

Capítulo 5

Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados computacionais obtidos para as instâncias do *PAVL* tanto para o modelo sem permitir ajuste de horário como para a sua extensão com ajuste na escala de trens.

Para mostrar os resultados do modelo foram gerados 20 cenários a partir de uma instância real contendo:

- 120 pátios
- 38 tipos de vagões
- 14 modelos de locomotivas
- 230 demandas
- 200 trens

Esses são dados reais, já pré-processados, da gestora da maior malha ferroviária nacional (figura 5.1). Essa malha possui mais de 2.000 quilômetros de extensão e percorre os estados de Minas Gerais, Goiás, Rio de Janeiro, Espírito Santo, Bahia, Sergipe e Distrito Federal. A frota de vagões é de mais de 27.800 vagões e 900 locomotivas.

Os horários da grade trens foram ajustados aplicando-se a metodologia de criação de uma grade ideal aqui apresentada na seção 3.3.

Esses cenários foram criados variando-se aleatoriamente cerca de 30% das demandas e dos estados iniciais dos vagões e das locomotivas. Como ocorre na prática, existem sempre situações que não estavam previstas, por exemplo, alguns vagões ou locomotivas serem tirados de circulação para manutenção ou estarem em lugares diferentes do esperado, além de demandas serem canceladas ou aparecerem novas demandas.

Com cada um desses 20 cenários foram feitas duas rodadas, a primeira sem permitir ajuste de horários e a segunda permitindo que os trens do



Figura 5.1: Malha ferroviária considerada

primeiro dia atrasem ou adiantem o seu horário de partida assim como foi descrito na extensão do modelo com ajuste na escala de trens (seção 4.2).

Todas as rodadas foram feitas em um Pentium IV 800 MHz, com 1GB de RAM, usando como resolvidor de MIPs o CPLEX 9.0 [6], com os parâmetros padrões. Depois de uma hora de execução todas as rodadas foram interrompidas.

A tabela 5.1 apresenta os resultados computacionais obtidos para esses cenários sem permitir ajuste na escala de trens. Nela, as colunas **nLins** e **nCols** representam o número de linhas e colunas do MIP; **TT** o tempo total até achar a melhor solução; e **Gap** o gap percentual da melhor solução.

Para todos os cenários rodados foram obtidos bons resultados (o maior gap foi de 0,15%), e em 50% deles a solução ótima foi encontrada em menos de uma hora de execução.

A tabela 5.2 apresenta os resultados obtidos para esses cenários para

#	nCols	nLins	TT(s)	Gap
1	641.716	399.713	3587,38	0,02%
2	651.415	405.264	209,05	0,00%
3	668.780	417.950	3599,42	0,02%
4	689.701	429.675	312,64	0,00%
5	601.554	372.567	3599,22	0,12%
6	696.332	434.599	570,95	0,00%
7	658.570	410.456	402,08	0,00%
8	663.682	414.118	1188,28	0,00%
9	661.127	410.921	3599,31	0,02%
10	700.625	438.453	3541,41	0,15%
11	672.166	420.179	3503,92	0,05%
12	649.386	403.785	3599,39	0,02%
13	672.233	420.506	3598,48	0,13%
14	700.450	440.395	543,78	0,00%
15	721.447	452.694	804,02	0,00%
16	689.864	432.082	3598,89	0,03%
17	650.069	405.362	233,75	0,00%
18	723.559	451.095	703,98	0,00%
19	700.820	438.614	3597,45	0,03%
20	659.071	411.817	245,53	0,00%

Tabela 5.1: Resultados computacionais das instâncias do *PAVL* sem ajuste de horários.

a extensão do modelo apresentada na seção 4.2, permitindo-se variar os horários dos trens do primeiro dia do horizonte de planejamento. As colunas **Desc** e **Vag** representam, respectivamente, o ganho em percentual de descarregamentos e a economia em percentual de utilização de vagões em relação aos resultados sem permitir ajuste de horário. A coluna **Trens** indica o número de trens que tiveram seu horário ajustado na solução obtida.

Os resultados apresentados na tabela 5.2 mostram que apenas em quatro cenários a solução ótima foi encontrada; no entanto, estão todos bem próximos do ótimo, sendo o maior gap obtido de 0,53%.

Mesmo com gaps obtidos maiores do que os resultados da tabela 5.1 podemos observar que permitir o ajuste de horário da partida dos trens do primeiro dia traz ganhos, seja pelo maior atendimento em número de descarregamentos ou pela economia na utilização de vagões disponíveis na malha.

