

Capítulo 4

Solução

4.1 Formulação matemática

O modelo do problema é baseado no modelo de multifluxos com duas malhas distintas representando respectivamente o fluxo de vagões e de locomotivas ao longo do tempo:

Malha representando o fluxo de vagões ao longo do tempo:

Essa malha é subdividida em uma malha para cada tipo de vagão vazio e uma malha para cada demanda e tipo de vagão capaz de atender a esta demanda.

Para cada uma dessas malhas existe um vértice para cada pátio e cada trem em pátio em cada instante de tempo relevante. Para a malha de fluxo de vagões um instante de tempo é dito relevante quando um dos seguintes eventos acontece: chegada ou partida de uma viagem de trem ou possível começo ou fim de uma operação de carregamento, descarregamento, anexação ou desanexação. Os arcos onde circulam vagões representam as variáveis em número de vagões. Esses arcos podem ser de vagões carregando, descarregando, anexando, desanexando, em movimento, parados, ou ainda sendo utilizados do estado inicial.

Na figura 4.1 é apresentada a malha de fluxo de vagões do tipo V1 para o exemplo da seção anterior.

Malha representando o fluxo de locomotivas ao longo do

tempo: Essa malha é subdividida em uma malha para cada modelo de locomotiva. Para cada uma dessas malhas existe um vértice para cada pátio em cada instante de tempo relevante. Para a malha de fluxo de locomotivas um instante de tempo é dito relevante quando acontece uma chegada ou partida de uma viagem de trem. Os arcos

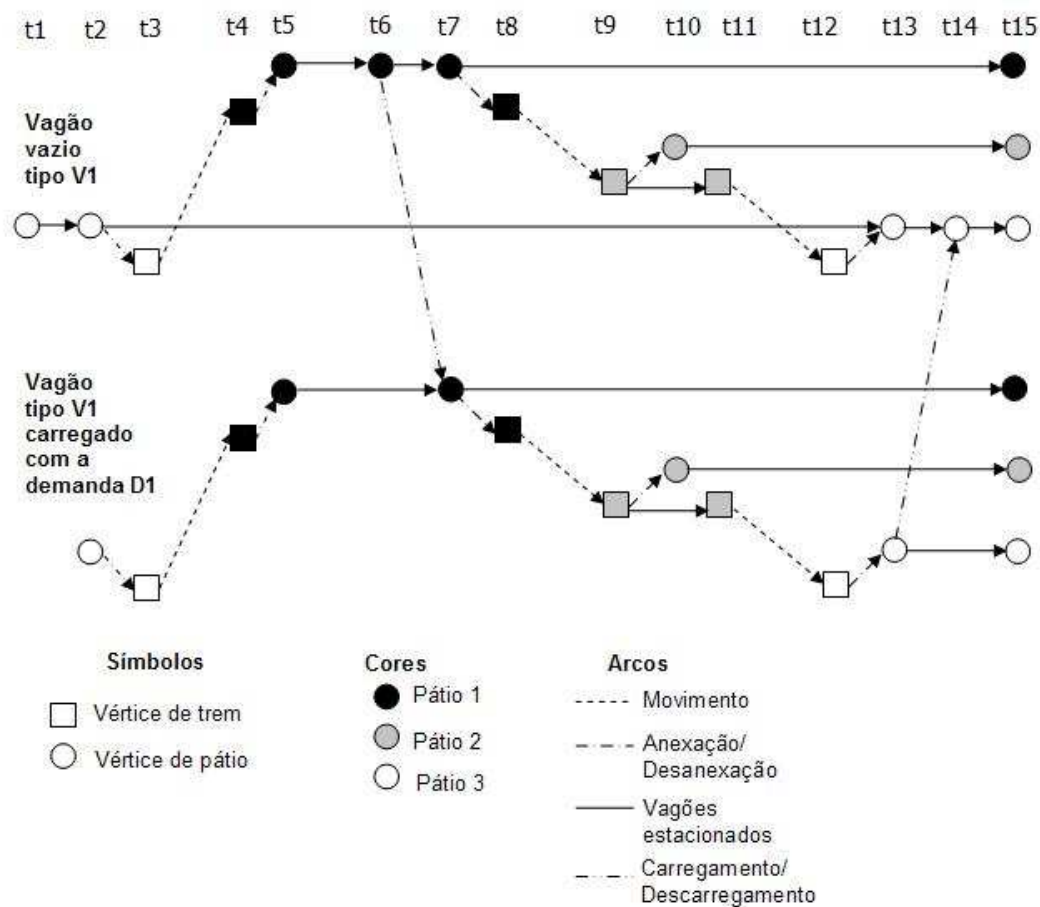


Figura 4.1: Malha do fluxo de vagões do tipo V1

onde circulam locomotivas representam as variáveis em número de locomotivas. Esses arcos podem ser de locomotivas paradas, ativas ou desligadas indo de um pátio para outro, ou ainda sendo utilizadas do estado inicial.

