

2

Apresentação do Problema

O pensamento só começa com a dúvida.

ROGER MARTIN DU GARD

Este capítulo apresenta a descrição por extenso e o enunciado formal do problema de programação de operações das locomotivas de manobra de um pátio ferroviário ou, simplesmente, PPOLM como será chamado neste trabalho. A descrição por extenso do problema é precedida de uma breve apresentação dos principais conceitos e da terminologia técnica específica de operações de pátios ferroviários. A formulação matemática do problema é apresentada após a definição dos elementos e conceitos necessários.

2.1. Conceitos e terminologia

Os elementos mais importantes de uma ferrovia são os *vagões*, nos quais a carga ou os passageiros são transportados; as *locomotivas*, que dão o poder de locomoção aos vagões; os *trilhos*, que se agrupam para formar as *linhas* sobre as quais as locomotivas e os vagões circulam; a *tripulação*, que opera o sistema ferroviário e as *cargas* ou *passageiros*, que são transportados.

No sistema ferroviário, um conjunto de vagões com mesmas características físicas ou operacionais é chamado de *bloco*. Um conjunto de blocos é puxado ou empurrado por uma ou mais locomotivas e forma assim um conjunto maior de blocos e locomotivas que é chamado de *trem*. Quando se fala sobre ordens de serviço no contexto de pedidos de manobras a serem executadas em um pátio ferroviário, um *bloco* é um conjunto de vagões que pode conter vagões com origens ou tipos diferentes e que são agrupados de diversas formas visando

atender requisitos temporários específicos da operação do pátio. Visando estabelecer claramente esta diferenciação entre blocos que trafegam na ferrovia e os blocos que trafegam dentro dos pátios, este documento chama os blocos de pátio de *conjunto de vagões*, ao invés de blocos.

Os trens se locomovem sobre trilhos que formam *linhas* que conectam estações, pátios e terminais formando assim uma rede ferroviária. Terminais ferroviários e outras localidades onde os trens são formados ou desmembrados são chamados pátios ferroviários ou simplesmente pátios. Analisado sob o aspecto físico, um *pátio ferroviário* (veja Figura 1) é um local onde a estrada de ferro se expande em uma vasta área composta de linhas paralelas conectadas por *aparelhos de mudança de via* (AMVs) e outros dispositivos ferroviários que permitem a passagem de uma linha para outra.



Figura 1: Área de um pátio ferroviário em operação

Funcionalmente, os pátios são os nós da rede ferroviária onde os trens que chegam são desmembrados e trens que saem são formados, vagões são carregados, descarregados e transferidos de um trem para outro e onde ocorrem algumas funções complementares tais como inspeção, estacionamento e classificação de vagões, troca de tripulação, abastecimento de locomotivas e

manutenção e limpeza de vagões e locomotivas. Os pátios são divididos em áreas formadas por conjuntos de linhas destinadas a atender cada uma destas funções operacionais.

Locomotivas podem atuar em viagens, provendo tração para os trens que transportam blocos entre pátios da ferrovia ou podem operar movimentando conjunto de vagões dentro dos limites de um pátio. Neste último caso as locomotivas são chamadas *locomotivas de manobras*.

Este trabalho trata da programação de operações das locomotivas de manobra na rotina diária de um pátio ferroviário. Esta programação é feita em ciclos regulares de curta duração (i.e. algumas horas) denominados *horizontes de planejamento*.

Uma *manobra* é um transporte de um conjunto de vagões de uma linha de origem para uma linha de destino dentro de um pátio. No contexto deste trabalho, o conjunto formado por uma locomotiva de manobra mais os vagões acoplados a ela será denominado de *comboio*. Uma *ordem de serviço* é um pedido de execução de uma manobra.

A execução de uma manobra corresponde à seguinte seqüência de operações que envolvem um conjunto de vagões, uma equipe de planejamento e operação e uma locomotiva de manobra:

- A *viagem escoteira*, que é o deslocamento da locomotiva sem nenhum vagão acoplado, de sua posição inicial até o local de coleta dos vagões;
- O *acoplamento*, que é a operação de conectar vagões à locomotiva de manobra;
- O *transporte*, que é a operação de movimentação realizada pela locomotiva de manobra ao transportar um conjunto de vagões de uma linha de origem até uma linha de destino;
- O *serviço* é uma fase opcional que eventualmente sucede o transporte e ocorre quando a operação a ser executada com os vagões no local de entrega requer a assistência da locomotiva de manobras;

- O *desacoplamento* que é a última fase de uma manobra e consiste na separação dos vagões da locomotiva de manobra, tornando-a disponível, a partir deste momento, para realizar outra manobra.

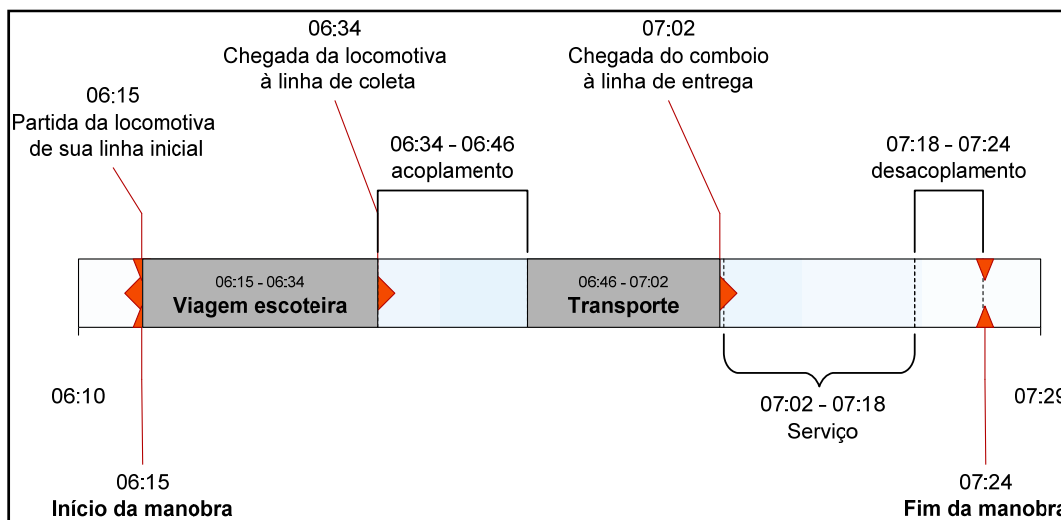


Figura 2: Etapas da realização de uma manobra

A Figura 2 mostra uma escala horizontal representando um intervalo de tempo que vai das 06h10min até as 07h24min de um dia qualquer, onde estão indicadas as etapas e os principais eventos ocorridos no decorrer de uma manobra fictícia realizada durante este intervalo de tempo.

Em um dado instante dentro de um horizonte de planejamento, uma locomotiva pode estar em uma, e somente uma, das seguintes situações:

1. Em *modo de transporte*, i.e., movendo um conjunto de vagões de sua linha de coleta até a sua linha de entrega;
2. Em *modo escoteira*, ou seja, movendo-se sozinha, sem nenhum vagão acoplado a ela. Isto ocorre, geralmente, quando a locomotiva de manobra se desloca de sua posição inicial até a linha onde estão os vagões a serem coletados na próxima manobra a ser realizada;
3. Em *modo de espera*, ou seja, ociosa e com seu motor ligado, estacionada em uma das seguintes linhas:
 - Na linha de coleta e pronta para iniciar o acoplamento, mas esperando a hora permitida para a coleta dos vagões. Isto ocorre, por exemplo, quando uma locomotiva deve coletar um conjunto de vagões na área de descarregamento e quando

ela chega à linha de coleta, a operação de descarregamento ainda não foi concluída, sendo necessário, portanto, aguardar o término do descarregamento;

- Em uma determinada linha de seu caminho (incluindo a linha de origem), aguardando que a linha seguinte seja liberada por outra locomotiva ou comboio que esteja trafegando por ela;
 - Em sua última linha de entrega porque, de acordo com o plano de trabalho definido para ela, depois daquela última entrega não há mais manobras a serem executadas no horizonte de planejamento atual;
 - Na linha de coleta ou na linha de entrega aguardando que um *técnico de operação ferroviária* faça o acoplamento ou desacoplamento de vagões à locomotiva.
4. Em *modo desativada*, isto é, em algum lugar fora ou dentro do pátio mas parada e com o motor desligado. Isto ocorre, por exemplo, se de acordo com o plano de trabalho em execução, a locomotiva não tem nenhuma manobra a ser executada durante todo o horizonte de planejamento atual, assim, ela fica parada e com o motor desligado até o início do próximo horizonte de planejamento. Outro exemplo é quando a locomotiva está em manutenção. Uma locomotiva em modo desativada pode, teoricamente, não ser considerada como parte da frota que serve àquele pátio em questão durante o horizonte de planejamento.

