

**CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM TRANSPORTE
FERROVIÁRIO DE CARGA
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
ACADEMIA MRS LOGÍSTICA S.A.**

MARCELO NEDER MACHADO

**PESQUISA OPERACIONAL APLICADA AO PROCESSO DE
PLANEJAMENTO E PROGRAMAÇÃO DA OPERAÇÃO DO
TRANSPORTE FERROVIÁRIO DE CARGA**

Rio de Janeiro

2006

**CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM TRANSPORTE FERROVIÁRIO DE CARGA
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
ACADEMIA MRS LOGÍSTICA S.A.**

MARCELO NEDER MACHADO

**PESQUISA OPERACIONAL APLICADA AO PROCESSO DE PLANEJAMENTO E
PROGRAMAÇÃO DA OPERAÇÃO DO TRANSPORTE FERROVIÁRIO DE CARGA**

Monografia apresentada no curso de Especialização em Transporte Ferroviário de Cargas do Instituto Militar de Engenharia, como requisito para a obtenção do certificado de conclusão de curso.

Orientador: Prof^a. Maria Cristina Fogliatti de Sinay – Ph.D

Tutor: José Geraldo Ferreira – M.Sc

Rio de Janeiro

2006

**CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM TRANSPORTE FERROVIÁRIO DE CARGA
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
ACADEMIA MRS LOGÍSTICA S.A.**

MARCELO NEDER MACHADO

**PESQUISA OPERACIONAL APLICADA AO PROCESSO DE PLANEJAMENTO E
PROGRAMAÇÃO DA OPERAÇÃO DO TRANSPORTE FERROVIÁRIO DE CARGA**

Monografia apresentada no curso de Especialização em Transporte Ferroviário de Cargas do Instituto Militar de Engenharia, como requisito para a obtenção do certificado de conclusão de curso.

Orientador: Prof^a. Maria Cristina Fogliatti de Sinay – Ph.D

Tutor: José Geraldo Ferreira – M.Sc

Aprovada em 05 de outubro de 2006 pela seguinte Banca Examinadora:

Prof^a. Maria Cristina Fogliatti de Sinay-Ph.D.do IME-Presidente

Manoel Mendes

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Militar de Engenharia (IME) e à empresa de transporte ferroviário de carga MRS Logística S.A. pela realização do curso e pela oportunidade de participar do mesmo.

À professora orientadora Maria Cristina Fogliatti de Sinay pela paciência, compreensão, disponibilidade, preocupação e comprometimento com a qualidade do desenvolvimento da monografia.

Ao tutor deste trabalho José Geraldo Ferreira pela atenção e apoio concedidos.

Aos meus pais e irmãos pelo incentivo e carinho.

A Otávia pela força, compreensão e amor.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	9
1.2 PRÁTICAS DE OPERAÇÃO DO TRANSPORTE FERROVIÁRIO DE CARGA	9
1.3 JUSTIFICATIVA.....	14
1.4 OBJETIVO	14
1.5 ORGANIZAÇÃO DA MONOGRAFIA	17
2. BLOCAGEM DE VAGÕES.....	18
2.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	18
2.2 MODELAGEM MATEMÁTICA	22
2.3 SOBRE A MODELAGEM DE BLOCAGEM DE VAGÕES.....	25
2.4 CONSIDERAÇÕES PARA A IMPLEMENTAÇÃO DA MODELAGEM	28
3. GRADE DE TRENS.....	30
3.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	30
3.2 MODELAGEM MATEMÁTICA	34
3.3 SOBRE A MODELAGEM DE GRADE DE TRENS.....	38
3.4 CONSIDERAÇÕES PARA A IMPLEMENTAÇÃO DA MODELAGEM	39
4. PROGRAMAÇÃO DE LOCOMOTIVAS.....	42
4.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	42
4.2 MODELAGEM MATEMÁTICA	45
4.3 SOBRE A MODELAGEM DE PROGRAMAÇÃO DE LOCOMOTIVAS.....	50
4.4 CONSIDERAÇÕES PARA A IMPLEMENTAÇÃO DA MODELAGEM	51
5. CONCLUSÃO.....	53
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55

