

1 Introdução

1.1 Motivação

Problemas de otimização estão presentes em um largo espectro de decisões em contextos como logística, finanças, telecomunicações, entre outros. Por este motivo, ferramentas de otimização se tornam cada vez mais necessárias para o planejamento dos diversos problemas existentes.

A formulação destes problemas de decisão como um programa inteiro misto (MIP, do inglês *Mixed Integer Program*) é extremamente atraente quando se considera o aspecto de Engenharia de Software no desenvolvimento de uma ferramenta de apoio a decisão. Isto por várias razões. Os problemas ficam definidos precisamente nos modelos desenvolvidos para as suas respectivas resoluções como MIPs, a arquitetura de resolução fica baseada em componentes bastantes testados, como os códigos comerciais disponíveis e, finalmente, novas restrições e mudanças no problema original podem ser incorporadas de maneira bem definida e, na maioria das vezes, com um custo de desenvolvimento pequeno. Isto tudo facilita a correção, a manutenção e a evolução da ferramenta com respeito aos códigos relativos à resolução do problema.

Uma área onde a aplicação de ferramentas de otimização têm obtido destaque é na logística ferroviária. Isto ocorre porque existe uma grande necessidade no aumento da eficiência e no aproveitamento dos recursos existentes. Um vasto número de problemas que surgem nesta área podem ser beneficiados com a modelagem e resolução utilizando-se os métodos de otimização existentes. Um destes problemas é o *Problema de Planejamento de Atendimento*. Este problema, que foi tema de estudo do trabalho Fukasawa [15], onde uma formulação para o problema foi proposta e sua solução vastamente discutida, é a motivação principal desta dissertação.

Após um bom tempo de utilização desta formulação em um ambiente de operação real, onde os usuários tinham como objetivo fazer o planejamento das operações para o mês seguinte e para o período de um ano, verificou-se que uma

formulação mais aderente à realidade seria necessária. Esta dissertação tem como objetivo apresentar um novo modelo para o problema proposto em Fukasawa [15] no que diz respeito à aderência com a operação ferroviária real. Entre os conceitos adicionados estão a consideração dos seguintes fatores: (i) *tração* - que traz para o modelo o fluxo de locomotivas e vincula este fluxo ao fluxo de vagões, que é o único considerado em [15]; (ii) *múltiplos períodos* - aqui o novo modelo permite que a sazonalidade da demanda para transporte possa ser representada no modelo; (iii) *trens e rotas* - que corresponde a vinculação do uso das locomotivas aos percursos que podem efetivamente ser realizados no dia-a-dia ferroviário. É também objetivo deste texto propor técnicas de otimização necessárias para a resolução do *Problema de Planejamento de Atendimento* e de duas extensões naturais deste problema, o *Problema de Congestionamento de Vagões*, que considera que o tempo utilizado para se atravessar um determinado trecho da malha ferroviária cresce à medida em que o movimento neste trecho aumenta; e o *Problema de Determinação de Paradas*, que se interessa na decisão dos pátios que devem ser servidos por um trem, ou seja, onde o trem deve parar.

A formulação proposta para o problema principal possui um grande número de variáveis. Porém, este número pode crescer demasiadamente com a adição dos requisitos necessários aos dois subproblemas estudados. Para encontrar uma solução em um problema de programação inteira como este, foi necessária a utilização de alguns algoritmos de pré-processamento para reduzir o número de variáveis e restrições a um tamanho viável.

1.2 Problemas Estudados

O *Problema de Planejamento de Atendimento* surgiu da necessidade da empresa operadora de uma grande malha ferroviária de melhorar a utilização de seus recursos de forma a obter um melhor retorno financeiro gerado por suas operações. Um planejamento adequado é um passo essencial para a redução dos custos e uma maior rentabilidade.

Esta empresa atende a uma série de clientes, que necessitam transportar uma certa quantidade de um tipo de produto entre duas localidades, que possuem seu caminho coberto completa ou parcialmente pela malha ferroviária em questão. É exatamente desta forma que a empresa operadora da malha obtém seus lucros. Cada um destes clientes paga um valor de frete, que se baseia no peso total do produto a ser transportado e na distância a ser percorrida na execução deste transporte. Cada pedido de transporte de produto, normalmente chamado de demanda de um produto, além de gerar uma receita baseada nos fretes pagos

pelos clientes, gera, também, um custo, composto por vários gastos associados ao transporte desta demanda, como consumo de combustível das locomotivas utilizadas, impostos, entre outros. Sendo assim, o lucro obtido pelo atendimento da demanda de um certo produto é a diferença da receita obtida a partir do frete e dos custos associados ao transporte da mesma. O objetivo da empresa operadora da malha é maximizar o somatório dos lucros obtidos pelos atendimentos das demandas em um certo período de tempo. Entretanto, a redução de custos é uma tarefa complexa. A razão disto é que o custo está associado à operação como um todo e não ao transporte (atendimento) específico de cada demanda.