Uma manobra pode ser classificada por tipo, de acordo com a tarefa do pátio à qual ela está relacionada. Assim, uma manobra pode ser de *desmembramento* de trens que chegam, *carregamento* ou *descarregamento* de vagões, deslocamento para *inspeção* para verificar a necessidade de limpeza de um conjunto de vagões ou manutenção de um vagão específico, *classificação* para retirada de determinados vagões de um conjunto ou ordenação dos mesmos de acordo com um critério pré-estabelecido, de *formação* de trens que vão partir do pátio ou simplesmente de *deslocamento* de vagões dentro do pátio, seja para levar ou trazer das áreas de limpeza ou manutenção ou para organizar melhor os vagões no pátio, de modo a simplificar a realização de tarefas planejadas para o futuro.

Os profissionais responsáveis pelas operações de um pátio ferroviário normalmente se dividem em equipes de tripulação, de planejamento de operações, de manutenção e de apoio administrativo. As funções mais importantes para o contexto deste trabalho são:

- O *maquinista*, que é a pessoa responsável pela condução da locomotiva;
- O *técnico de operação ferroviária (TOF)*, que faz principalmente os acoplamentos e desacoplamentos;
- O *planejador*, que define as manobras a serem feitas a partir da consolidação das demandas operacionais do pátio;
- O *controlador de pátios e terminais* (Figura 3), que monitora as rotas feitas pelas locomotivas de manobra dentro do pátio e define e informa aos maquinistas as manobras a serem realizadas.



Figura 3: Um controlador de Pátio em seu posto de trabalho. Toronto, Ontário, Canadá.

Diferente da abordagem proposta em Crainic et al. (1980), que considera os custos de operações de pátios estratificados pelo tipo da manobra, este trabalho classifica os custos operacionais de um pátio ferroviário em custos fixos e custos variáveis, seja qual for o tipo de manobra. Os *custos fixos* estão relacionados ao custo de propriedade dos ativos do pátio, sendo a frota de locomotivas de manobra o único ativo de interesse no contexto deste trabalho. Os *custos variáveis* estão

relacionados à utilização das locomotivas e consideram principalmente o consumo de combustível, o desgaste ocorrido com o funcionamento das mesmas e o custo da tripulação e demais profissionais envolvidos na realização das manobras.

Indicadores de desempenho são medidas utilizadas pelas equipes de gestão do sistema ferroviário para planejamento, avaliação do nível de eficácia e fornecimento de informações para entidades governamentais. O *ciclo médio de vagões* é o indicador de desempenho com periodicidade de apuração mensal que expressa, em dias, o intervalo entre carregamentos de vagões. A sua aplicabilidade está na verificação de adequação dos planos de transporte, especialmente os tempos alocados às operações de carregamento e descarregamento de vagões (Diógenes, 2002). Albuquerque (2006) analisa alguns modelos para a avaliação do desempenho logístico de sistemas ferroviários de carga e apresenta o ciclo médio de vagões como o indicador mais significativo da produtividade do material rodante.

2.2.

Etapas do planejamento operacional de pátios ferroviários

O planejamento de sistemas de transporte ferroviário envolve o tratamento de diversos recursos humanos e materiais que se relacionam numa rede complexa de decisões, interdependências e regras que afetam seus componentes de forma distribuída (Crainic, 2002). Em seu trabalho voltado para ferrovias de transporte público de passageiros, Lindner (2000) sugere uma decomposição hierárquica do processo de planejamento ferroviário, estruturando-o em cinco etapas. Este tratamento hierárquico pode ser utilizado como referência para modelagem voltada para otimização dos processos e possibilita a divisão do planejamento em tarefas mais simples de modo que a solução ótima encontrada para uma etapa serve de entrada para o problema subsequente. Bussieck ET al. (1997) apresentam claramente o principal ponto positivo e negativo desta abordagem: uma vantagem técnica evidente é que os problemas mais simples são mais fáceis de serem resolvidos com os métodos e recursos computacionais disponíveis. Por outro lado, não se espera encontrar uma solução ótima para o sistema como um todo ao final do processo e isso é, certamente, uma desvantagem.

A classificação utilizada no presente trabalho foi apresentada em Assad (1980) e define três níveis para o planejamento de transporte ferroviário:

estratégico, tático e operacional. Desenvolvida em um modelo baseado em ferrovias de transporte de cargas, esta classificação se baseia no fluxo de informações e a forma como são definidas as políticas e diretrizes do sistema ferroviário. Sua simplicidade e clareza fizeram com que esta classificação fosse adotada em muitos outros trabalhos como em Kraft (1998), Winter (1999), Crainic (2002), Garcia & Gutierrez (2003), Sabino (2004) e Crainic & Kim (2007).

Na classificação de Assad, o planejamento Estratégico é de longo prazo. Normalmente é um capítulo ou componente do planejamento da organização como um todo e envolve a alta administração da empresa em decisões sobre grandes investimentos de capital no decorrer dos próximos anos ou décadas. Decisões tomadas no planejamento estratégico orientam políticas gerais de desenvolvimento da empresa e envolvem elementos como o desenho da malha ferroviária e sua evolução no tempo, a localização de seus pátios de manobras e terminais, a aquisição de recursos como vagões e locomotivas e a definição da carteira de serviços e as políticas de tarifação do sistema ferroviário.

O Planejamento Tático é de médio prazo e visa determinar, em um horizonte de alguns meses, a forma com que devem ser feitas a alocação e utilização dos recursos de modo a obter o melhor desempenho possível do sistema como um todo. Neste nível de decisão os dados são sumariados, as políticas abstraídas e as decisões são sensíveis apenas à variações consideráveis nos parâmetros do sistema, tais como as alterações sazonais nas demandas de tráfego (Crainic & Roy, 1988). Um exemplo típico de uma decisão tática é o desenho da rede de serviços, incluindo determinação do tipo de serviço a ser oferecido, programação de serviços (definição de prioridade, capacidade e frequência dos trens), definição de rotas de trens (i.e. definição de origem, destino, rota física e paradas intermediárias) e reposicionamento da frota para uso no próximo período de planejamento.

O Planejamento Operacional é de curto prazo, feito por unidades locais de gerenciamento tais como gerentes de pátio e supervisores do centro de controle de operações. Este nível de planejamento ocorre em um ambiente altamente dinâmico em que fatores temporais têm um papel importante e a representação detalhada dos veículos, da topologia e das atividades é essencial. São

considerados no nível operacional o planejamento de embarques, a programação de veículos, a auditoria de cargas e o gerenciamento de avarias.

O objetivo do planejamento operacional é garantir uma operação eficiente e de baixo custo, garantindo que as demandas sejam atendidas no prazo e que o impacto das variações no fluxo de operações seja minimizado. Um bom plano de operações de pátio, por exemplo, resulta em uma utilização eficiente das linhas de pátio e das locomotivas de manobra, e esta eficiência é medida em função da satisfação do cliente e dos custos associados.

Em adição à tradicional classificação hierárquica proposta por Assad, este trabalho propõe a decomposição do planejamento operacional de pátios ferroviários em três etapas, como mostra a Figura 4. Esta decomposição foi resultado de entrevistas e validações feitas com o pessoal de campo e análises técnicas do processo de planejamento operacional, tal qual é desenvolvido na rotina diária de um pátio real.