Índice de figuras

Figura 1 - atividades de Planejamento e Programação da Operação	16
Figura 2 – rede de blocagem.....	20
Figura 3 – modelagem conceitual da blocagem de vagões.....	21
Figura 4 – modelagem matemática da atividade de blocagem de vagões	23
Figura 5 – esquema prático da atividade de blocagem de vagões.....	29
Figura 6 – representação dos elementos malha e rotas de trens e blocos	31
Figura 7 –modelagem conceitual da elaboração da grade de trens.....	33
Figura 8 – modelagem matemática da elaboração da grade de trens.....	36
Figura 9 – esquema prático da elaboração da grade de trens	40
Figura 10 – modelagem conceitual da programação de locomotivas.....	45
Figura 11 – exemplo de rede espaço/tempo para um tempo	48
Figura 12 – modelagem matemática da programação de locomotivas	49
Figura 13 – esquema prático da atividade de programação de locomotivas.....	52

RESUMO

A pesquisa operacional vem sendo bastante empregada nas atividades logísticas, proporcionando às empresas de diversos setores, expressivos ganhos de eficiência e reduções de custos. O setor ferroviário mundial, por diversos motivos, ainda pouco se beneficiou dos resultados proporcionados pela pesquisa operacional.

Atualmente as atividades de planejamento e programação da operação ferroviária, que geralmente envolvem milhões de reais, são realizadas na maioria das vezes de maneira empírica e manual, sem o auxílio de técnicas de simulação e de otimização.

Um dos principais motivos pelos quais as ferrovias terem se beneficiado pouco das técnicas e modelos da pesquisa operacional está na complexidade dos seus problemas que dificulta bastante as respectivas modelagens analíticas, assim como o desenvolvimento de sistemas de suporte a decisão, inviabilizando muitas das soluções propostas até hoje.

Acrescenta-se ainda no caso das ferrovias brasileiras um outro grande problema relacionado à baixa oferta de pesquisas, consultorias e profissionais especializados com experiência em soluções de pesquisa operacional no setor. Entretanto é cada vez menos difícil de encontrar casos de sucesso de aplicação de técnicas de pesquisa operacional em ferrovias, embora estes venham surgindo com uma frequência muito menor que no exterior.

Com o objetivo de contribuir com a pequena literatura nacional sobre o tema, a proposta desta monografia é pesquisar técnicas de pesquisa operacional aplicáveis à 3 das principais atividades do processo de planejamento e programação da operação ferroviária – blocagem de vagões, grade de trens e programação de locomotivas. A pesquisa inclui descrição, modelagem, revisões bibliográficas e considerações práticas sobre as atividades.

1. INTRODUÇÃO

Em um cenário onde o setor de transportes representa um dos principais pilares da economia mundial, o modal ferroviário se torna essencial devido ao seu potencial de transporte de carga eficiente e de baixo custo. Na busca por este potencial, as ferrovias passaram a oferecer grandes oportunidades e desafios para a aplicação de técnicas e ferramentas de pesquisa operacional.

Para oferecer um transporte de carga eficiente e a baixos custos, uma empresa ferroviária enfrenta vários problemas nos diferentes níveis de decisão (estratégico, tático e operacional) que são muitas vezes mais complexos que aqueles encontrados em outros modais. Isto se deve ao fato da ferrovia ser responsável por projetar, construir, operar e manter toda a infra-estrutura física relacionada a sua prestação de serviço. Isto envolve a via permanente por onde o material rodante (locomotivas e vagões) se desloca; pátios e terminais onde os trens são formados e vagões são classificados, carregados e descarregados; despacho de trens e controle de tráfego e sinalização responsáveis pela segurança do transporte.

