

# 1 Introdução

## 1.1 Motivação

Ferramentas de otimização são cada vez mais necessárias num mundo onde sistemas cada vez mais complexos devem atender a crescentes demandas usando recursos limitados. Apesar disso, em todo mundo e em particular no Brasil, a aplicação da otimização para a solução de problemas reais ainda é feita de maneira limitada. Em grande parte, os problemas são resolvidos manualmente ou no máximo com apoio de métodos de simulação ou heurísticas simples. As soluções encontradas podem estar muito distantes do ótimo, com conseqüente perda de eficiência.

Dentre as diversas áreas em que a otimização pode ser aplicada para aumentar a eficiência e o aproveitamento de recursos, tem se destacado a área de Logística de Transportes que é considerada por alguns autores como a última grande fronteira inexplorada para a redução de custos. Em particular, a área de logística ferroviária apresenta inúmeros problemas que podem ser modelados e resolvidos através de métodos de otimização. Segundo Cordeau et al. [1], a aplicação de tais métodos na área ferroviária tem crescido em diversos países nos últimos anos, mas apesar disso, ainda é bastante rara a utilização de otimização nas ferrovias brasileiras.

Além de acompanhar uma tendência mundial, outros fatores indicam a necessidade das ferrovias brasileiras rapidamente começarem a se utilizar da otimização para operar de maneira mais eficiente. Atualmente, a grande maioria dos transportes no país ainda é feito através da malha rodoviária. Segundo estatísticas da antiga Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes (GEIPOT), no ano de 2000, 60,5% do transporte de carga foi feito através de rodovias, enquanto que apenas 20,9% foi feito através de ferrovias. Em alguns estados, a situação é ainda mais crítica. Em São Paulo, o mais importante centro econômico do país, no mesmo ano, 93,3 % dos transportes foram feitos por rodovias enquanto apenas 5,5 % através de ferrovias. Esse cenário, aliado à expectativa de crescimento

da demanda por transportes de cargas e à situação de caos em que se encontram as rodovias brasileiras, pede por buscas de transportes alternativos de maneira a aliviar a sobrecarga rodoviária, permitindo uma redução nos custos de frete. Porém, investimentos em construção de novas linhas férreas e novos equipamentos são extremamente caros e demoram muito a serem implementados. Dessa forma, urge um melhor aproveitamento dos recursos já existentes, melhorando o desempenho e a eficiência desse tipo de transporte.

Sob o ponto de vista das empresas operadoras das ferrovias, aumentar a eficiência é um benefício direto. Por isso, imediatamente após a privatização da malha ferroviária brasileira, já houve um movimento nesse sentido na forma de investimentos em Sistemas de Informação. Isso fez com que os planejadores, hoje, possam contar com informações confiáveis sobre o que está acontecendo em cada parte da ferrovia. Entretanto, ferramentas mais complexas capazes de usar essa grande massa de informações para ajudar a tomar decisões de maneira eficiente ainda são necessárias. Esta dissertação tem como objetivo apresentar os modelos e técnicas de otimização utilizados para resolver dois problemas reais dessa área, o *Problema de Planejamento de Atendimento (PPA)* e o *Problema de Fluxo de Vagões (PFV)*.

## 1.2

### Descrição dos problemas ferroviários

A operação de um sistema ferroviário exige que um grande número de decisões inter-relacionadas tenham que ser tomadas a todo tempo. 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 dividindo o problema de operação global em subproblemas menores, suficientemente pequenos e estruturados para serem resolvidos separadamente. Por exemplo, pode-se primeiro decidir quantos vagões de cada tipo serão anexados a um trem para, de acordo com a decisão tomada, abordar o problema de como manobrar esses vagões no pátio. Diversos estudos de tais 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. [1] e um artigo sobre otimização discreta em ferrovias de Bussieck et al. [2].

O trabalho desta dissertação iniciou-se com a observação do modo de operar da maior empresa operadora ferroviária da América Latina, tentando perceber quais problemas surgem no dia-a-dia, a maneira como são resolvidos e de que forma a otimização poderia ser aplicada a eles. Tal empresa possui um enorme

volume de pedidos mensais de carga (chegando a mais de 2 milhões de toneladas em certos meses), sendo responsável pelo transporte de diversas cargas para pontos importantes como o porto de Paranaguá, Uruguaiana (ponto de intercâmbio com a malha ferroviária da Argentina) e inúmeros outros distribuídos nos 4 estados onde opera (RS, PR, SC e SP). As cargas transportadas são as mais diversas, indo desde produtos alimentícios a granel como soja, milho, trigo e açúcar, até contêineres próprios ou de clientes, passando por combustíveis, madeira, calcário, cimento, metais, areia e outros.

Tipicamente, em um mês, a operadora recebe inúmeros pedidos de transporte e elabora – baseada em estimativas de capacidade da malha e da frota – um primeiro planejamento de atendimento dessas demandas, decidindo a quantidade atendida, as rotas planejadas e os ciclos de vagões necessários. Em seguida é feito um planejamento de montagem de trens, determinando rotas, paradas, horários, número e tipo de locomotivas para que as demandas determinadas possam ser atendidas de maneira eficiente. Esse planejamento mensal é corrigido semana a semana, possivelmente alterando a programação dos trens ou o planejamento de atendimento das demandas, de acordo com dados mais atualizados. No dia-a-dia, são feitos os ajustes finais à grade (programação) de trens, levando-se em conta os freqüentes imprevistos como quebra de locomotiva, inutilização temporária de um trecho ou pátio e outros. Por fim, baseado na grade, nas demandas do dia e na posição dos vagões na ferrovia, são decididas todas as operações que devem ser feitas com os vagões (em que trens e pátios eles devem ser anexados, desanexados, carregados ou descarregados) para atender as demandas, usando a grade de trens determinada. Outros detalhes dão origem a novos subproblemas que devem ser resolvidos, como a alocação de locomotivas a trens, a manobra eficiente dos vagões nos pátios, a programação de manutenção de locomotivas, a decisão de construir depósitos em determinados pátios para estocar carga e liberar vagões e inúmeros outros.