Na figura 4.2 é apresentada a malha de fluxo de locomotivas do modelo L1 para o exemplo acima.

Para cada locomotiva em trem, existe um arco de locomotiva ativa e outro de locomotiva desligada que vão do vértice correspondente ao pátio e horário de partida do trem ao vértice correspondente ao pátio e horário final do trem em cada par de estações.

Podemos observar que para a malha de locomotivas não existem arcos de anexação e desanexação. O tempo gasto para anexar ou desanexar uma locomotiva já está incorporado ao tempo de percurso do trem no trecho.

A malha de locomotivas se relaciona com a malha de vagões pelo fato

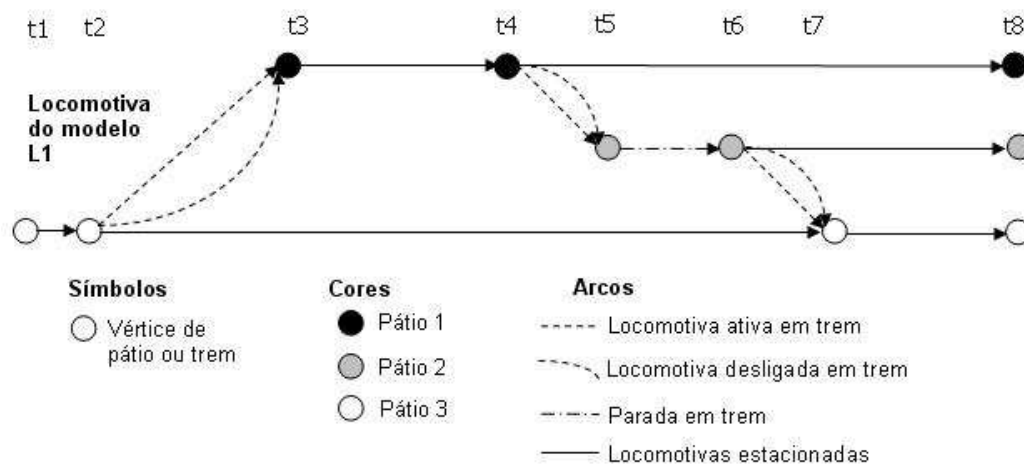


Figura 4.2: Malha do fluxo de locomotivas do modelo L1

de que o fluxo que passa pelos arcos de locomotivas ativas determina a capacidade dos arcos de vagões em movimento no trem. Na prática isso significa que um vagão só poderá ser transportado em um trem caso existam locomotivas ativas no trem com capacidade de tração suficiente para arrastá-lo.

Nas seções seguintes faremos a descrição da notação utilizada e da formulação do modelo proposto nessa dissertação.

4.1.1 Índices:

- i : vértice de tempo e pátio de origem do arco;
- j : vértice de tempo e pátio de destino do arco;
- k : tipo de vagão;
- p : pátio;
- t : trem, $t = 0$ significa que o vagão não está em nenhum trem;
- d : demanda, $d = 0$ significa que o vagão está vazio;
- l : locomotiva;
- c : composição de locomotivas;
- v_{in} : vértice de tempo e pátio de destino de arcos;
- v_{out} : vértice de tempo e pátio de origem de arcos;

4.1.2 Conjuntos:

- Y : conjunto de todos os pátios;
- S : conjunto de todas as viagens de trens;
- D : conjunto de todas as demandas;
- Q_d : conjunto de todos os tempos de origem da demanda d ;
- K : conjunto de todos os tipos de vagões;
- T : conjunto de todos os trens;
- L : conjunto de todos os modelos de locomotivas;
- V : conjunto de todos os vértices na malha de vagões;
- VP : conjunto de todos os vértices de pátio na malha de vagões;
- VT : conjunto de todos os vértices de trem na malha de vagões;
- VL : conjunto de todos os vértices na malha de locomotivas;

4.1.3 Parâmetros:

- α : percentual da receita das demandas para favorecer carregamentos;
- β : percentual da receita das demandas para favorecer descarregamentos;
- τ : custo para desanexar um vagão de um trem;
- λ : custo para anexar um vagão a um trem;
- ϵ : custo de utilizar um vagão;
- φ : custo de utilizar uma locomotiva;
- η : custo de movimentar um vagão em um trem;