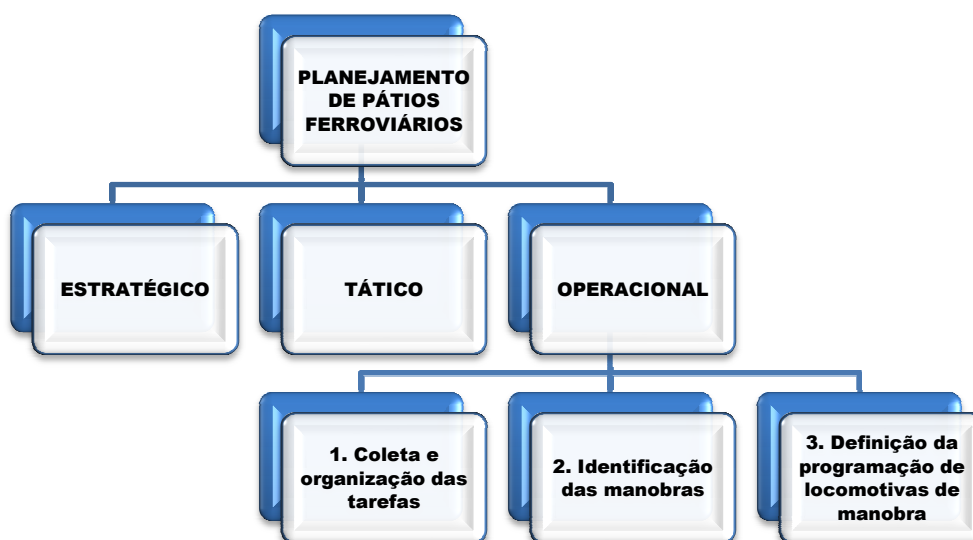


Figura 4: Etapas do planejamento operacional de pátios ferroviários

A classificação proposta neste trabalho está detalhada nos parágrafos que se seguem e está fundamentada na cronologia na qual as informações sobre as manobras futuras se tornam disponíveis para a equipe de planejamento operacional.

2.2.1. A Coleta e organização das tarefas

A primeira etapa do planejamento operacional considera as seguintes informações, as quais são normalmente conhecidas com 24 horas de antecedência:

- **Programação de Trens** – Também conhecido como tabela de horários de trem. O Plano de Trens, um dos principais produtos do planejamento tático, influencia diretamente as operações do pátio (e.g.: as manobras de recepção e formação são definidas em função da programação de chegada e partida dos trens). A programação de trens é a solução do problema de escalonamento de trens, o qual identifica as rotas dos trens, suas frequências semanais e suas tabelas de horários de modo a minimizar o custo de transporte das cargas de seus locais de origem até os seus locais de destino. A escala de trem, depois de definida, é executada repetidamente a cada período pré-definido (e.g.: uma semana) durante certo tempo (e.g.: três meses) ou até que se faça uma revisão extraordinária. É importante notar que a escala de tempo envolvida nestas atividades de planejamento é de alguns dias a alguns meses;
- **Plano de Carregamento e Descarregamento** – Trata-se de uma lista contendo todas as operações de carregamento previstas para o pátio para o horizonte de planejamento seguinte, normalmente de algumas horas. No plano de carregamento é especificado o cliente, a área do pátio onde deve ocorrer o carregamento e os detalhes pertinentes aos vagões a serem carregados como, por exemplo, peso, localização e número de identificação do vagão. As operações de descarregamento compõem, analogamente, o Plano de Descarregamento;

Uma *tarefa*, no contexto desta etapa, se refere a uma demanda operacional de mais alto nível para o pátio, como por exemplo, formar um trem, descarregar os vagões de um trem ou inspecionar um lote de vagões e em seguida realizar as manutenções e limpezas necessárias. Uma tarefa não está associada a uma locomotiva específica e normalmente requer a realização de várias manobras para atendê-la. As informações consideradas sobre cada tarefa nesta etapa são o tipo de

tarefa a ser executada, o número de vagões envolvidos, as áreas de origem e destino para cada operação, o tipo de carga e informações sobre o cliente a ser atendido. Eventualmente saber-se-á a localização dos vagões a serem considerados na tarefa e alguma informação sobre quando a tarefa deverá ser executada.

Nesta etapa não há restrições a serem consideradas nem otimização a ser feita. O mais importante é certificar-se que todas as tarefas a serem executadas no horizonte de planejamento em questão foram consideradas e que todos os dados implícitos foram tratados ao ponto de se transformarem em informações estruturadas o bastante para serem manipuladas nas etapas seguintes. Por exemplo, as seguintes informações sobre prazos vão determinar, posteriormente, o horário mais cedo ou mais tarde possível para realizar as manobras correspondentes a uma tarefa:

- O prazo para conclusão da tarefa de modo a atender o nível de serviço contratado com os clientes;
- O horário mais cedo que a tarefa pode iniciar, considerando o horário de término de alguma outra tarefa que seja pré-requisito desta.

Ao contrário das outras duas etapas do planejamento operacional, que serão apresentadas a seguir, esta primeira etapa não é um processo de tomada de decisão, mas simplesmente uma coleta e classificação de dados. O produto que deve ser entregue como resultado desta etapa será chamado neste documento de *lista das tarefas* e constitui-se numa compilação sistemática, classificada em ordem cronológica, de todas as operações com execução prevista para o horizonte de planejamento dado.

Na prática, parte das tarefas programadas para o pátio é composta de informações extemporâneas que chegam pelos meios de comunicação tradicionais (e.g. e-mail, fax, telefone) e a outra parte consiste de informações obtidas através de interfaces com sistemas de informações já existentes para a gestão dos processos que geram demandas para o pátio.

A lista das tarefas é uma fonte de informação muito importante para vários processos de planejamento e de avaliação no contexto da ferrovia. Por exemplo,

esta lista pode ser utilizada no planejamento tático, já que ele fornece indicações sobre a utilização dos recursos do pátio em médio prazo (e.g.: linhas, locomotivas de manobras e demanda por equipagem em cada área do pátio considerando o plano de trens e as rotinas de carregamento e descarregamento atuais).

2.2.2. Identificação das Manobras

A segunda etapa do planejamento operacional do pátio considera todas as tarefas planejadas e não planejadas e as manobras herdadas do horizonte de planejamento anterior. Nesta etapa, o planejador de pátio elabora a lista completa de todas as manobras necessárias para o próximo horizonte de planejamento o qual compreende algumas horas. Espera-se que esta etapa esteja concluída alguns minutos antes do início do horizonte de planejamento ao qual ela se refere, de modo a permitir a execução das tarefas da terceira etapa antes do início do referido horizonte de planejamento.

Nesta segunda etapa também é necessário considerar o horário limite para início e término de cada manobra e o tempo máximo permitido de atraso para começo e fim da mesma, conforme acordo de nível de serviço firmado com o cliente. Em caso de atraso, o contrato com o cliente normalmente prevê um valor em moeda corrente que representa a penalidade a ser paga, caso as operações de carregamento ou descarregamento excedam este atraso máximo permitido. Neste caso, os limites acordados e os valores das penalidades previstas devem ser considerados como restrições.

As tarefas consideradas nesta etapa podem ser classificadas da seguinte forma:

- *Tarefas planejadas*: são todas as tarefas que constam na lista das tarefas, ou seja, aquelas identificadas na etapa anterior;
- *Tarefas não planejadas*: são todas as operações de pátio que ocorrerão no próximo horizonte de planejamento, mas que não foram consideradas na etapa anterior de construção da lista de macrotarefas porque elas não eram conhecidas naquele momento. Este grupo inclui as tarefas surgidas pouco tempo antes do início da segunda etapa de planejamento, como, por exemplo, pedidos de levar ou trazer vagões para manutenção ou limpeza. Neste grupo também se

incluem algumas demandas imprevisíveis, extemporâneas, urgentes ou imprecisas, eventualmente vindas diretamente do próprio cliente como um pedido especial;

- *Tarefas herdadas do horizonte de planejamento anterior* são as manobras atrasadas ou postergadas do horizonte de planejamento anterior. Estas tarefas são muito bem detalhadas e apresentadas na forma de uma lista de manobras a ser executadas no decorrer do horizonte de planejamento que está sendo tratado.

O objetivo da segunda etapa do planejamento operacional é identificar todas as manobras necessárias para realizar as operações de pátio que serão realizadas no horizonte de planejamento em questão, especificando:

- Linha de origem;
- Linha de destino;
- Quantidade de vagões;
- Peso do conjunto de vagões a ser deslocado;
- *Janelas de tempo* para realização da manobra, ou seja, os horários mais cedo e mais tarde possíveis para coletar e para entregar os vagões a serem transportados;
- Identificação da manobra que é pré-requisito para a manobra em questão (se houver).