Nas instâncias testadas temos que, em média, 1/3 dos vagões carregados conseguem ser descarregados. Isto é, 1/3 dos vagões que foram carregados foi levado até o local de destino da demanda por trens que tiveram partida dentro do horizonte de planejamento de 4 dias e chegaram até o seu destino até o quinto dia depois do fim do período considerado. Para todos os

#	nCols	nLins	TT(s)	Gap	Desc	Vag	Trens
1	840.736	536.883	3588,14	0,26%	0,00%	0,21%	11
2	859.136	548.561	3599,31	0,15%	0,00%	0,41%	16
3	894.689	573.329	3599,64	0,43%	0,43%	0,23%	9
4	901.967	575.996	3580,31	0,01%	0,72%	0,90%	22
5	783.001	497.387	3532,05	0,27%	0,58%	0,10%	16
6	922.521	590.666	3599,52	0,05%	0,53%	0,17%	21
7	868.172	554.898	2871,53	0,00%	2,67%	0,54%	16
8	879.717	562.831	805,00	0,00%	0,88%	0,28%	12
9	861.943	549.215	3599,42	0,03%	0,00%	0,20%	11
10	940.605	603.740	3564,63	0,06%	1,14%	0,09%	10
11	889.864	570.227	3488,33	0,14%	0,69%	0,09%	30
12	871.095	556.226	1157,55	0,00%	0,00%	0,45%	8
13	888.699	569.639	3598,80	0,39%	1,18%	0,09%	16
14	942.444	607.352	1836,33	0,00%	1,49%	0,24%	12
15	959.351	616.772	3599,45	0,53%	0,00%	0,56%	22
16	913.269	585.688	3598,91	0,07%	1,92%	0,18%	16
17	867.364	554.864	3599,39	0,02%	0,26%	0,37%	15
18	952.563	609.014	3481,44	0,02%	0,52%	0,00%	14
19	937.783	602.100	3561,44	0,10%	0,00%	0,10%	18
20	871.148	557.992	3375,25	0,45%	0,60%	0,00%	15

Tabela 5.2: Resultados computacionais das instâncias do *PAVL* permitindo ajuste na escala de trens.

cenários, consideramos que nenhum vagão estava carregado com alguma demanda no instante inicial.

Nos resultados obtidos vemos que com o ajuste de horários fomos capazes de descarregar até 2,67% a mais de vagões carregados com demandas do que atendíamos sem permitir alterar a escala. Isto é, apenas fazendo pequenas alterações nos horários de poucos trens da grade (em média 15 trens partiram fora do horário previsto) conseguimos um bom ganho no atendimento.

Apesar de não serem viáveis na prática, outros testes foram feitos permitindo ajustes de horários em intervalos maiores, por exemplo, podendo atrasar ou adiantar o horário de partida de um trem em 3 ou 6 horas do seu horário padrão. Os ganhos em número de descarregamentos foram ainda melhores, no entanto o tempo até encontrar uma solução com um gap pequeno o suficiente foi muito além do limite aceitável.

Outra tentativa foi deixar que os trens fossem atrasados ou adiantados com apenas uma possibilidade de horário mas com um intervalo maior, por exemplo de 5 horas a mais ou a menos do que o horário previsto de saída do trem. Mesmo assim o tempo de execução ainda extrapolou um limite de

tempo razoável para a execução.

Mesmo com o igual número de variáveis, o tempo de execução permitindo intervalos grandes de atraso foi muito maior do que o que permitia apenas intervalos pequenos. Isso ocorre pois quando o intervalo é suficientemente pequeno, em poucos casos alterar o horário do trem faz alguma diferença nos resultados, assim, como é preferível que ele saia no horário, o problema simplesmente descarta aquela possibilidade e conseqüentemente diminui a complexidade do problema.

Permitir mais do que duas alternativas de horário para mais ou menos do horário de saída previsto dos trens, mesmo com intervalos pequenos, torna o modelo inviável pelo grande número de variáveis e complexidade elevada.

Outra vantagem da utilização do modelo foi o fato de ele permitir alocar as composições de locomotivas aos trens de acordo com o que será efetivamente necessário para tracionar os vagões alocados a cada trem. Além disso, pode-se observar uma grande movimentação de locomotivas desligadas, sendo arrastadas por trens de um pátio a outro, o que permitiu uma realocação das locomotivas e conseqüentemente um aumento em capacidade de tração em trechos mais utilizados.

Nos experimentos realizados, a melhor alternativa foi resolver utilizando o simplex dual desde o começo.