4.1.4 Dados:

- R_d : receita da demanda d ;
- $CapPatio_i$: capacidade do pátio i em número de vagões;
- $CapVag_{ij}^t$: capacidade em número de vagões do trem t indo do vértice i para o vértice j ;
- $CapVagCar_{ij}^t$: capacidade em número de vagões carregados do trem t indo do vértice i para o vértice j ;
- $CapVagao_k^d$: capacidade do vagão k carregando a demanda d em TU;
- $Tara_k$: tara do vagão k em Toneladas;
- $CapC_q^d$: TU da demanda d solicitada no dia q ;
- $EstIni_{i,j}^{k,d}$: número de vagões do tipo k no estado inicial carregados ou não com a demanda d , indo do vértice i para o vértice j ;
- $CapCompTB_{i,j}^c$: capacidade da composição c indo do vértice i para o j ;
- $EstIni_{i,j}^l$: estado inicial da locomotiva do tipo l indo do vértice i para o j ;
- $NumLoco_l^c$: número de locomotivas do tipo l na composição c ;
- $CustoDiesel_{i,j}^l$: custo da locomotiva l indo do vértice i para o j ;
- $TaraLoc_l$: tara da locomotiva do tipo l .

4.1.5 Variáveis do problema:

As seguintes famílias variáveis do problema estão expressas em número de vagões:

- $T_{i,j}^{t,k,d}$: vagões do tipo k no trem t carregados ou não com a demanda d , indo do vértice i para o vértice j ou parados;
- $C_{i,j}^{t,k,d}$: vagões do tipo k sendo anexados ao trem t carregados ou não com a demanda d , indo do vértice i para o vértice j ;
- $D_{i,j}^{t,k,d}$: vagões do tipo k sendo desanexados do trem t carregados ou não com a demanda d , indo do vértice i para o vértice j ;
- $L_{i,j}^{k,d}$: vagões do tipo k carregando a demanda d , indo do vértice i para o vértice j ;
- $U_{i,j}^{k,d}$: vagões do tipo k descarregando a demanda d , indo do vértice i para o vértice j ;

- $I_{i,j}^{k,d}$: vagões do tipo k no estado inicial carregados ou não com a demanda d , indo do vértice i para o vértice j ;
- $S_{i,j}^{k,d}$: vagões do tipo k parados e carregados com a demanda d , indo do vértice i para o vértice j ;

As seguintes famílias de variáveis do problema estão expressas em número de locomotivas:

- $LA_{i,j}^{l,t}$: locomotivas do tipo l ativas no trem t indo do vértice i para o vértice j (locomotivas ativas geram capacidade de tração);
- $LD_{i,j}^{l,t}$: locomotivas do tipo l desligadas no trem t indo do vértice i para o vértice j (locomotivas desligadas vão arrastadas no trem assim como um vagão, consumindo capacidade de tração);
- $LP_{i,j}^l$: locomotivas do tipo l paradas indo do vértice i para o vértice j ;
- $IL_{i,j}^l$: locomotivas do tipo l no estado inicial indo do vértice i para o vértice j .

As seguintes variáveis do problema são binárias:

- TT_c^t : indica que a composição utilizada no trem t é a composição c de locomotivas.

4.1.6 Formulação

Função Objetivo:

$$\begin{aligned} \text{Max} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{d \in D} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} & (\alpha \cdot R_d \cdot L_{i,j}^{k,d} + \beta \cdot R_d \cdot U_{i,j}^{k,d} - \tau \cdot D_{i,j}^{t,k,d} - \lambda \cdot C_{i,j}^{t,k,d} \\ & - \eta \cdot T_{i,j}^{t,k,d} - \epsilon \cdot I_{i,j}^{k,d} - \text{CustoDiesel}_{i,j}^l \cdot LA_{i,j}^{l,t} - \varphi \cdot IL_{i,j}^l) \end{aligned}$$

s.a.

Restrições da malha de vagões:

Conservação de fluxo de vagões nos vértices:

$$\begin{aligned} & \sum_{v_{in} \in V} (T_{v_{in},i}^{t,k,d} + L_{v_{in},i}^{k,d} + U_{v_{in},i}^{k,d} + C_{v_{in},i}^{t,k,d} + D_{v_{in},i}^{t,k,d} + I_{v_{in},i}^{k,d} + S_{v_{in},i}^{t,k,d}) - \\ & \sum_{v_{out} \in V} (T_{i,v_{out}}^{t,k,d} + L_{i,v_{out}}^{k,d} + U_{i,v_{out}}^{k,d} + C_{i,v_{out}}^{t,k,d} + D_{i,v_{out}}^{t,k,d} + S_{i,v_{out}}^{t,k,d}) \\ & = 0; \forall i \in V, d \in D, k \in K, t \in T \end{aligned} \quad (4-1)$$

Capacidade de pátios em número de vagões:

$$\sum_{d \in D} \sum_{k \in K} \sum_{v_{in} \in V} \sum_{t \in T} S_{v_{in},i}^{t,k,d} \leq CapPatio_i; \forall i \in VP \quad (4-2)$$

Capacidade de trechos em número de vagões:

$$\sum_{d \in D} \sum_{k \in K} T_{i,j}^{t,k,d} \leq CapVag_{ij}^t; \forall ij \in VT, \forall t \in T \quad (4-3)$$