Esta lista deve incluir as manobras de desmembramento, carregamento e descarregamento, classificação, envio e retorno de vagões para limpeza e manutenção, inspeção, além das manobras dos seguintes tipos:

- Manobras implícitas de puxar vagões do início de uma linha e deixá-los em outra linha para tornar acessíveis vagões que estão localizados atrás destes.
- Manobras de reposicionamento de vagões para tornar mais rápidas manobras futuras. Em geral este tipo de manobra é uma demanda do plano de distribuição de vagões vazios no pátio e ou do plano de classificação dos vagões que estão na área de estacionamento.

- Manobras especiais de levar locomotivas escoteiras para locais como área de abastecimento ou troca de equipe.

O recurso mais importante na etapa de identificação das manobras são as linhas do pátio. Deseja-se monitorar a ocupação de linhas e definir a seqüência na qual estas operações devem ocorrer de modo a minimizar gargalos de alocação no decorrer das manobras planejadas para o horizonte de planejamento em questão. É importante notar que o estado de ocupação das linhas do pátio não é uma variável binária que simplesmente define se a linha está ocupada ou não. Pode ser que uma linha esteja parcialmente ocupada de tal modo que, embora existam vagões estacionados nela, outros vagões possam ser adicionados sem que a capacidade da linha seja excedida.

O processamento da etapa de identificação das manobras deve manter linhas desocupadas o bastante para acomodar os vagões nas áreas de pátio de destino das manobras previstas para o futuro. Para tanto, é preciso explorar a flexibilidade das janelas de tempo e acompanhar o estado de alocação das linhas de cada área do pátio com o passar do tempo, garantindo que os conjuntos de vagões caibam nas linhas de destino das manobras que os envolvem.

2.2.3. Definição do plano de trabalho das locomotivas de manobras

Esta é a última das três etapas e é executada pelo controlador de pátio. O principal dado de entrada para esta etapa é a lista produzida na etapa de identificação das manobras contendo todas as manobras a serem executadas.

O objetivo desta etapa é definir qual locomotiva deve executar qual manobra (alocação) e também a ordem de execução destas manobras (seqüenciamento) de modo a não violar nenhuma restrição operacional (e.g.: janela de tempo ou capacidade da locomotiva para movimentar o peso do bloco) e, ao mesmo tempo, minimizar o custo operacional do pátio. Para executar esta etapa do planejamento, é necessário fornecer informações sobre o leiaute do pátio e sobre as locomotivas de manobra disponíveis nele e enumerar detalhadamente todas as manobras a serem realizadas durante um horizonte de planejamento especificado.

É importante observar que as manobras implícitas, de reposicionamento e manobras especiais devem ser identificadas na segunda etapa e especificadas explicitamente como dado de entrada desta etapa.

O objetivo de redução do custo operacional da etapa 3 equivale, indiretamente, à redução das seguintes grandezas:

- (a) O tempo total de realização de todas as manobras, incluindo o tempo de espera caso haja conflito de uso de uma mesma linha por duas locomotivas de manobra, o qual é diretamente proporcional ao custo variável;
- (b) A quantidade de locomotivas necessárias para realizar todas as manobras da lista, a qual é o componente do custo fixo;

Vale notar que ao reduzir o tempo total para realização de todas as manobras reduz-se o tempo de permanência dos vagões no pátio, o que implica diretamente na redução do ciclo médio de vagões. Por outro lado, a redução da quantidade de locomotivas necessárias, se praticada consistentemente por um longo tempo, pode resultar em uma recomendação de redução do número de locomotivas necessárias para a operação do pátio.

Este trabalho é dedicado à modelagem e ao desenvolvimento de uma ferramenta computacional de apoio à decisão para a terceira etapa do planejamento operacional de pátios ferroviários.

2.3. Enunciado

O PPOLM é, na verdade um problema de otimização combinatória que surge na terceira etapa do planejamento operacional de pátios ferroviários e seu enunciado, por extenso, pode ser redigido como segue.

Dadas as seguintes informações sobre o pátio:

1. Leiaute do pátio, incluindo comprimento das linhas;
2. Lista de manobras a serem executadas, incluindo detalhes como origem, destino e vagões a serem transportados;

3. Lista das locomotivas de manobra disponíveis, incluindo informações como a localização inicial e capacidade de cada uma.

Deseja-se encontrar uma sugestão de:

1. Uma programação para as locomotivas de manobra, i.e., a definição de quais ordens de serviço devem ser executadas por cada locomotiva e a seqüência na qual cada locomotiva deve executar suas ordens de serviço;
2. Uma rota completa a ser seguida por cada locomotiva na execução de suas ordens de serviço, considerando a programação sugerida

de tal modo que nenhuma das restrições operacionais do pátio seja violada e que o custo operacional da programação e da rota sugeridas seja mínimo.

As restrições mais importantes a serem consideradas são:

- (a) Cada ordem de serviço pode ter a si associada janelas de tempo, que especificam o horário mais cedo e mais tarde possível para coletar e para entregar os vagões a serem transportados.
- (b) Todas as ordens de serviço planejadas devem ser executadas, ou pelo menos iniciadas, durante o Horizonte de planejamento;
- (c) Nem toda locomotiva pode executar qualquer manobra. O peso total do conjunto de vagões a ser movido não pode ser maior do que o peso máximo que a locomotiva é capaz de puxar ou empurrar.
- (d) Certas ordens de serviço podem ter outra como pré-requisito. Isto ocorre, por exemplo, quando uma seqüência de operações deve ser realizada com um mesmo conjunto de vagões ou quando o conjunto de vagões a ser movido se encontra atrás de outros vagões que, portanto, precisam ser movidos antes que a locomotiva tenha acesso aos vagões referenciados naquela ordem de serviço;

Neste contexto, uma boa sugestão significa uma solução de custo operacional mínimo.

2.4. Modelagem do Problema utilizando grafos

Este item apresenta a definição dos elementos envolvidos no PPOLM baseado em Teoria de Grafos (Diestel, 2005). Estas definições são utilizadas primeiramente para a apresentação do enunciado formal do problema e depois são referenciadas como suporte para explicações posteriores.

2.4.1. Locomotivas e ordens de serviço

Seja um Horizonte de Planejamento Δh de duração h que se inicia no momento h_s e termina no momento h_f (de tal modo que $h = h_f - h_s$).

Seja E o conjunto formado por todas as locomotivas de manobra disponíveis no pátio durante o horizonte de planejamento Δh . Cada locomotiva e tem a si associado um peso máximo q_e que ela é capaz de puxar ou empurrar e as linhas do pátio onde ela se encontra no início e no final do Horizonte de Planejamento, as quais serão chamadas de e^+ e e^- respectivamente.

Seja R um conjunto de ordens de serviço que devem ser executadas durante o intervalo $\Delta h = [h_s, h_f]$. Associada a cada ordem de serviço r em R existe um conjunto de vagões com um peso total w_r e comprimento total y_r que precisa ser coletado na linha r^+ e entregue na linha r^- , ambas localizadas em um pátio ferroviário. O instante t^{r^+} em que os vagões serão coletados na linha r^+ deve estar dentro de um intervalo de tempo $\Delta r^+ = [t_s^{r^+}, t_f^{r^+}]$ e a hora de entrega t^{r^-} deve estar dentro do intervalo de tempo $\Delta r^- = [t_s^{r^-}, t_f^{r^-}]$. Este dois intervalos de tempo são chamados *janela de tempo* de coleta e *janela de tempo* de entrega respectivamente.

Uma locomotiva se desloca pelo pátio a uma velocidade s_e que varia principalmente de acordo com:

- ✓ A sua capacidade de tração;
- ✓ O peso que está sendo puxado ou empurrado (quando a locomotiva trafega escoteira, este peso é o próprio peso da locomotiva).

- ✓ As restrições de segurança ou operacionais da linha por onde passa a locomotiva. Por exemplo, uma restrição de segurança pode limitar a velocidade de deslocamento em certas linhas do pátio ou uma locomotiva pode ter que parar durante o seu percurso e esperar até que a linha adiante seja desocupada por um comboio que por ela esteja trafegando.
- ✓ Da resistência ao movimento para o trecho considerado no deslocamento. Segundo Castello Branco & Ferreira (2000), esta resistência depende de vários fatores tais como atrito, características da via permanente (resistência de curvas e rampas), ventos (principalmente ventos laterais) e a avaliação quantitativa destes fatores tem sido objeto de estudos desde o início da ferrovia, todavia, a menos de algumas poucas revisões de termos ocorridas ao longo de décadas, as fórmulas propostas por W. J. Davis em 1926, conhecidas como *Fórmulas Davis* continuam sendo usadas até os dias de hoje e consideradas boas aproximações.