Todos esses problemas são fortes candidatos à aplicação de técnicas de otimização, devido ao grande número de decisões a serem tomadas, que certamente não permitem que os atuais procedimentos manuais levem a soluções ótimas ou quase-ótimas. Foram escolhidos dois desses problemas para modelar e resolver de maneira eficiente.

### 1.2.1

#### **Classificação dos problemas**

Os problemas ferroviários 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 todos os recursos da ferrovia).

Nesta dissertação são estudados apenas problemas globais de ferrovia de carga e, portanto, a única classificação relevante é 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). 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.

### 1.3

#### Os problemas reais estudados

O primeiro problema resolvido, chamado de *Problema de Planejamento de Atendimento (PPA)*, 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 e outros aspectos como *blocagem*, *classes de vagões*<sup>1</sup> e a *disponibilidade de vagões vazios*. Esse problema foi escolhido devido à sua grande importância, pois ele 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. Esse é um problema de nível tático, como o próprio nome sugere.

Para esse problema, foi desenvolvido um modelo monoperiódico baseado no modelo de multifluxos, com algumas alterações para considerar a montagem de *blocos* e de *classes de vagões*. O modelo determina não só a quantidade que deve ser atendida de cada demanda, mas também como deve ser atendida – qual o caminho de cada vagão – e o fluxo de vagões vazios que torna viável o atendimento.

O segundo problema, chamado de *Problema de Fluxo de Vagões (PFV)*, é de nível operacional e consiste em determinar a rota completa de cada vagão na

---

<sup>1</sup>As definições dos conceitos de blocagem e classe de vagões serão fornecidas no capítulo 2

malha ferroviária, bem como sua seqüência de carregamentos e descarregamentos, em um intervalo de vários dias (usualmente uma semana). É importante notar que vagões carregados ou vazios só podem ser movidos de um pátio a outro quando anexados a um trem. Neste problema, assume-se que a grade de trens (rota, horário e capacidade de cada trem) já está definida. O objetivo é – para um dado período de tempo – escolher quanto e como atender cada demanda, com ou sem atraso, de modo a maximizar o lucro total. A importância deste problema reside no fato que se o fluxo de vagões for decidido levando apenas em consideração a situação atual, ignorando previsões de futuras demandas e descarregamentos, pode-se facilmente cair em uma situação onde a má disposição dos vagões na malha prejudique bastante a eficiência das operações.

Assim como para o *PPA*, é proposto para este problema um modelo baseado no modelo de multifluxos, desta vez multiperiférico. Nele são contemplados todos os possíveis movimentos e operações de vagões que podem ser feitos no período considerado.

As formulações feitas para os modelos dos dois problemas possuem um grande número de variáveis, principalmente a do *PFV* (podendo chegar a milhões de variáveis), e foram resolvidas utilizando um pacote genérico de programação inteira, CPLEX 7.1. Para poder resolver problemas de programação inteira de tamanho tão grande foram necessários alguns pré-processamentos de modo a reduzir o número de variáveis a um tamanho tratável. As relaxações lineares das formulações destes modelos fornecem limites muito bons, permitindo a obtenção de soluções ótimas.

## 1.4

### O modelo de multifluxos

Como os dois problemas estudados foram modelados e formulados com base no modelo de multifluxos, será dada nesta seção uma breve introdução a este modelo. 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 [4] 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*<sup>2</sup> 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 multifluxos 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 [5] e Ahuja et al. [6]). Por outro lado, o problema de multifluxos, quando há a restrição de integralidade dos fluxos, se torna NP-difícil (Even et al. [7] 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 serão baseadas as formulações para os modelos propostos é:

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

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

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

$$f_a^k \geq 0, w_k \geq 0 \quad (1-3)$$

<sup>2</sup>O termo produtos será utilizado ao longo desta tese em substituição ao termo em inglês *commodity*. Este termo deve ser interpretado no contexto de programação matemática, derivado de um problema clássico da área chamado *multicommodity flows*. Nesse contexto, produtos são quaisquer entidades distintas que circulem na rede, por exemplo, ligações telefônicas, mercadorias, tipos de vagão, etc. Não se deve confundir com a interpretação do mesmo termo (*commodity*) no contexto da área de logística

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 (1-1) determinam a conservação de fluxo de cada um dos produtos considerados. As restrições (1-2) 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.

## 1.5

### Organização da dissertação

Esta dissertação deu lugar a dois artigos (submetidos para publicação). Uma versão preliminar do artigo sobre o *PFV* foi apresentada em Fukasawa et al. [8]. No capítulo 2 é descrito o *PPA*, enquanto que o *PFV* é descrito no capítulo 3. As descrições incluem apresentação do problema, da formulação, técnicas de pré-processamento e os resultados computacionais obtidos. No capítulo final são apresentadas as conclusões, bem como futuros trabalhos a serem desenvolvidos.