Capacidade de trechos em número de vagões carregados:

$$\sum_{d \in D \setminus 0} \sum_{k \in K} T_{i,j}^{t,k,d} \leq CapVagCar_{ij}^t; \forall ij \in VT, \forall t \in T \quad (4-4)$$

Carregamentos de demandas:

$$\sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in \Theta_q^d} L_{i,j}^{k,d} \leq CapC_q^d; \forall q \in Q_d, \forall d \in D \quad (4-5)$$

Limita o número de vagões utilizados:

$$I_{i,j}^{k,d} \leq EstIni_{i,j}^{k,d}; \forall ij \in V, \forall d \in D, \forall k \in K \quad (4-6)$$

Restrições da malha de locomotivas:

Conservação de fluxo de locomotivas nos vértices:

$$\begin{aligned} & \sum_{v_{in} \in V} \left(\sum_{t \in T} (LA_{v_{in},i}^{l,t} + LD_{v_{in},i}^{l,t}) + LP_{v_{in},i}^l + IL_{i,j}^l \right) - \\ & \sum_{v_{out} \in V} \left(\sum_{t \in T} (LA_{i,v_{out}}^{l,t} + LD_{i,v_{out}}^{l,t}) + LP_{i,v_{out}}^l \right) = 0; \forall i \in VL, \forall l \in L \end{aligned} \quad (4-7)$$

Assegura que apenas uma composição é utilizada em cada trem:

$$\sum_c TT_c^t \leq 1; \forall t \in T \quad (4-8)$$

Assegura que o fluxo de locomotivas seja correspondente a composição utilizada no trem:

$$\sum_c NumLoco_l^c \cdot TT_c^t - LA_{i,j}^{l,t} = 0; \forall ij \in VL, \forall t \in T \quad (4-9)$$

Limita o número de locomotivas utilizadas:

$$IL_{i,j}^l \leq EstIni_{i,j}^l; \forall ij \in VL, \forall l \in L \quad (4-10)$$

Restrição que liga a malha de vagões a malha de locomotivas:

Capacidade de trechos em TB:

$$\begin{aligned} & \sum_{d \in D} \sum_{k \in K} (CapVagao_k^d + Tara_k) \cdot T_{i,j}^{t,k,d} + \sum_l TaraLoc_l \cdot (LA_{i,j}^{l,t} + LD_{i,j}^{l,t}) - \\ & - \sum_c CapCompTB_{i,j}^c \cdot TT_c^t \leq 0; \forall ij \in VT, \forall t \in T \end{aligned} \quad (4-11)$$

A variável TT_c^t é binária, todas as demais são positivas e inteiras

4.1.7 Variantes do modelo:

Um modelo parecido para fluxo de vagões carregados e vazios foi utilizado por Fukasawa et al. [14]; nele os trens já estão predefinidos e a capacidade de tração de cada um é passada como dado de entrada. Nesse modelo não existe o conceito de locomotiva e de composição.

Além disso, em Holmberg et al. [15] é apresentado um modelo para achar um fluxo ótimo de vagões vazios utilizando a capacidade restante dos trens após ter sido definido um fluxo de vagões carregados. Neste caso, existe apenas uma subrede de espaço-tempo e nenhum arco de carregamento/descarregamento.

O artigo Cordeau et al. [11] também descreve o uso do modelo de multi-fluxos inteiro para modelar problemas de fluxo de vagões e locomotivas em trens de passageiros. Neste tipo de problema, os vagões que serão utiliza-

dos “carregados” (com passageiros) e as locomotivas já possuem uma rota e itinerário fixos e os vagões de cada tipo (primeira classe, segunda classe, restaurante, etc) devem ser movidos de maneira a serem montados nos trens pré-definidos. Os grafos resultantes não são tão grandes quanto no caso do modelo aqui apresentado, mas todos os autores indicam bons resultados devido à boa qualidade da relaxação linear e dos limites fornecidos por ela. Para o caso do fluxo de locomotivas, encontramos em [2] um modelo que define um fluxo de locomotivas que faz a alocação de tração necessária.

Conforme pode ser visto pelos artigos mencionados, o *Problema de Fluxo de Vagões* e o *Problema de Fluxo de Locomotivas* para o transporte de cargas é um problema comum em diversas ferrovias do mundo mas, até onde sabemos, estes problemas sempre foram resolvidos separadamente. Esta é, portanto, a primeira vez que se resolve o *Problema de Fluxo de Vagões e Locomotivas* simultaneamente para o transporte de cargas.