Dos fatores relacionados acima, os mais relevantes são a capacidade de tração da locomotiva e o peso dos vagões a serem transportados, já que as locomotivas de manobras circulam em velocidades relativamente baixas e os pátios em geral não costumam ter quantidade considerável de aclives, declives e curvas.

2.4.2. Grafo de ordens de serviço

Seja $G = (V, A)$ um grafo orientado, ponderado nos arcos, onde o conjunto V de seus nós é formado por todas as linhas lógicas do pátio que possam ser o local de coleta ou entrega de alguma manobra ou ainda a localização inicial de alguma das locomotivas do conjunto E . Os nós v deste grafo são conectados por arcos a em A que denotam a existência de um caminho conectando os nós i e j de tal forma que a locomotiva de manobras pode perfazer este caminho iniciando no nó i e terminando no nó j . O peso de cada arco de G é um vetor que representa o custo do deslocamento entre os seus dois nós adjacentes na direção especificada.

Cada elemento do vetor dos pesos representa o custo de percorrer o referido caminho passando por uma seqüência específica de linhas do pátio.

Note que ao invés de linhas físicas, aqui se utiliza o conceito de *linhas lógicas*, que são distintas para cada manobra. Assim, para cada linha física do pátio que ocorre mais de uma vez como origem ou destino no conjunto R de ordens de serviço, o grafo G contém tantas cópias distintas de nós associados a esta mesma linha física quanto for o número de ordens de serviço que fazem referência a esta linha. O grafo G tem, portanto, exatamente $2|R|$ vértices, onde $|R|$ é o número de ordens de serviço, já que a cada manobra estão associadas duas linhas lógicas, uma de origem e uma de destino.

2.4.3. Grafo descritivo do leiaute do pátio

Seja $G' = (V', A')$ um grafo misto, conexo e ponderado nos nós e nos arcos, onde o conjunto V' de seus nós descreve todas as linhas do pátio. Os nós v' deste grafo são conectados por arcos a' em A' para descrever o leiaute do pátio de tal forma que conexões entre linhas adjacentes são representadas pelos arcos ou arestas que ligam os nós adjacentes correspondentes. Arcos entre dois nós de G' indicam que uma locomotiva só pode movimentar entre estes nós na direção correspondente. Arestas ligando dois nós de G' indicam a possibilidade de movimentação de locomotivas em ambas as direções entre aqueles nós. O peso de cada nó v' de G' é o comprimento $l_{v'}$ da linha de pátio correspondente. O peso de cada arco ou aresta de G' é a distância entre o par de linhas do pátio conectadas por aquele arco ou aquela aresta.

Na parte superior da Figura 5 há o desenho de uma região hipotética denominada área B, pertencente a um pátio chamado Pátio K. A área B contém sete linhas, representadas pelos segmentos em preto e identificadas por um número dentro de um quadrado cinza, e quatro AMVs, representados por pares de segmentos cinzas dispostos em ângulo agudo. A seta cinza na parte superior da linha 3 indica que há uma regra operacional que determina a circulação por esta linha em uma única direção. A parte inferior da figura mostra o grafo G' associado a este setor de pátio. Vale notar que os nós 1, 3 e 5 do grafo G' estão

conectados por arcos unidirecionais, indicando a direção única de tráfego permitida na circulação entre as linhas 1 e 3 e 3 e 5.

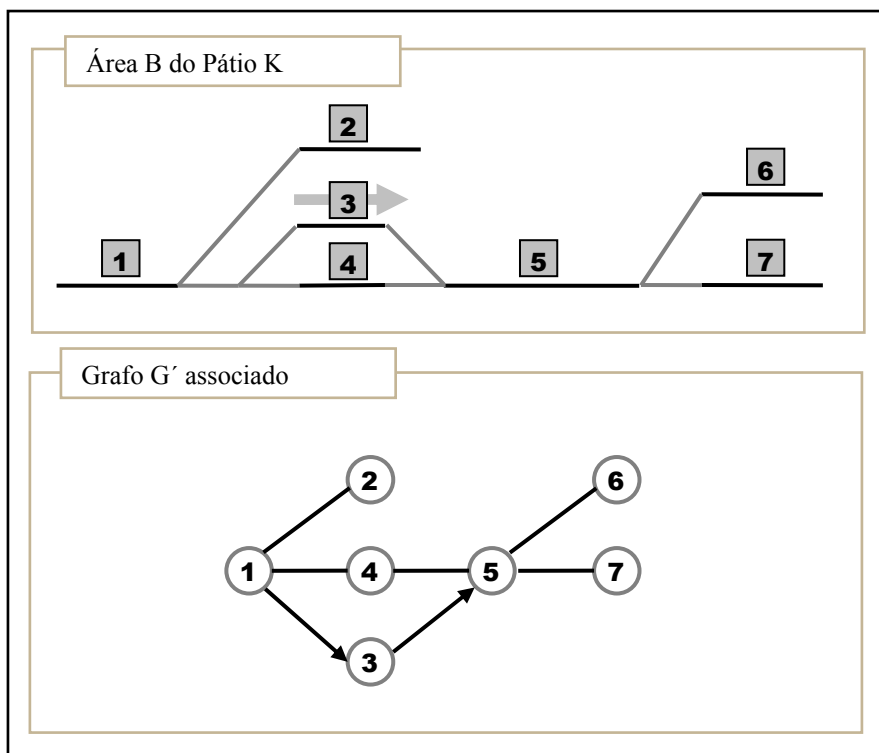


Figura 5: Grafo descritivo do leiaute da área B do pátio K

Cabe aqui uma explicação sobre a modelagem do leiaute do pátio utilizando o grafo orientado G' : Fisicamente, não há restrição quanto à direção de tráfego nas linhas do pátio, porém, no dia a dia da operação do pátio é comum o estabelecimento de regras que obrigam ou recomendam o tráfego em uma direção específica para determinadas linhas. Isto ocorre com o objetivo de atender critérios de segurança ou simplesmente melhorar a circulação pelo pátio, por exemplo, evitando-se que comboios frequentemente se cruzem trafegando em direções contrárias. A opção pelo uso de um grafo misto para o mapeamento das linhas do pátio considera a possibilidade de informar eventuais regras de direção de circulação para linhas específicas. Assim, a implementação das estruturas de dados para representação do leiaute do pátio e dos algoritmos para percorrê-la tornam-se mais simples e as soluções são geradas naturalmente aderentes às regras de circulação.

2.4.4. Correspondência entre G e G'

A Figura 6 mostra a correspondência entre os grafos G e G' . Para clareza do desenho, nem todos os arcos de G' estão representados nesta figura. No plano superior contém a representação do grafo G' e o plano inferior contém a representação do grafo G . As linhas verticais pontilhadas que unem os dois planos indicam correspondências entre nós dos grafos G e G' . Nós empilhados no grafo G indicam linhas do pátio que são origem ou destino de mais de uma manobra e, nestes casos, o número de nós empilhados de G indicam exatamente quantos nós correspondem a um único nó em G' . Note que:

- **Nem todos os nós de G' têm um nó correspondente em G :** De fato, uma linha que não é origem e nem destino de nenhuma manobra aparece como um nó de G' , mas não aparece como um nó de G .
- **Um nó de G' pode ter mais de um nó correspondente em G :** Caso mais de uma manobra tenham como origem ou destino uma mesma linha;
- **Todo nó de G tem um único correspondente em G' :** Como toda origem ou destino de manobra tem que ser uma linha do pátio, todos os nós de G têm um correspondente em G' ;
- **Há uma associação natural entre arcos do grafo G e caminhos do grafo G' :** Os arcos de G representam uma ligação entre a origem e o destino de pelo menos uma manobra ou o deslocamento de uma locomotiva escoteira para coletar o conjunto de vagões de uma manobra. Por outro lado, os arcos ou arestas de G' representam a conexão física entre as linhas e, eventualmente, a direção única na qual é possível trafegar entre duas linhas adjacentes. Dados dois nós adjacentes v_1 e v_2 de G , há pelo menos um caminho em G' com origem e destino, respectivamente, nos nós correspondentes v_1' e v_2' de G' . Se v_1' e v_2' são adjacentes, então este caminho é único. Caso contrário, pode existir mais de um caminho em G' associado ao arco (v_1, v_2) de G .