A quantidade de decisões é grande, sendo geralmente relacionadas entre si e complexas por natureza. Estas podem ser decisões estratégicas, táticas e/ou operacionais. As primeiras podem envolver investimentos de capital, como expansões da malha, duplicações e aumentos de capacidade das linhas, construção, melhorias ou desativação de pátios e terminais, aquisição de novas locomotivas, vagões e demais equipamentos. As decisões táticas estão relacionadas aos planos de horários de formação e circulação de trens e locomotivas, além de planos de manutenção. Já as decisões no nível operacional envolvem o despacho de trens, operações em pátios e terminais, circulação de vagões vazios, programação de locomotivas e equipagens, dentre outros aspectos.

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As atividades do processo de planejamento e programação dos problemas oriundos das ferrovias são em geral de grande complexidade e escala. Com o aumento da competitividade e da exigência dos clientes, as ferrovias são desafiadas a melhorar o planejamento e programação de seus recursos para proporcionarem serviços de transporte mais rápidos e confiáveis a preços competitivos. São necessárias inovações imediatas para as ferrovias visando não somente a conquista de novos clientes, mas também para manter seus clientes atuais, evitando perdê-los para seus concorrentes em função de baixos níveis de serviço envolvendo alta variabilidade em seus tempos de trânsito e de custos crescentes. Evidentemente, mesmo em um cenário de alta competitividade, as ferrovias continuam buscando um aumento de seu mercado e para isso precisam urgentemente de ferramentas de planejamento e programação para melhorar sua eficiência e aumentar lucratividade.

As pesquisas que abordam a otimização de problemas ferroviários têm crescido lentamente. A maioria das contribuições encontradas envolve modelos simplificados ou não é validada em uma ferrovia real. Grande parte dos modelos desenvolvidos falham ao incorporar as características reais das aplicações práticas. (CORDEAU ET AL.,1998)

A intensa competição e o contínuo desenvolvimento dos computadores nas últimas décadas, têm motivado a utilização de técnicas de otimização em vários níveis das empresas ferroviárias. Acrescenta-se a isso o fato de que os modelos recém propostos tendem a incorporar o maior nível de realismo e conseqüentemente gerar um maior interesse por pesquisa operacional nas ferrovias.

1.2 PRÁTICAS DE OPERAÇÃO DO TRANSPORTE FERROVIÁRIO DE CARGA

Todas as atividades da operação do transporte ferroviário de carga, sejam elas de planejamento, programação ou execução, são baseadas em um dos dois seguintes tipos de prática: operação focada na programação ou focada na lotação. (IRELAND ET AL., 2004)

Historicamente a operação ferroviária de empresas em todo o mundo é realizada segundo a prática focada na lotação. Tal prática está fundamentada na premissa de que ao reduzir o número de trens em circulação a partir da criação de composições de trens mais longos, um número menor de trens é colocado em circulação e conseqüentemente os custos são reduzidos. Em resumo, a prática focada na lotação permite que um trem seja atrasado até que ele tenha carga suficiente para atingir sua máxima capacidade em toneladas transportadas. Assim, mesmo se um plano de operações determinar a circulação diária de um determinado trem, se não houver carga suficiente para atingir a lotação mínima estabelecida, o trem é atrasado até que esteja completo, podendo ser até suprimido. Tais cancelamentos e atrasos geram baixa previsibilidade nos planos e programações, aumentando os custos.

A prática focada na lotação apresenta os seguintes problemas:

- Baixa previsibilidade nos horários de transporte para os clientes;
- Eventualmente, ao contrário do esperado, o custo de equipagem e locomotiva é aumentado devido à demanda extra e à má utilização destes recursos em função da baixa previsibilidade dos horários e locais para onde/quando eles deve ser alocados;
- Esta baixa previsibilidade atrapalha também a programação das atividades dos pátios;
- A quantidade de vagões necessária também aumenta devido aos maiores tempos de trânsito e falhas na programação.