Para finalizar, ressaltamos que o resultado obtido é um fluxo viável de vagões e locomotivas. Para saber a rota particular de cada vagão ou locomotiva na malha, foi aplicado o algoritmo de decomposição de fluxos apresentado em Fukasawa et al. [14]. Para um estudo mais detalhado sobre a teoria de decomposição de fluxos, recomenda-se a leitura de Ford & Fulkerson [13].

4.2 Extensão do modelo com ajuste na escala de trens

O modelo proposto acima parte do princípio que o itinerário dos possíveis trens já está predefinido. Os trens ou saem no horário previsto ou simplesmente não saem. Faremos aqui uma extensão desse modelo para que ele considere possíveis ajustes nos horários previstos dos trens do primeiro dia do horizonte de planejamento. Essa escala de trens se faz necessária visto que a situação atual nem sempre é a prevista. A todo instante surgem novas demandas, outras são canceladas, locomotivas e vagões entram em manutenção, entre outros fatores que alteram o estado da malha. Para tentar compensar essas perturbações inevitáveis, na escala de trens, os horários da grade são ajustados, possibilitando um melhor aproveitamento dos recursos disponíveis.

Dado o horário de saída de um trem, ele terá a possibilidade de sair algumas horas antes ou depois do previsto. Por exemplo, um trem que estava previsto para sair às 8:00 da manhã poderá sair às 6:00, 7:00, 8:00, 9:00,

ou 10:00 da manhã do mesmo dia. Caso o trem seja atrasado duas horas, por exemplo, todos os horários de chegada e partida desse trem em cada pátio da sua rota também serão atrasados em duas horas, assim os tempos de parada em cada pátio permanecem sempre os mesmos.

Ter a possibilidade de atrasar ou adiantar um trem pode melhorar o atendimento e conseqüentemente aumentar o lucro obtido. A seguir temos um exemplo onde isso acontece:

Suponhamos que existem 2 vagões carregados no pátio P1 que precisam ser levados até o pátio de destino da demanda em P3. Os trens possíveis são: um trem T1 partindo de P1 às 8:00 e chegando em P2 às 11:00 e um trem T2 partindo de P2 às 10:00 e chegando em P3 às 12:00. Caso os trens sejam obrigados a cumprir seu horário essa demanda não poderá ser atendida, já que o trem T1 chegará no pátio P2 quando T2 já tiver partido. Já com a extensão do modelo podemos adiantar o primeiro trem ou atrasar o segundo o tempo necessário para que os vagões que estavam no trem T1 sejam desanexados no pátio P2 e anexados ao trem T2 para serem levados até o pátio de destino da demanda.

A formulação da extensão ao modelo pode ser obtida adicionando-se, para cada arco de trem, novos arcos com os possíveis horários de partida. Para isso, o índice t que representa o trem associado a variável terá um sub-índice h indicando qual das possibilidades de horário (conjunto H) a variável se refere.

Nessa dissertação consideraremos 5 possibilidades de horário para cada trem do primeiro dia do horizonte de planejamento, tendo uma granularidade de hora. No entanto esses parâmetros podem ser facilmente ajustados para outros valores.

Reescrevendo a restrição 4-8 que garante que no máximo uma composição é utilizada em cada trem da seguinte forma:

$$\sum_{h \in H} \sum_c T T_c^{t,h} \leq 1; \forall t \in T \quad (4-12)$$

asseguramos também que a composição é utilizada em apenas um dos possíveis horários de partida do trem .

Por sua vez, estendendo a restrição de capacidade do trecho em TB para qualquer índice de horário h , garantimos que uma vez escolhido o horário de

partida do trem, apenas as variáveis com os índices correspondentes poderão assumir valores diferentes de zero.

$$\begin{aligned} & \sum_{d \in D} \sum_{k \in K} (CapVagao_k^d + Tara_k) \cdot T_{i,j}^{t,h,k,d} + \sum_l (TaraLoc_l \cdot LD_{i,j}^{l,t,h}) - \\ & - \sum_c CapCompTB_{i,j}^c \cdot TT_c^{t,h} \leq 0; \forall i,j \in VT, \forall t \in T, \forall h \in H \end{aligned} \quad (4-13)$$

O horário previsto para a saída do trem só deve ser alterado caso haja realmente necessidade; assim, para dar prioridade a que o trem saia no horário, a cada hora de atraso ou adiantamento do trem é atribuído um custo δ na função objetivo.

Dado que:

$h = 0 \rightarrow$ significa que o trem está no horário previsto,

$h < 0 \rightarrow (-1 \text{ ou } -2)$ significa que o trem está adiantado e

$h > 0 \rightarrow (1 \text{ ou } 2)$ significa que o trem está atrasado,

o seguinte termo deve ser acrescentado na função objetivo do modelo:

$$\sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \sum_{h \in H} (-|h| \cdot \delta \cdot TT_c^{t,h}) \quad (4-14)$$

Com essa extensão o problema deve aumentar bastante de tamanho já que o número de trens do primeiro dia do horizonte de planejamento será multiplicado por 5.