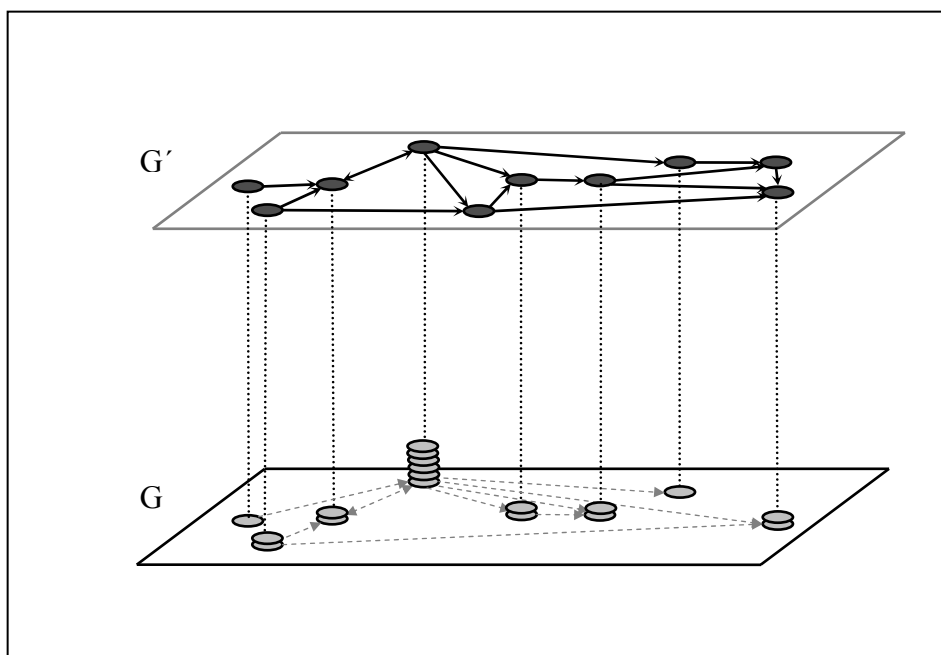


Figura 6: Correspondência entre os grafos G e G'

É importante notar que, de acordo com as definições de G e G' , decorre que $V \subseteq V'$, ou, equivalentemente, todo nó v de G tem seu nó correspondente v' no grafo G' .

2.4.5. Caminho de Coleta e Entrega

Um *caminho de coleta e entrega* é um conjunto ordenado

$$O_e = \{e^+, v_1, v_2, \dots, v_n, e^-\} \subseteq V \quad (1)$$

representando um caminho direcionado simples em G para uma locomotiva de manobra $e \in E$, satisfazendo as seguintes condições:

$$\{r^+, r^-\} \subset O_e \vee \{r^+, r^-\} \cap O_e = \emptyset \quad \forall r \in R \quad (2)$$

$$\text{Se } v_j = r^+ \text{ e } v_k = r^- \text{ para um dado } r \in R, \text{ então } k = j + 1, \text{ ou} \quad (3)$$

seja, v_k é um sucessor direto de v_j em O_e

$$w_r \leq q_e \quad \forall r \in R \mid r^+ \in O_e \quad (4)$$

$$\text{Se } v_k = r^+ \text{ ou } v_k = r^-, \text{ sendo } v_k \in O_e, \quad (5)$$

então $T_{v_k} \leq t_f^{v_k}$ e $T_{v_k} = \max\{t_s^{v_k}, T_{v_{k-1}} + t_{(v_{k-1})(v_k)}^{O_e}\}$

$$T_{e^+} \geq h_s \text{ e } T_{e^-} \leq h_f \quad (6)$$

Onde T_{v_k} é o instante no qual a locomotiva $e \in E$ chega ao nó $v_k \in V$ e $t_{(v_{k-1})(v_k)}^{O_e}$ é o tempo total necessário para percorrer o caminho mais curto indo do nó v_{k-1} ao nó v_k .

A condição (2) força o emparelhamento da coleta com a entrega e a condição (3) é a condição de carga única, ou *full truckload*, que estabelece que toda coleta deve ser imediatamente seguida de sua respectiva entrega. A condição (4) é a restrição de capacidade. A condição (5) especifica as restrições de janela de tempo de coleta e entrega: A locomotiva de manobras não pode chegar à linha de coleta e nem à linha de entrega de cada manobra depois de seus respectivos finais de janela de tempo e se a mesma chegar à linha de coleta ou de entrega antes do início da janela de tempo correspondente, ela deverá esperar até o instante $t_s^{v_k}$. Finalmente, a condição (6) especifica que todas as manobras planejadas devem ser executadas dentro do intervalo de tempo Δh .

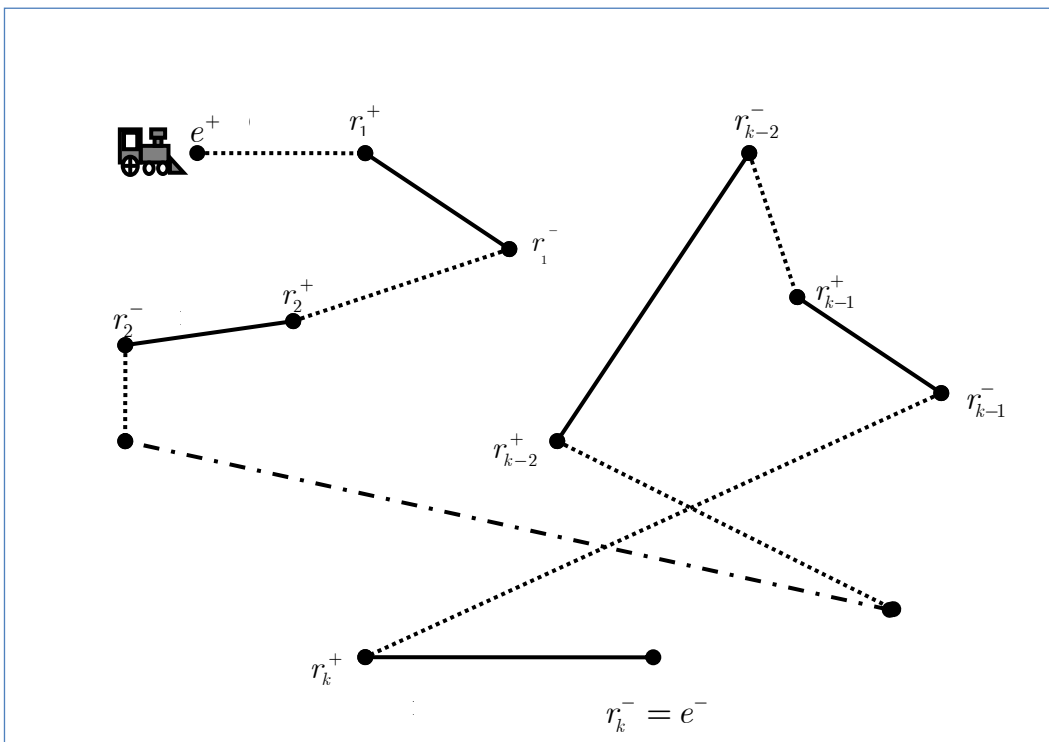


Figura 7: Caminho de coleta e entrega O_e no grafo G

A Figura 7 ilustra um caminho de coleta e entrega O_e em G . Os segmentos contínuos representam o deslocamento de um comboio de pátio puxado ou empurrado pela locomotiva e . Os segmentos pontilhados correspondem ao deslocamento da locomotiva e no modo escoteira. Segmentos pontilhados e contínuos são arcos do grafo G e os pequenos círculos redondos são nós deste mesmo grafo.

O segmento ponto-tracejado representa uma seqüência de movimentos feitos aos pares, primeiro em modo escoteira e depois em modo de transporte. A locomotiva e inicia o seu caminho a partir de sua linha de estacionamento representada pelo nó e^+ , ou seja, onde se encontrava no momento do início do Horizonte de Planejamento. A partir daí, a locomotiva e se desloca escoteira até a linha r_1^+ , de onde ela deverá coletar os vagões para a sua primeira manobra. Os vagões especificados na manobra r_1 são então acoplados à locomotiva e , que os transporta até a linha de entrega r_1^- . Em seguida, a locomotiva e se desloca escoteira até o ponto r_2^+ para coleta dos vagões da segunda manobra e assim por diante, até que a locomotiva e faz a sua última entrega na linha r_k^- que é também a mesma linha onde ela estará estacionada ao final do Horizonte de Planejamento, ou seja, utilizando a notação proposta $r_k^- = e^-$. Vale notar que o nó e^- de um horizonte de planejamento é o nó e^+ do próximo horizonte de planejamento.