Em 2003 a ferrovia norte-americana *Canadian Pacific Railways* se tornou a vencedora do prêmio *Franz Edelman Award for Achievement in Operations Research and Management Sciences* com o projeto *Perfecting the Scheduled*

Railway: Model-driven Operating Development Plan (Aperfeiçoando a Ferrovia Programada: Desenvolvimento de um Plano de Operação Baseado em Modelos). Neste projeto foram desenvolvidas ferramentas de suporte à decisão baseadas em pesquisa operacional e utilizadas para criar um plano de operação ferroviária focado em horários, resultando em uma redução de custos da ordem de US\$ 170 milhões entre 1999 e 2000. (IRELAND ET AL., 2004)

É importante explicar também o significado de uma ferrovia programada. Esta é uma denominação sugestiva para o novo modelo de operação que vem desafiando o paradigma atual adotado no transporte ferroviário de carga, particularmente devido ao aumento de competitividade e exigência dos clientes. A ferrovia programada da Canadian Pacific apresenta este novo modelo de operação que se baseia na prática focada na programação. Esta prática contrasta com a política tradicional das ferrovias de despachar os trens com foco na lotação ao operar os trens com alta aderência a um plano e programação estabelecidos. Isto gera um benefício imediato em função do aumento do nível de serviço oferecido aos clientes e da utilização dos recursos.

Porém há um receio quanto a prática focada na programação devido à impressão de que ao fazer circular todos os trens previstos em um plano, poderia haver um excessivo número de trens em circulação, aumentando os custos drasticamente. Para contornar este problema, torna-se indispensável que o plano e/ou programa de operações tenham que ser altamente coerentes com a demanda e que estes sejam atualizados regularmente a fim de garantir que alterações na demanda sejam refletidas de maneira consistente na operação.

Muitas ferrovias que ousaram mudar para a prática focada na programação perderam o foco ao não conseguir implementá-la e acabaram retornando à prática baseada em lotação. Esta reação é comum e está baseada na crença de que com foco em lotação a operação se torna menos onerosa.

Até recentemente, a prática focada na programação vinha sendo evitada pelas ferrovias por diversos motivos, como:

- Alguns trens circulam com uma pequena quantidade de vagões para o cumprimento do plano;
- É necessário ter uma boa previsibilidade de demandas;
- Algoritmos e ferramentas de suporte à decisão se tornam indispensáveis no planejamento e programação: impossível conduzir tal prática baseando-se apenas no empirismo e de forma manual;
- Demanda por alta qualidade da informação, necessitando atualizações ou reforma nos bancos de dados das empresas, dentre outras.

Em geral o transporte ferroviário de carga pode ser categorizado segundo o tipo de mercadoria transportada: carga pesada (*heavy-haul*), carga geral e carga expressa.

O transporte expresso ou de carga expressa implica na movimentação de contêineres e carrocerias de caminhões especialmente adaptadas para serem transportadas por vagões. O planejamento e programação deste tipo de transporte é realizado segundo a necessidade dos clientes que apresentam uma baixa tolerância para variações nos tempos de trânsito e horários combinados, o que necessita de alta prioridade para na circulação destes trens. Isto significa que quando um trem expresso compete recursos com trens *heavy-haul* ou de carga geral, ele recebe prioridade de trânsito. Esta baixa tolerância está relacionada à intermodalidade do tipo de carga o que demanda alto nível de serviço e previsibilidade em cada modal para que os horários de toda a cadeia de transporte até o destino final no horário não sejam comprometidos.

O transporte de carga geral tem foco na movimentação de pequenos lotes de vagões de diversas origens para diversos destinos. Somente através de uma combinação destes lotes com outros é que seria possível atingir um tamanho de composição econômico. Este transporte é direcionado pela necessidade de redução e balanceamento entre os tempos dos diversos terminais, além da maximização do tamanho dos trens. Por se tratar de um serviço mais flexível do que o expresso quanto às variabilidades de tempos e rotas, este tipo de transporte apresenta muitas

oportunidades para a gestão dos respectivos vagões (roteamento e movimentação/classificação) e para minimizar os custos operacionais sem perder o foco no elevado nível de serviço.