Para melhorar o desempenho do sistema foi adotada uma estratégia de branching. Para isso a restrição 4-12, que garante que no máximo uma composição é utilizada em cada trem, foi subdividida em duas restrições e uma nova variável binária foi criada:

$TT_{t,h}$: indica se o trem t sai no horário h .

Restrição que assegura que um trem sai em no máximo um de seus possíveis horários:

$$\sum_{h \in H} TT_{t,h} \leq 1; \forall t \in T \quad (4-15)$$

Restrições que garantem que uma composição é utilizada no trem que sai no horário escolhido:

$$\sum_c TT_c^{t,h} = TT_{t,h}; \forall t \in T, \forall h \in H \quad (4-16)$$

Essa nova formulação se mostra mais eficiente quando é dada prioridade de branch sobre a nova variável $TT_{t,h}$.

4.3 Extensão do modelo com ajuste na grade de trens

Esse modelo ainda pode ser utilizado na criação de uma grade de trens ideal. Esse é um problema de planejamento e requer uma metodologia complexa, onde deve haver uma interação entre o planejador e o sistema.

A alteração no modelo, no entanto, é bem simples, bastando considerar que os trens podem variar seu horário em todos os dias do horizonte de planejamento. Da mesma forma como foi demonstrado para a escala de trens, ter a possibilidade de atrasar ou adiantar qualquer trem da grade aumenta a possibilidade de um melhor atendimento e conseqüentemente de um maior lucro.

Nessa extensão do modelo, a problema praticamente quadruplica de tamanho, e fica impossível de ser resolvido em um tempo razoável, além de em muitas instâncias não ser possível nem alocar a memória necessária para armazenar todas as variáveis e restrições em um resolvedor de MIP mesmo depois de um pré-processamento.

Para resolver esse problema apresentamos uma metodologia onde o sistema é utilizado pelo planejador de grade apenas como um instrumento que auxilia nessa geração. Nessa metodologia o planejador deve rodar o sistema algumas vezes:

- Partindo da grade atual, ou mesmo de uma grade onde os horários foram escolhidos aleatoriamente, uma primeira rodada do sistema é

- feita possibilitando variar apenas alguns horários de trens;
- com a grade resultante deve-se rodar novamente variando novos horários;
- esse procedimento deve ser repetido até que nenhuma melhora significativa no atendimento seja obtida com a variação de horários.

É importante notar que esse processo não necessariamente precisa ser feito por um planejador de grade; no entanto o ponto ótimo será encontrado em menos tempo se os possíveis horários dos trens forem escolhidos por alguém que possua uma sensibilidade maior na tarefa.

4.4 Pré-processamento

De acordo com o modelo apresentado acima, temos que a malha de vagões é subdividida em $|K| + \sum_d |k(d)|$ subredes, onde $k(d)$ é o conjunto de vagões capazes de atender a demanda $d \in D$ (este número é normalmente em torno de 1000). Dado que $|TV|$ é o conjunto de tempos relevantes na malha de vagões, cada uma delas é composta por até $|Y| \cdot |TV| + |S|$ vértices e um número de arcos da mesma ordem de grandeza. Para o caso da malha de locomotivas temos $|L|$ subredes compostas por até $|Y| \cdot |TL| + |S|$, sendo $|TL|$ o conjunto de tempos relevantes da malha de locomotivas.

Nas instâncias testadas temos os seguintes tamanhos de conjuntos:

$|K| = 38$, $|L| = 14$, $|Y| = 120$, $|D| = 230$, $|T| = 200$, $|S| = 1500$ e $|TV| = 1300$ e $|TL| = 550$.

Assim como foi representado nas figuras 4.1 e 4.2, a construção das malhas já foi feita de forma que um vértice de pátio no tempo só existe caso haja a possibilidade de ocorrer algum evento nesse pátio no instante de tempo correspondente. Dessa forma, existe uma lista de tempos relevantes específica para cada pátio em cada uma das subredes, tanto na malha de vagões como na de locomotivas.

Apesar disso, a formulação completa do problema ainda é muito grande (em número de variáveis e restrições) para ser resolvido em tempo razoável. Para contornar este problema, foram desenvolvidos esquemas de pré-processamento de maneira a reduzir o tamanho da formulação.

O primeiro procedimento adotado nessa formulação foi o *Pre-Path* apresentado em Fukasawa et al. [14], onde são eliminados arcos das subredes

das demandas da malha de vagões. A idéia é que um arco (i, j) , assim como um vértice, certamente não será utilizado por vagões carregados com a demanda d se não houver nenhum caminho naquela subrede de um vértice correspondente a uma origem de d até i , ou de j até um vértice correspondente a um destino de d .

