Capítulo 3

Descrição do problema

O trabalho desta dissertação iniciou-se com a observação do modo de operar de uma grande empresa operadora ferroviária do Brasil, 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.

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 as demandas e quantidades a serem atendidadas, as rotas e os ciclos de vagões. 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 (Grade de trens). 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) e a composição de trens (resultando na escala de trens), levando-se em conta a localização e disponibilidade das locomotivas na malha, além dos freqüentes imprevistos como quebra de locomotiva, interdição temporária de um trecho ou pátio e outros. Por fim, baseado na escala de trens, 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 às demandas. Outros detalhes dão origem a novos subproblemas que devem ser resolvidos, como 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 possíveis, que certamente

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310414/CA

não permitem que os atuais procedimentos manuais levem a soluções ótimas ou quase-ótimas.

No presente trabalho nos concentraremos no seguinte problema:

Dadas as demandas programadas para um pequeno intervalo de tempo e os trens que podem circular a cada dia, o *Problema da Alocação ótima de Vagões e Locomotivas no curto prazo* consiste em achar um fluxo viável de vagões e locomotivas para atender as demandas do período, total ou parcialmente, de maneira a maximizar o retorno obtido.

É muito comum dividir o *Problema de Fluxo de Vagões e Locomotivas* em dois subproblemas. Primeiro os vagões são associados a trens e então as locomotivas são atribuídas de forma a gerar tração necessária em cada trem para puxar os vagões.

Assim como foi feito em Brucker et al. [4] e Cordeau et al. [11] para o caso de transporte de passageiros, nessa dissertação resolveremos o *Problema de Fluxo de Vagões e Locomotivas* simultaneamente. No caso do transporte de cargas, esse problema se torna ainda mais complexo, dado que aqui também teremos que decidir a rota dos vagões carregados e vazios e as composicões de locomotivas que fomarão cada trem.

Para um horizonde de planejamento de quatro dias será feita a distribuição de vagões e locomotivas e serão definidas as composições que formarão cada trem. Além disso, os horários de partida dos trens poderão ser ajustados para o primeiro dia do período. Aqui o primeiro dia do horizonte de planejamento é denotado por D+1 já que D é o dia em que é feito o planejamento. O sistema deve otimizar o atendimento fazendo apenas pequenas alterações na grade para ajustá-la a eventuais imprevistos como o cancelamento de demandas, ou a quebra de um vagão ou locomotiva, por exemplo; isso porque os operadores da malha ferroviária desejam o máximo de regularidade possível nas suas operações.

Ainda nesse trabalho é apresentada uma metodologia para a criação de uma "grade ótima de trens", que estende o problema para permitir variações no horário de partida de todos os trens da grade atual em todos os dias do horizonte de planejamento, considerando um conjunto de demandas padrão.

Isso é aplicável, visto que uma empresa ferroviária tipicamente recebe pedidos de demandas regulares e uma grade "boa"deve se adaptar a tais demandas, deixando que a escala diária de trens ajuste o sistema a eventuais perturbações.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310414/CA

3.1 Definições Básicas

Algumas palavras-chave precisam ser definidas para o maior detalhamento do problema:

Pátio ou Estação - constituem os pontos notáveis da rede de transporte. Um pátio tem como atributo a capacidade máxima de vagões estacionados. Os seguintes eventos podem acontecer em um pátio: vagões e locomotivas podem ficar estacionados, ser anexados ou desanexados a trens ou ainda os vagões podem ser carregados ou descarregados.

Par de Estações - é uma ligação entre duas estações vizinhas. Os principais atributos de um par de estações são a capacidade de suporte de via em número de vagões, o tempo de percurso estimado, a distancia em quilômetros, a tração em KGF (Quilograma-Força) máxima permitida e o perfil de rampa compensada, indicando a inclinação da rampa entre as estações.

Trecho ou Rota - é uma seqüência de pares de estações que forma a rota de um trem.

Vagão - é o elemento responsável pelo transporte dos produtos. Seus principais atributos são o tipo, que caracteriza a classe de produtos que podem ser transportados, a tara, que corresponde ao peso do vagão vazio, e a capacidade, que varia com a classe de produtos carregados.