No transporte heavy-haul (trens unitários de carga pesada) o serviço é caracterizado por trens inteiros sendo movimentados de um único ponto de carga para um ponto de descarga sem qualquer necessidade de desmembramentos da composição ao longo de seu percurso, transportando geralmente um único tipo de produto para um único cliente. O transporte heavy-haul é focado na minimização dos custos de operação e maximização da utilização das locomotivas em trens programados para chegarem aos seus destinos satisfazendo a restrições de horário impostas por demandas de descarga nos portos ou nas indústrias.

A escolha pela prática de operação ferroviária ideal a ser adotada por uma ferrovia, deve indispensavelmente considerar os diferentes tipos de transporte comentados acima. A dificuldade relacionada a esta decisão se encontra muitas vezes no fato de uma mesma ferrovia transportar os 3 diferentes tipos de carga, necessitando de abordagens diferentes que geralmente se conflitam.

Ainda há muitas controvérsias sobre as práticas, embora a focada na programação venha ganhando cada vez mais espaço nas ferrovias, proporcionando planos de operação cada vez mais eficientes e eficazes. Porém deve-se ressaltar que as mudanças com esta prática são enormes, pois despachar um maior número de trens e com menor quantidade de vagões com mais restrições quanto a variabilidade de tempos de trânsito pode resultar em mais trens sendo simultaneamente formados, despachados e movimentados; a malha ferroviária se torna mais congestionada, gerando potenciais atrasos; necessita-se de um maior número de locomotivas para tracionar mais trens; mais vagões vazios para serem deslocados mais rápido e em blocos menores para disponibilizá-los em seus terminais de carga; e conseqüentemente gera um risco de ter o custo total do transporte aumentado.

Para implementar com sucesso todas estas mudanças e lidar com o desafiante nível de sincronismo exigido pela prática focada na programação, as empresas ferroviárias necessitam de ferramentas eficazes para auxiliar nas atividades do processo de planejamento e programação.

1.3 JUSTIFICATIVA

Dada a premissa de garantia de previsibilidade inerente à prática focada na programação, há a necessidade de se realizar um planejamento e programação de operação ferroviária confiável e com visão holística a fim de garantir uma boa aderência do planejado/programado ao realizado e reduzir os custos de operação. Entretanto tal prática apresenta algumas dificuldades de aplicação por envolver:

- Problemas de decisão de natureza estocástica (Aleatoriedade da Demanda);
- Complexidade matemática (requer sofisticadas ferramentas e algoritmos para planejamento e programação);
- Pouca confiabilidade nos dados disponíveis.

Apesar das atividades de planejamento e programação já serem executadas em empresas ferroviárias, estas na maioria das vezes são realizadas manualmente ou em planilhas eletrônicas, embasadas em empirismo e de maneira desintegrada e pouco flexível.

Devido às aleatoriedades na demanda ferroviária, as empresas geralmente apresentam uma baixa aderência entre planejado e o realizado, aumentando os custos de operação, o que se traduz em um efeito contrário ao objetivado pela prática.

1.4 OBJETIVO

O objetivo desta monografia é o de apresentar 3 dos principais problemas/atividades do processo de planejamento e programação da operação do transporte ferroviário de carga em que a pesquisa operacional pode ser aplicada. A figura 1 apresenta as principais atividades do processo, sendo aquelas de linhas contínuas as 3 atividades abordadas na monografia.

Ao longo da monografia cada atividade é descrita detalhadamente abordando a importância desta para a operação ferroviária, as principais particularidades, os objetivos e as restrições que tornam suas soluções bastante desafiantes do ponto de vista da pesquisa operacional e de quem as executa nas empresas ferroviárias.