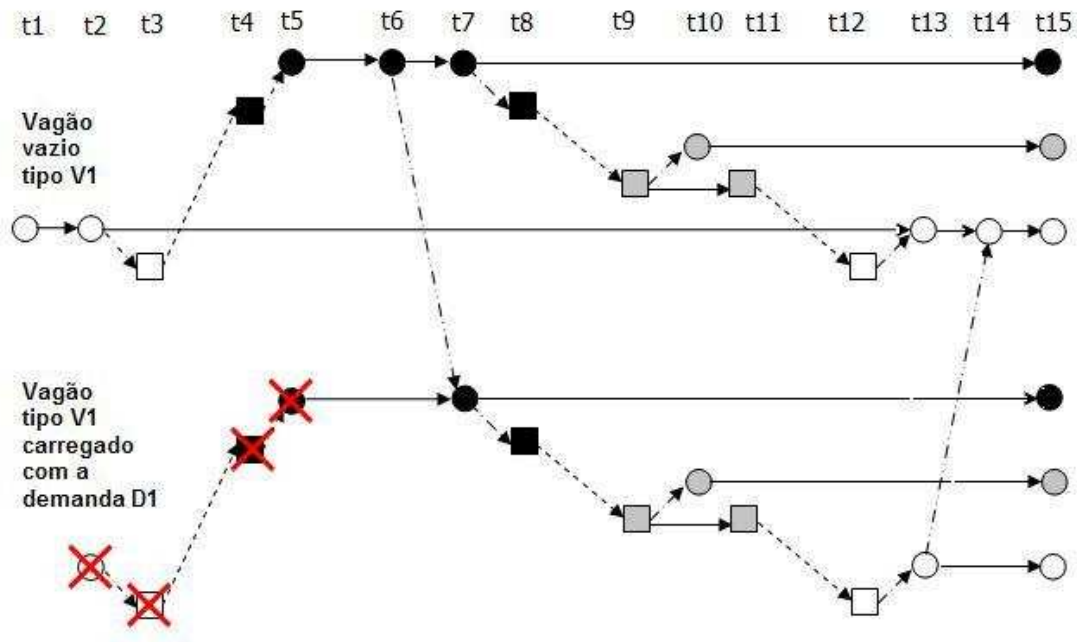


Figura 4.3: Exemplo da aplicação do procedimento *Pre-Path* à figura 4.1, apenas mostrando a eliminação de vértices.

Com o intuito de encontrar um caminho viável da origem de d até i , ou de j até o destino de d , foi implementado o algoritmo de caminho mais curto entre toda origem de d e todo vértice da malha e entre todo vértice da malha e todo destino de d , onde d é qualquer demanda. Assim, para os casos em que o caminho mais curto encontrado for infinito sabemos que não existe caminho viável, e conseqüentemente podemos remover o vértice correspondente e todos os arcos incidentes e dissidentes dele sem afetar a otimalidade da solução.

O algoritmo de caminho mais curto aqui implementado foi o *Dijkstra*, e devemos ressaltar que a unidade de comprimento do caminho aqui é o tempo.

Esta idéia permite a remoção de diversos vértices e arcos. Na figura 4.3 pode-se ver um exemplo simples desta redução. Nesse exemplo, o trem T2 pode ser removido da malha de vagões carregados com a demanda D1 visto

que não existe caminho viável da origem da demanda D1 até nenhum desses vértices eliminados.

Outro algoritmo também utilizado para a eliminação de vértices consolida dois pares de estações quando o tempo de parada do trem entre eles for menor do que o tempo de anexação e desanexação do trem; nesse caso, não há nenhuma outra operação possível a ser feita nesse intervalo de tempo.

A figura 4.4 mostra como a malha de vagões da figura 4.1 ficaria após esse pré-processamento caso o tempo em que o trem T1 fica parado no pátio P2 (diferença entre os tempos t_9 e t_{10}) fosse menor do que o tempo de desanexar um vagão.