Locomotiva - é o elemento responsável pelo tracionamento do conjunto. As locomotivas, dependendo do seu modelo, têm como características a tara, a KGF, a capacidade de tração (em TB) e o consumo de diesel, sendo que essas duas últimas características dependem do perfil de rampa compensada. As locomotivas podem estar ativas (gerando tração) ou podem estar desligadas (sendo arrastadas como um vagão em um trem).

Composição - é o conjunto de locomotivas ativas no trem.

Trem - é definido por uma composição de locomotivas percorrendo uma rota (trecho) em um determinado horário.

Fluxo - é definido por um cliente, uma mercadoria, uma origem, um destino e um conjunto de tipos de vagões capazes de atendê-lo.

Demanda - é caracterizada por um pedido de uma certa quantidade de vagões de um determinado fluxo, por uma data de carregamento,

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310414/CA

por uma receita (tarifa) e por uma estimativa dos tempos de carregamento e descarregamento. A data de descarregamento da demanda é indefinida.

Estado inicial dos vagões - é uma "fotografia"que mostra como os vagões estão distribuídos no instante inicial e em que situação eles se encontram. Um vagão pode estar estacionado em um pátio, pode estar sendo anexado ou desanexado de um trem, pode estar sendo carregado ou descarregado ou ainda pode estar se movimentando em trem no instante inicial. Estão associados ao estado inicial de cada vagão o tipo do vagão, o pátio em que ele se encontra, a demanda, caso ele esteja carregado e o tempo que demora até que alguma decisão sobre ele possa ser tomada.

Estado inicial das locomotivas - é uma "fotografia"que mostra como as locomotivas estão distribuídas no instante inicial. O estado inicial de uma locomotiva é definido pelo modelo da locomotiva, pelo pátio em que ela se encontra e pelo tempo que ela demora até ficar disponível.

Grade - é o planejamento do itinerário completo de todos os trens, incluindo pontos e horários de parada e tempos de manobra já previamente definidos. Ela pode ser definida como um conjunto de viagens planejadas entre pátios. Por exemplo, um trem pode partir do pátio A às 7:00 de um determinado dia e chegar no pátio B às 7:30, então partir para o pátio C às 7:55 e assim por diante.

Escala - é a programação de trens da grade para o dia seguinte. Na escala são feitos os ajustes de acordo com a situação da malha e dos recursos disponíveis no momento. As possíveis modificações da grade são: alteração da composição de locomotivas, atraso ou adiantamento no horário de partida, e até mesmo cancelamento do trem.

Fluxo viável de vagões - é uma seqüência de operações (carregamento, descarregamento, anexação e desanexação em trem) efetuadas ao longo do tempo (a partir de um instante inicial) nos vagões, ou seja, a cada instante deve ser determinado qual operação efetuar com os vagões.

Fluxo viável de locomotivas - é definido como uma seqüência de operações que indicam em que trem vai estar cada locomotiva (tracionando ou arrastada) a cada instante de tempo.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310414/CA

3.2 Considerações

Abaixo estão algumas considerações feitas na elaboração do modelo:

- Locomotivas e vagões carregados ou vazios só podem ser movidos de um pátio a outro quando anexados a um trem.
- As locomotivas podem fazer parte da composição do trem, gerando tração, ou podem ser rebocadas como um vagão.
- Uma locomotiva ativa só pode ser anexada a um trem no inicio do trecho (rota do trem) e só pode ser desanexada no final; já um vagão ou uma locomotiva desligada podem ser anexados ou desanexados a um trem em qualquer pátio da rota onde o trem fique parado tempo suficiente para isso.
- Vagões e locomotivas existentes no estado inicial só devem ser utilizados caso haja necessidade efetiva, isso é, deve-se minimizar a quantidade de recursos (vagões e locomotivas) utilizados no atendimento ótimo das demandas. Vagões ou locomotivas não utilizados podem ser mandados para manutenção por ex., ou mesmo serem realocados em algum outro pátio onde serão úteis para um maior atendimento das demandas. Para evitar essa utilização desnecessária atribui-se um custo de utilização em cada um dos recursos do estado inicial, no modelo isso significa que o vagão/locomotiva ficará parado no pátio inicial até o final do horizonte de planejamento sem que nenhuma operação seja efetuada sobre ele.
- A partir do segundo dia do horizonte de planejamento (D+2), a grade de trens não poderá sofrer modificações já que não temos como prever a situação real da malha daqui a dois dias.
- É possível que algumas demandas só possam ser atendidas parcialmente ou mesmo não possam ser atendidas por falta de recursos (vagões vazios e locomotivas disponíveis) na malha ferroviária.
- Todo trem é formado por uma e somente uma composição de locomotivas. Essas locomotivas são as responsáveis por gerar a capacidade de tração do trem.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310414/CA