Em seguida é apresentado um exemplo de modelagem matemática de cada atividade, baseada em um recente trabalho dos autores AHUJA ET AL (2005). As modelagens propostas por estes autores foram escolhidas, por serem uma das poucas aplicações de pesquisa operacional às atividades em questão, que vêm sendo utilizadas com sucesso em ferrovias de grande porte e que estão publicadas na literatura.

Posteriormente é feita uma revisão bibliográfica de técnicas de pesquisa operacional aplicadas aos problemas das atividades na tentativa de solucioná-los. Ao final da apresentação de cada atividade são feitas algumas considerações práticas para obtenção de êxito no desenvolvimento de suas soluções. Na conclusão da monografia são apresentados comentários finais a respeito do trabalho realizado.

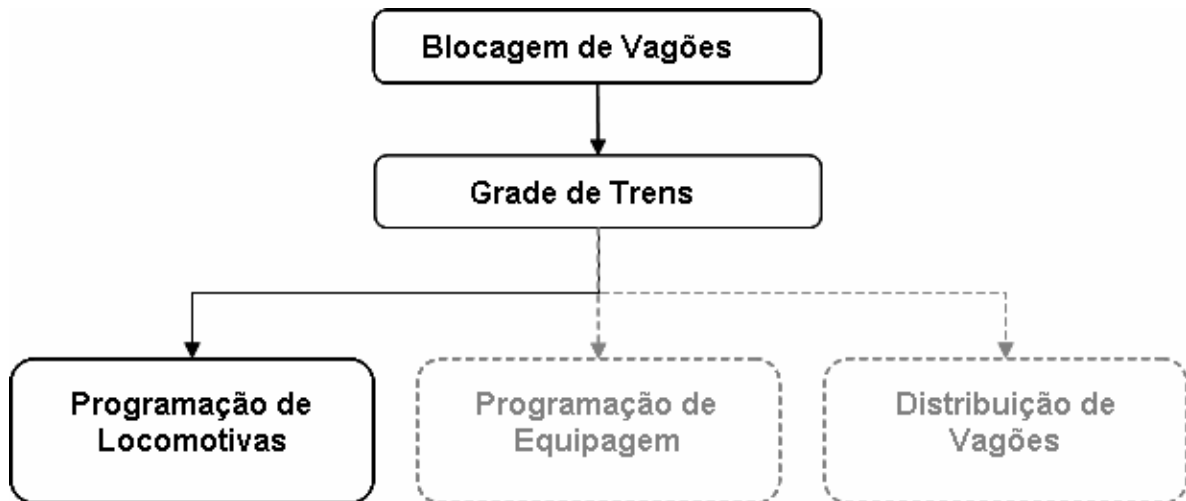


Figura 1 - atividades de Planejamento e Programação da Operação

A primeira atividade a ser trabalhada é a blocagem de vagões que surge a partir do contexto de que as ferrovias lidam com milhões de carregamentos de diversas origens para diversos destinos. Um carregamento típico é composto por um conjunto de vagões que apresentam origens e destinos comuns. Para reduzir a movimentação de carregamentos individuais ao longo da viagem, os vagões são classificados (ou agrupados) para criar um bloco. O problema de blocagem nas ferrovias consiste em identificar um plano de blocagem para todos os carregamentos ao longo da malha para que o custo total de movimentação e transporte seja minimizado. Um plano de blocagem consiste em determinar quais blocos de vagões e suas respectivas rotas, devem ser criados para suportar o atendimento a demanda por transporte ferroviário de carga.

A seguir trata-se do problema do desenvolvimento de uma grade de trens que consiste em determinar as rotas, freqüências e os dias de circulação de cada trem, visando a minimização do custo de transporte de blocos de vagões de suas origens para seus destinos.

