leitura de Bertsimas & Tsitsiklis [3] para programação linear e Wolsey [17] para programação inteira.

Os problemas de fluxos em redes são uma subclasse particularmente rica de problemas de otimização e possuem aplicações em diversas áreas como

telecomunicações, física, química, logística, etc. Há diversos problemas de fluxo em rede, onde são considerados um ou mais produtos distintos. Dada uma rede, os problemas de fluxo simples (um único produto circulando na rede) consistem em achar o fluxo em cada arco de maneira a enviar o produto de um conjunto de uma ou mais origens S até um conjunto de um ou mais destinos T , otimizando algum critério – por exemplo minimizar os custos ou maximizar a quantidade de fluxo enviada. Os problemas de multifluxo são uma generalização dos problemas de fluxo simples e levam em conta K produtos distintos – cada produto k tem um conjunto de uma ou mais origens S^k e um conjunto de um ou mais destinos T^k – que compartilham dos mesmos recursos da rede, ou seja, cada um dos produtos compete por um recurso escasso que é a capacidade dos arcos da rede.

Há diversos problemas de fluxos simples, como o fluxo a custo mínimo, fluxo máximo e outros, que possuem algoritmos combinatórios polinomiais capazes de gerar a solução ótima inteira (Cook et. al. [9] e Ahuja et al. [1]). Por outro lado, o problema de multifluxos, quando há a restrição de integralidade dos fluxos, se torna NP-difícil (Even et al. [12] mostra que o problema de decisão com apenas 2 fluxos é NP-completo). Apesar disto, a formulação usual para este modelo possui uma boa relaxação linear, fornecendo bons limites para a solução, permitindo que diversas instâncias de tamanho consideravelmente grande sejam resolvidas de maneira ótima.

A formulação básica na qual será baseada a formulação para o modelo proposto é:

$$\text{Max} \sum_{1 \leq k \leq K} \sum_{v \in S^k} c^k \cdot w_v^k$$

$$\sum_{a \in \delta^+(v)} f_a^k - \sum_{a \in \delta^-(v)} f_a^k = \begin{cases} w_v^k & , \text{ se } v \in S^k \\ -w_v^k & , \text{ se } v \in T^k \\ 0 & , \text{ caso contrário} \end{cases} \quad \forall v \in V, k = 1, 2, \dots, K \quad (2-1)$$

$$\sum_{1 \leq k \leq K} f_a^k \leq u_a, \forall a \in A \quad (2-2)$$

$$f_a^k \geq 0, w_k \geq 0 \quad (2-3)$$

onde K é o número total de produtos, as variáveis w_v^k representam a quantidade do produto k que é fornecida/consumida no vértice v , f_a^k a quantidade de produto k que passa pelo arco a , c^k a tarifa unitária associada a cada produto, u_a a capacidade de cada arco a , e V e A são os conjuntos de vértices e arestas do grafo direcionado $G = (V, A)$ que representa a rede.

As restrições (2-1) determinam a conservação de fluxo de cada um dos produtos considerados. As restrições (2-2) controlam a capacidade de cada trecho não permitindo que ela seja violada. Estas restrições diferenciam um problema de multifluxos de diversos problemas de fluxo simples independentes.