3.3 Metodologia de geração das possíveis composições de cada trem

Para gerar as composições que podem formar cada trem, precisamos das seguintes informações:

- Modelos de locomotivas que podem circular em cada trecho.
- Possíveis acoplamentos entre modelos de locomotivas. Ao acoplar dois modelos diferentes de locomotivas numa mesma composição a tração gerada por cada uma das locomotivas será multiplicada por um fator de perda de tração no acoplamento.
- KGF gerada por cada modelo de locomotiva.
- KGF máxima suportada por cada trecho.

Para gerar uma quantidade viável de composições possíveis para um trem assumiremos que uma composição de locomotivas tem no máximo dois modelos diferentes de locomotiva. Na prática isso realmente acontece, salvo raros casos em que uma composição é formada por três modelos diferentes de locomotivas.

A seguir temos o algoritmo de geração de composições possíveis para cada trecho:

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310414/CA

Dados : T = Conjunto de trechos da malha
LT_t = Conjunto de locomotivas que podem circular no trecho t
LL_l = Conjunto de locomotivas que podem se acoplar a locomotiva l
Result.: ζ_t = Conjuntos de composições que podem circular em cada trecho $t \in T$

```
para todo t ∈ T faça
    ζ_t ← ∅;
    para todo l_1 ∈ LT_t faça
        n_1 = 1;
        enquanto n_1 × l_1.KGF ≤ t.KGFMax faça
            c = n_1 × l_1; ζ ← ζ ∪ {c};
            para todo l_2 ∈ LL_{l_1} faça
                n_2 = 1;
                se l_2 ∉ LT_t então
                    próximo l_2;
                enquanto n_1×l_1.KGF+n_2×l_2.KGF ≤ t.KGFMax
                faça
                    c = n_1 × l_1 + n_2 × l_2;
                    ζ_t ← ζ_t ∪ {c};
                    n_2 + 1;
            n_1 + 1;
```

Pseudo–código 1: Algoritmo de geração das possíveis composições em um trecho

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310414/CA

3.4 Exemplo

Suponha uma malha com três pátios, P1, P2 e P3, todos com capacidade de estacionamento de 10 vagões. Todos os pares de estações da malha têm

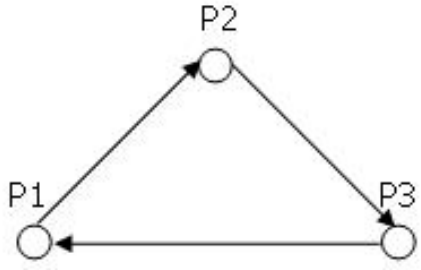

Figura 3.1: Exemplo de uma malha

perfil A, capacidade de suporte de 1000TB e distância de 10Km. Os pares

de estações de P1 para P2 e de P2 para P3 têm capacidade de tração de 500KGF, e o par de estações de P3 para P1 tem capacidade de tração de 300KGF.

No instante atual (20/02/2005 6:00) estão disponíveis no pátio P3 dois vagões do tipo V1, uma locomotiva do modelo L1 e outra do modelo L2.

O vagão do tipo V1 tem tara de 20TB e as locomotivas dos modelos L1 e L2 têm tara de 100TB, e tracionam 300 e 200KGF respectivamente. Cada locomotiva gera uma capacidade de tração de 300TB (caso seja do modelo L1) ou 200TB (caso seja do modelo L2) e consomem 1l/TKB respectivamente em pares de estações com perfil de rampa compensada A.