O principal problema que aparece neste cenário é que, normalmente, a quantidade de demandas de produtos existentes em um determinado período de tempo, como por exemplo, em um mês, é altíssima e, com isso, estas demandas não podem ser completamente atendidas, visto que os recursos disponíveis na malha ferroviária, como locomotivas, tipos de vagões, capacidade de suporte em um trecho, entre outros, restringem a quantidade de produtos que podem ser transportados. Com isso, se torna extremamente necessária a escolha, de forma ótima, das demandas a serem atendidas e o percentual de cada atendimento em relação à quantidade total demandada. É esta escolha ótima que a formulação matemática para o *Problema de Planejamento de Atendimento* deve contemplar.

Dois problemas que surgem como uma extensão do *Problema de Planejamento de Atendimento* serão estudados neste trabalho. Eles existem a partir da necessidade de se aproximar cada vez mais a formulação matemática do *Problema de Planejamento de Atendimento* à realidade encontrada pela empresa operadora da malha ferroviária.

O primeiro problema é o *Problema da Análise de Congestionamento*, um problema que surge quando o transporte das demandas sendo atendidas em um determinado período exige a passagem de um número muito grande de trens em um certo trecho da malha, o que pode resultar em um aumento no tempo de percurso para este trecho. Logo, para a sua solução, é necessário a alteração dos tempos de percurso de cada trecho da malha em função do número de trens que atravessarão este trecho. Esta alteração nos tempos de percurso dos trechos pode influenciar drasticamente na decisão dos atendimentos das demandas. Sendo assim, a extensão à formulação matemática desenvolvida deve refletir estas características, considerando os tempos corretos para cada trecho da malha ferroviária.

O segundo e último problema, que surge a partir do *Problema de Planejamento de Atendimento*, que será estudado neste trabalho, é o *Problema de Determinação de Paradas*. Este é um problema que vem da necessidade da empresa operadora da malha ferroviária em determinar em quais pátios da malha um certo

trem deve parar. Paradas são necessárias por uma série de razões. Uma destas razões é que não há como uma demanda ser carregada ou descarregada de um trem se este não efetuar uma parada nos pátios de origem e destino da demanda, respectivamente. Tais paradas acarretam em um aumento no tempo de viagem de um trem, pois parar o trem, fazer os engates e desengates(carregar/descarregar), e acelerar o trem até a sua velocidade ideal, tomam um tempo que pode ser crítico com relação às demandas que podem ser atendidas pela operação global. Em particular quando existem muitas demandas concorrendo por um certo trem. Isto implica que a formulação matemática do problema, criada para determinar quais paradas devem ser executadas, deve escolhê-las de forma a atender as melhores demandas entre as existentes.

1.3

Bibliografia Relacionada

Os problemas encontrados na logística ferroviária podem ser classificados de diversas maneiras: em função do que é transportado (passageiros ou carga), em função do nível de visão da malha (local ou global), em função do horizonte de tempo do planejamento (estratégico, tático ou operacional), entre outros.

Alguns problemas ferroviários estão descritos abaixo:

- **Problema de Fluxo de Vagões:** Consiste em determinar a distribuição de vagões carregados e vazios na malha ferroviária, definido as movimentações, anexações e desanexações de cada vagão da frota em um intervalo de vários dias (usualmente uma semana). O objetivo é escolher quanto e como atender de cada demanda de modo a maximizar o retorno (lucro ou receita) no horizonte planejado. Este problema pode ser de nível operacional, definindo que vagões serão anexados e desanexados em cada parada 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. [15] um modelo para este problema é apresentado.
- **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 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 outro maquinista. O objetivo deste problema é diminuir o custo de contratação de pessoal de operação, obedecendo às regras de trabalho da legislação local específica do setor e coordenando o plano de equipagem com o planejamento dos trens. Tipicamente, o problema de escalonamento de pessoal pode ser dividido em dois, o de programação (scheduling) e o de escalação (rostering), como é demonstrado em Caprara et al. [5].

- **Problema da Elaboração da Grade de Trens:** Determina a grade de trens, isto 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. Este problema é de nível tático, servindo de base para que a escala de trens possa ser realizada. Em Caprara e al. [11] 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 Locomotivas:** Este 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 (dois 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. [14] e em Kocjan et al. [13] são apresentados modelos para este tipo de problema.

Muitos destes problemas podem ser combinados em um novo problema. Em Brucker et al. [10] e Cordeau et al. [12] é apresentado um modelo de multi-fluxos 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 destes e de outros problemas, tanto em transporte ferroviário de passageiros como de carga, estão disponíveis na literatura. Maiores detalhes podem ser encontrados no levantamento de trabalhos em modelos de otimização para logística ferroviária em Cordeau et al. [7].

1.4 Organização da Dissertação

O *Problema de Planejamento de Atendimento* é descrito detalhadamente no capítulo 2, sendo apresentada uma nova formulação e os resultados computacionais obtidos. No capítulo 3 será apresentado o *Problema da Análise de Congestionamento*, enquanto que no capítulo 4 será apresentado o *Problema de Determinação de Paradas*. Ambos os problemas caracterizam uma extensão ao *Problema de Planejamento de Atendimento*, tornando este mais próximo da realidade encontrada em uma malha ferroviária no dia-a-dia. Em cada um destes dois capítulos, serão estudadas as adições necessárias à formulação original e como estas modificações influenciam a capacidade de se encontrar soluções de forma rápida e eficiente para o problema. No capítulo final são apresentadas as conclusões, bem como futuros trabalhos a serem desenvolvidos.