2.4.5.1. Custo de um caminho de coleta e entrega

O custo fixo de um caminho de coleta e entrega é o custo de propriedade da locomotiva associada a ele por unidade de tempo multiplicado pela duração do horizonte de planejamento.

Como, por definição, um caminho de coleta e entrega é uma seqüência de vértices do grafo G , o custo variável de um caminho de coleta e entrega é a soma dos custos associados a todos os arcos de G contidas nele. Os itens que se seguem apresentam duas definições para o custo associado aos arcos de G . A primeira definição especifica o custo do caminho de coleta e entrega como função da distância percorrida e a segunda definição especifica o custo como função do tempo gasto para percorrer o caminho.

Sabe-se que todo nó v em O_e é, por definição, uma linha do pátio e, portanto, tem seu nó correspondente v' no grafo G' . Sejam então dois nós adjacentes v_1 e v_2 em um caminho de coleta e entrega O_e . A dupla (v_1, v_2) está naturalmente associada à dupla (v_1', v_2') de G' , assim, define-se o custo associado a um arco (v_1, v_2) de G como sendo igual ao custo associado a um caminho correspondente $P'(v_1', v_2')$ que vai de v_1' até v_2' em G' . Estes conceitos são a base para as definições que se seguem, as quais são importantes elementos para a definição da função objetivo do problema.

2.4.5.1.1. Custo variável baseado em distância

Como os nós do grafo G' são linhas do pátio, o valor associado ao arco a' que une dois nós adjacentes v_1' e v_2' de G' é definido como sendo a distância entre o ponto médio da linha associada ao nó v_1' e o ponto médio da linha associada ao nó v_2' . A Figura 8 mostra duas linhas adjacentes de um pátio de comprimento l_1 e l_2 respectivamente e a distância l entre elas, calculada como

$$D(v_1', v_2') = \frac{l_1 + l_2}{2} \quad (7)$$

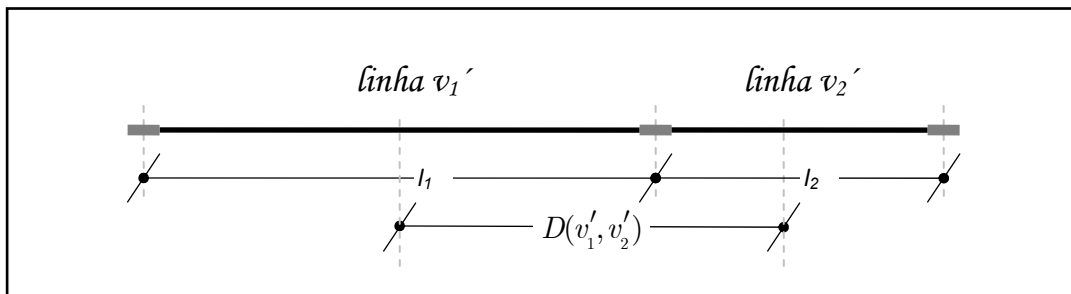


Figura 8: Duas linhas adjacentes e o cálculo da distância entre elas

Se as duas linhas v_1' e v_2' não são adjacentes, como G' é um grafo conexo, decorre que existe pelo menos um caminho $P'(v_1', v_2') = \{v_1' = u_1, u_2, \dots, u_{n-1}, u_n = v_2'\} \subseteq V'$ em G' unindo v_1' a v_2' , sendo $n \geq 3$. A distância percorrida em cada caminho $P_i'(v_1', v_2')$ (com $i \geq 1$) é dada pela seguinte fórmula:

$$\Upsilon_i(v_1', v_2') = \sum_{k=1}^{n-1} D(u_k, u_{k+1}) \quad (8)$$

A distância entre linhas v_1' e v_2' é dada então por

$$\Upsilon(v_1', v_2') = \min\{\Upsilon_i(v_1', v_2')\} \quad (9)$$

O custo variável de um caminho de coleta e entrega O_e é então definido como a distância total percorrida no caminho correspondente em G' :

$$\xi(O_e) = c_d \sum_{z, z+1 \in O_e} \Upsilon(v'_z, v'_{z+1}) \quad (10)$$

onde c_d é um valor constante e igual ao custo médio de deslocamento da locomotiva de manobra e por unidade de distância e v'_k e v'_{k+1} são nós de G' associados aos nós v_k e v_{k+1} de O_e .

O valor de c_d é uma aproximação e considera a média entre o custo de deslocamento da locomotiva e no modo escoteira e o custo de deslocamento da mesma no modo de transporte, acoplada a um conjunto de vagões de peso médio.

Esta é uma definição simples e intuitiva do custo variável de um caminho de coleta e entrega: O custo é proporcional à distância total percorrida pela locomotiva ao longo de seu caminho. Como o valor da constante c_d e o leiaute do pátio são conhecidos e não variam durante o horizonte de planejamento, o custo variável baseado em distância é também denominado de *custo variável estático*.

2.4.5.1.2. Custo variável baseado em tempo

O custo variável baseado em tempo depende:

- Da locomotiva que está fazendo o percurso;
- Do peso dos vagões que estão sendo tracionados;
- Da distância a ser percorrida entre o nó de origem e o de destino;
- Da hora em que a locomotiva parte do nó de origem;
- De eventuais necessidades de espera durante o seu percurso até que a linha seguinte esteja livre.
- Da duração do deslocamento entre cada par de linhas representadas por nós adjacentes do caminho de coleta e entrega.

Para computar o custo baseado em tempo de uma locomotiva e percorrer um caminho de coleta e entrega O_e , primeiro considera-se todos os caminhos possíveis do tipo $P'(v'_1, v'_2) = \{v'_1 = u_1, u_2, \dots, u_{n-1}, u_n = v'_2\} \subseteq V'$ em G' unindo v'_1 a v'_2 , sendo $n \geq 3$ para cada par de nós v'_1 e v'_2 em G' , associados aos respectivos nós adjacentes do caminho de coleta e entrega. Depois, usa-se a fórmula (11), a qual se baseia nos custos por unidade de tempo da locomotiva e em modo de transporte c_b , modo escoteira c_l e modo de espera c_s e os tempos correspondentes t_b , t_l e t_s em que a locomotiva e fica em cada um dos modos durante o percurso de v'_1 a v'_2 .

$$\Upsilon_i(v'_1, v'_2) = c_b t_b(v'_1, v'_2) + c_l t_l(v'_1, v'_2) + c_s t_s(v'_1, v'_2) \quad (11)$$

A partir deste ponto, segue-se o mesmo raciocínio usado para o cálculo do custo baseado em distância. A fórmula (9) toma a rota de v'_1 a v'_2 com menor duração e finalmente a fórmula (12) é usada para calcular o custo variável baseado em tempo para o caminho de coleta e entrega O_e .

$$\xi(O_e) = \sum_{z, z+1 \in O_e} \Upsilon(v'_z, v'_{z+1}) \quad (12)$$

Esta fórmula é muito parecida com a fórmula (10), sendo que neste caso c_d não é usado porque o seu papel já foi desempenhado pelas constantes c_b , c_l e c_s .

O tempo de espera em cada linha do caminho de coleta e entrega depende do exato momento em que o comboio chega àquela linha. A espera ocorre ou por causa da restrição imposta pela janela de tempo ou devido à linha adiante estar ocupada por outro comboio ou locomotiva. Esta variabilidade do custo dependente do tempo faz com que o valor do custo só possa ser obtido através de uma simulação da execução completa do caminho de coleta e entrega e impossibilita o cálculo antecipado do custo das rotas entre cada par de nós adjacentes do caminho de coleta e entrega, como ocorre no caso do custo baseado em distância. Estas características do custo baseado em tempo conferem ao mesmo o nome alternativo de *custo variável dinâmico*.