Uma locomotiva L1 pode ser acoplada a uma L2, no entanto a locomotiva do modelo L2 fica com apenas 90% de sua capacidade de tração. Os dois modelos têm permissão para circular em qualquer trecho da malha.

O trem T1 que sai de P1 às 12:00, chega em P2 às 14:00, sai de P2 às 15:00 e chega em P3 às 17:00. O trem T2 sai de P3 às 7:00 e chega em P1 às 9:00. Os dois trens circulam todos os dias da semana

É dada uma demanda para carregar 2 vagões do tipo V1 com 100TU em P1 e levar até P3 onde será descarregado.

Para facilitar a compreensão do problema, serão apresentados abaixo exemplos de alguns dos principais dados de entrada e saída:

Dados de entrada:

- Pátio:

codigo	capacidade
P1	10
P2	10
P3	10

- Tipo de vagão:

codigo	tara
V1	20

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310414/CA

- Estado inicial dos vagões:

vagao	patio	quantidade	tempoPronto
V1	P3	2	0

- Estado inicial das locomotivas:

locomotiva	patio	quantidade	tempoPronto
L1	P3	1	0
L2	P3	1	0

- Modelo de locomotiva:

codigo	tara	kgf
L1	100	300
L2	100	200

- Par de estações:

origem	destino	perfil	suporte	kgfMaxima	distancia
P1	P2	A	1000	500	10
P2	P3	A	1000	500	10
P3	P1	A	1000	300	10

- Quadro de tração:

locomotiva	perfil	tracao	consumo
L1	A	300	1
L2	A	200	1

- Trem:

codigo	origem	destino	saida	chegada
T1	P1	P2	12:00:00	14:00:00
T1	P2	P3	15:00:00	17:00:00
T2	P3	P1	07:00:00	09:00:00

- Quadro de acoplamento:

locomotiva1	locomotiva2	fator1	fator2
L1	L2	1	0,9

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310414/CA

- Possibilidade de utilização:

trecho	locomotiva
T1	L1
T1	L2
T2	L1
T2	L2

- Fluxo:

codigo	origem	destino	mercadoria	cliente
F1	P1	P3	M1	C1

- Tipo de vagão por fluxo:

fluxo	vagao	capacidadeTU
F1	V1	100

- Demanda:

codigo	fluxo	quantidade	data	tarifa
D1	F1	2	20/2/2005	1

O primeiro passo é calcular quais são as possíveis composições para cada trem. Nesse caso temos que para o trem T1 as possíveis composições são:

- Uma locomotiva L1;
- Uma locomotiva L2;
- Uma locomotiva L1 e uma L2;
- Duas locomotivas L2;

Para o trem T2 as possíveis composições são:

- Uma locomotiva L1;
- Uma locomotiva L2;

A solução ótima para o exemplo é:

- Trem T2 formado por uma locomotiva do modelo L1 anexa os dois vagões vazios em P3 e arrasta junto com uma locomotiva desligada do modelo L2 até o pátio P1.
- Os dois vagões são desanexados e carregados com a demanda D1.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310414/CA

– Trem T1 formado por uma locomotiva L1 e uma L2 anexa os dois vagões carregados e arrasta até o pátio P3.
– Os dois vagões carregados são desanexados em P3 e descarregados.

Podemos ver que nessa solução todas as capacidades de tração são respeitadas:

– Trem T2 tem uma capacidade de tração de 300TB (tração de uma locomotiva L1), e utiliza 2*20 (tara dos vagões) + 100 (tara da locomotiva L2) + 100 (tara da locomotiva L1) = 240TB.
– Trem T1 tem uma capacidade de tração de 300TB (tração de uma locomotiva L1) + 0,9*200TB (tração de uma locomotiva L2) = 480TB, e utiliza 2*20 (tara dos vagões) + 2*100 (tonelada útil carregada nos vagões) + 100 (tara da locomotiva L1) + 100 (tara da locomotiva L1) = 440TB.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310414/CA