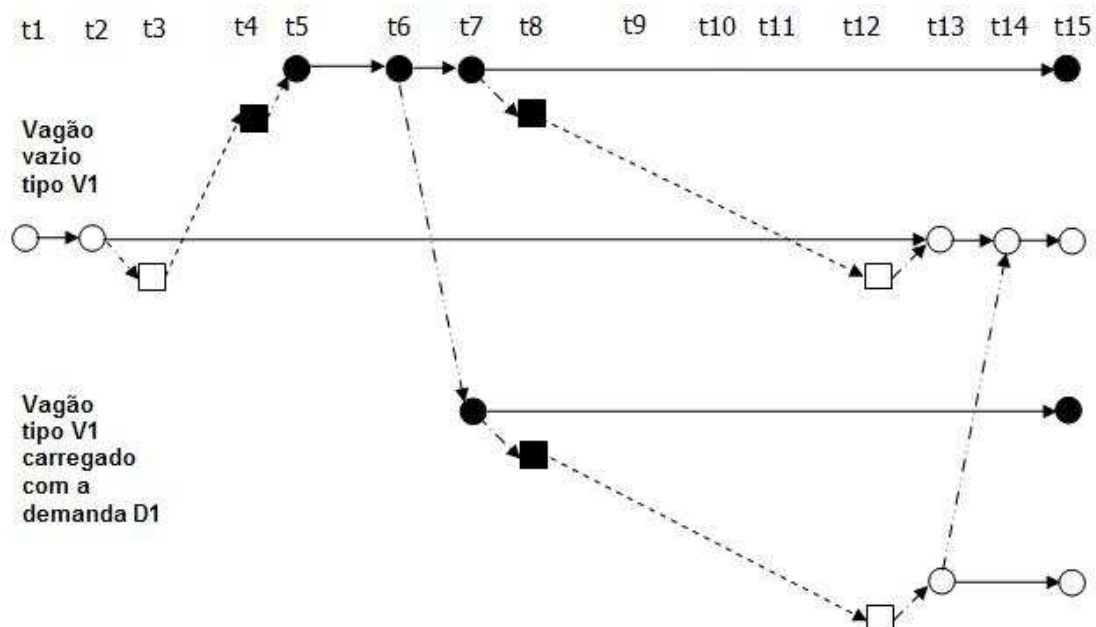


Figura 4.4: Exemplo da aplicação à figura 4.3 do pré-processamento que consolida dois pares de estações quando o tempo de parada do trem entre eles for pequeno.

Na malha de locomotivas o pré-processamento adotado diminui o número de arcos da malha. Nele os arcos de locomotivas ativas em trem são consolidados em um único por modelo de locomotiva por trem. Isto é possível sem perda de otimalidade visto que uma locomotiva ativa não pode se anexar ou desanexar de um trem em pátios intermediários. A figura mostra um exemplo dessa aplicação.

Ainda há outros procedimentos de pré-processamento que podem ser aplicados caso seja necessário ou caso se deseje utilizar menos memória ou

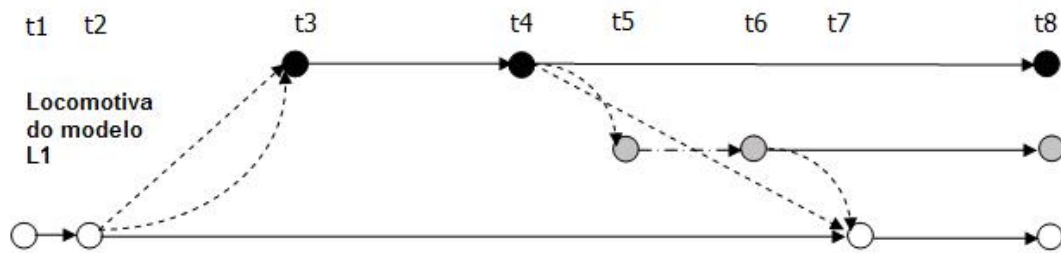


Figura 4.5: Exemplo da aplicação à figura 4.2 do pré-processamento que consolida os arcos de locomotiva ativa por trem.

ter mais rapidez na resolução. Estes procedimentos podem comprometer a otimalidade da solução e, portanto, são procedimentos heurísticos para encontrar uma boa solução inteira.

O primeiro destes procedimentos é baseado na idéia que as viagens de trens que estão muito distantes do ponto de origem ou destino da demanda podem ser desconsideradas. Para isso, todo arco que tiver sua origem distante da origem da demanda mais de, por exemplo, 4 vezes o caminho mais curto da origem da demanda até o seu destino pode ser eliminado do conjunto de arcos onde vagões carregados com essa demanda podem passar. Da mesma forma, todo arco que tiver seu destino distante do destino da demanda mais de 4 vezes o caminho mais curto da origem da demanda até o seu destino também pode ser eliminado.

Outra possível regra seria a de não considerar, para os vagões carregados, as viagens de trens quando:

- O menor caminho da origem da demanda até a origem do par de estações passar pelo pátio de destino da demanda ou pelo destino do par de estações.
- O menor caminho do destino do par de estações até o destino da demanda passar pelo pátio de origem da demanda ou pela origem do par de estações.

Um último recurso que pode ser utilizado é tentar reduzir o tamanho do conjunto T , restringindo os instantes de tempo a serem múltiplos de uma unidade maior de tempo, por exemplo, 30 minutos.

Alguns pré-processamentos dos dados de entrada também podem diminuir o tamanho do problema:

- Os vagões que não aparecem no estado inicial ou que não são capazes de atender a nenhum fluxo podem ser eliminados do modelo.
- As locomotivas que não aparecem no estado inicial ou que não podem passar em nenhum dos trechos podem ser eliminadas do modelo.