2.4.6. Formulação

Seja um conjunto

$$\Phi = \{O_e\}_{e \in E} \quad (13)$$

de caminhos de coleta e entrega, tais que:

$$\text{Dados } r_a, r_b \in R, \text{ se } r_a \text{ é predecessor de } r_b, \text{ então } T_{r_a}^- < T_{r_b}^+ \quad (14)$$

$$\bigcup_{e \in E} O_e = V \quad (15)$$

A solução para o problema de programação de operações das locomotivas de manobra (PPOLM) consiste em encontrar o conjunto Φ^* que minimiza a função objetivo:

$$C(\Phi^*) = \frac{c_1}{|E|} \theta(\Phi^*) + \frac{c_2}{d} \sum_{O_e \in \Phi^*} \xi(O_e) \quad (16)$$

onde $\theta(\Phi^*)$ é o número de caminhos de coleta e entrega em Φ^* com mais de dois elementos, c_1 e c_2 são constantes não negativas definidas pela equipe de planejamento de operações de pátio, $|E|$ é o tamanho da frota, ou seja, o número de locomotivas de manobras disponíveis no pátio, d é uma estimativa da distância máxima que a locomotiva de manobras mais rápida da frota conseguiria percorrer escoteira durante o horizonte de planejamento Δh e $\xi(O_e)$ é o custo variável do caminho de coleta e entrega de Φ^* , percorrido pela locomotiva e , e calculado utilizando-se a fórmula (10) ou a fórmula (12). Vale notar que o valor do horizonte de planejamento Δh é comum a todos os caminhos de coleta e entrega contidos em Φ^* .

Eventualmente, para uma dada locomotiva $e_k \in E$ pode ocorrer que $O_{e_k} = \{e_k^+, e_k^-\}$. Este caminho de coleta e entrega O_{e_k} , com apenas dois elementos, representa a possibilidade da locomotiva $e_k \in E$ não executar nenhuma manobra durante o horizonte de planejamento Δh . Este tipo de conjunto de Φ^* não é considerado no cálculo de $\theta(\Phi^*)$ e, portanto, $|E| \geq \theta(\Phi^*)$, ou seja, $\theta(\Phi^*)$ é o número de locomotivas efetivamente utilizadas na solução do PPOLM.

Os valores c_1 e c_2 na fórmula (16) expressam a importância relativa do custo fixo comparado ao custo variável na operação do pátio em estudo, tornando a fórmula da função objetivo uma soma ponderada. Um método para cálculo destes valores consiste em apurar o custo variável médio por unidade de tempo e

comparar com o custo fixo médio por locomotiva e por unidade de tempo e depois estabelecer a relação de proporção entre os dois valores considerando, adicionalmente, as metas do planejamento tático, como, por exemplo, diminuição do número de locomotivas de manobras no pátio. Independentemente do método utilizado para valores c_1 e c_2 , pode-se dizer que estes valores são arbitrariamente definidos pelo usuário e têm como objetivo definir a importância do objetivo de reduzir a frota de locomotivas utilizada no pátio comparada ao objetivo de fazer com que as manobras sejam executadas mais rapidamente e com menor consumo de combustível.

A fórmula (14) expressa a restrição de precedência do PPOLM. Esta restrição identifica uma diferença importante no critério de seleção das soluções viáveis entre o algoritmo CompetAnts e o algoritmo proposto neste trabalho.

A fórmula (15) faz com que todas as ordens de serviço sejam atendidas pela coleção Φ de caminhos de coleta e entrega da fórmula (13). O fato do valor de $C(\Phi^*)$ ser mínimo implica que não há ordem de serviço repetida em Φ^* .

A fórmula (16) expressa o objetivo de reduzir o custo total associado ao conjunto Φ^* . O primeiro termo da soma é proporcional ao custo fixo da solução e o segundo termo é proporcional ao custo variável

Os valores de $|E|$ e d foram usados na fórmula (16) para impedir que haja uma diferença considerável na magnitude dos dois elementos da soma. Estes valores fazem com que as constantes c_1 e c_2 funcionem conforme desejado, independente de fatores como a quantidade de veículos disponíveis no pátio, a duração do horizonte de planejamento e a unidade de medida de deslocamento utilizada.

O uso da fórmula do custo variável ou dinâmico para o cálculo de $\xi(O_e)$ depende da qualidade das informações disponíveis sobre o pátio e do tempo de processamento permitido para se apresentar a solução do problema. Se os tempos envolvidos na fórmula (11) podem ser computados com um nível de confiabilidade razoável, utiliza-se a fórmula (12) e obtém-se o custo variável dinâmico, caso contrário, utiliza-se a fórmula (10) e obtém-se o custo variável estático. Além disso, o uso da fórmula (12) implica em um maior tempo de processamento já que o custo variável estático pode ser calculado inicialmente e usado durante todo o

decorrer do processo enquanto o custo variável dinâmico requer o cálculo e atualização durante a construção da solução, já que varia em função do tempo.

Alguns profissionais da área questionam a importância de se considerar o custo fixo na função objetivo já que, depois de adquirida ou alugada, a locomotiva de manobras é normalmente alocada para trabalhar no pátio por um período equivalente a vários horizontes de planejamento. Sendo assim, a redução de custo obtida com a redução da frota não ocorre, normalmente, para o horizonte de planejamento considerado. De fato, este argumento é válido se o planejamento for considerado com uma perspectiva operacional, no entanto, a utilização recorrente de um número menor de locomotivas de manobras do que o disponível no pátio ao longo de sucessivos horizontes de planejamento é indício de que o planejamento tático deve considerar a redução da frota para aquele pátio. De qualquer forma, os valores de c_1 e c_2 na fórmula (16) dão ao usuário a flexibilidade de indicar, no contexto da operação do pátio considerado, a importância do custo fixo em relação ao custo variável, sendo possível, inclusive, atribuir o valor zero para c_1 indicando que o custo variável não tem nenhuma importância para o problema dado.

2.5. O PPOLM como um problema estático

Uma característica importante dos problemas de roteamento em geral é o modo como as requisições de transporte se tornam disponíveis. Um problema é classificado como estático quando todas as requisições de transporte são conhecidas antes da execução das rotas pelos veículos, e é classificado como dinâmico se algumas requisições são conhecidas inicialmente e outras requisições surgem em tempo real, depois que os veículos já iniciaram a execução das rotas, sendo necessária a modificação da rota de algum veículo para inclusão da nova requisição acrescentada. Outras diferenças entre o problema estático e o dinâmico, bem como uma revisão dos métodos e resultados mais importantes para solução dos dois tipos de problema pode ser encontrado em Mitrovic-Minic & Laporte (2003).

No caso real utilizado como referência para a modelagem desenvolvida neste trabalho, a maioria das demandas é produto de algum planejamento prévio e, portanto, são conhecidas antes de sua execução, de modo que não é necessário

planejar a execução das ordens de serviço imediatamente após tomar conhecimento das mesmas.

Havendo um planejamento prévio, é legítimo, portanto, assumir que em um dado momento t_0 , todas as ordens de serviço a serem atendidas, dentro de um horizonte de tempo definido previamente, são conhecidas (Lubbecke, 2001). Esta premissa motiva a utilização do horizonte de planejamento Δh de duração h , conforme definido no item 2.4.1, de modo que só são consideradas as ordens de serviço que podem ser executadas até o tempo $t_0 + h$. Vale notar que o valor de h define, implicitamente, o tamanho da instância do problema, já que, para uma frequência constante de execução de manobras, este valor limita o número de ordens de serviço a serem consideradas no planejamento.

Para tratar demandas emergenciais surgidas em um momento t ($t > t_0$, $t \in [h_i, h_j]$) durante a execução de uma seqüência planejada de manobras pode-se, simplesmente, registrar a situação do terminal naquele momento, juntamente com as manobras ainda não executadas e adicionar a estas as novas manobras emergenciais, submetendo este novo conjunto de informações para processamento. Esta é a estratégia adotada na maioria das vezes, na prática, para resolver problemas dinâmicos: O problema inicial é visto como uma seqüência de problemas estáticos (Savelsbergh & Sol, 1995).

Vale lembrar que ao modelar o PPOLM como estático estabelece-se uma restrição importante no tempo de execução do algoritmo que irá resolvê-lo: depois de implementado o algoritmo no computador, o tempo de entrada de dados mais o tempo de execução do programa resultante não pode ser maior do que a duração do horizonte de planejamento dividido pelo número de vezes que se pode desejar incluir novas ordens de serviço durante a execução do plano proposto.