Dando prosseguimento à monografia, apresenta-se o problema de programação de locomotivas que consiste em determinar de maneira eficaz quais locomotivas dentre os diversos tipos devem ser acopladas aos trens programados a fim de proporcionarem a estes a tração necessária, vencendo diversas restrições como tamanho de frota e capacidade de tração.

Ao descrever as características destas atividades, pesquisar trabalhos de pesquisa operacional aplicados e apresentar considerações práticas, o objetivo desta monografia é atingido, contribuindo com a pequena bibliografia nacional existente sobre o tema.

1.5 ORGANIZAÇÃO DA MONOGRAFIA

Esta monografia compõe-se de 5 capítulos. No primeiro capítulo são apresentados o objetivo do trabalho, sua justificativa e importância do tema. Do capítulo 2 ao 4 são apresentadas cada um dos 3 problemas/atividades de planejamento e programação da operação de transportes ferroviários de carga citadas no objetivo (item 1.4.). Em seguida, no capítulo 5 é apresentada uma conclusão sucinta do trabalho.

2. BLOCAGEM DE VAGÕES

2.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Para melhor compreensão deste capítulo faz-se necessário, primeiramente, definir o que vem a ser um bloco de vagões. Este termo refere-se a um conjunto de vagões que são movimentados juntos na malha por um ou mais trens, apresentando mesma origem ou local onde são anexados, para um mesmo destino ou local onde são desanexados. O agrupamento dos vagões é realizado pela atividade de blocagem.

O problema de blocagem consiste na consolidação de um grande número de vagões em blocos, visando a redução de suas movimentações individuais ao longo de suas rotas desde suas origens até seus destinos. Problemas similares a este são encontrados em diversos setores de transporte, como distribuidoras de encomendas, empresas de serviços postais, transportadoras e companhias aéreas.

Desta maneira o objetivo deste processo de classificação/consolidação está na redução da movimentação individual das demandas (vagões, cartas, etc). Este é um processo comum em situações em que há a necessidade de deslocar inúmeros itens ao longo de uma rede entre vários pares de nós origem-destino (O/D).

Nas ferrovias o problema de consolidação surge principalmente no tipo de transporte carga geral e expresso. O tipo carga geral envolve a movimentação de pequenos lotes de vagões de diferentes clientes com origens e destinos diversos. O transporte tipo expresso lida com a movimentação entre diferentes pares O/D de contêineres e carrocerias de caminhões especialmente adaptadas para serem transportadas por vagões. Ambos os tipos são limitados pela exigência dos clientes por tempos de trânsito curtos e baixa tolerância para atrasos e variabilidades nos tempos de circulação. Nestes serviços porém, não há carga em um mesmo par O/D

suficiente para formar um trem unitário – um trem inteiro deslocando-se em uma rota única de um ponto de origem para um ponto de destino sem paradas para receber ou deixar outros vagões, transportando geralmente um único tipo de carga ou vagão para um mesmo cliente.

O número de vagões movimentados em uma ferrovia que presta estes tipos de serviço é geralmente da ordem de milhares. Considerando-se que é física e economicamente inviável movimentar cada vagão separadamente, as ferrovias consolidam seus vagões em blocos através dos pátios de manobra e terminais, fazem um roteamento destes ao longo da malha a serem deslocados em trens, buscando realizar um transporte eficiente e eficaz das origens para os destinos. Para realizar esta consolidação, os vagões podem às vezes viajar um percurso maior do que aqueles referentes ao caminho mais curto entre suas origens e destinos, assim como podem parar em pátios intermediários e serem acoplados a outros trens diferentes do inicial (conhecido como conexão de blocos de vagões).

Um bloco de vagões pode ser composto por diversos vagões agrupados que se originaram ou foram deixados no pátio/terminal por algum trem. Cada bloco é caracterizado por um par de origem-destino que pode ser diferente dos pares O/D dos vagões que o compõem. Uma vez que o vagão é consolidado em um bloco, este não será classificado novamente até que o bloco atinja seu destino. Assim os blocos passam a atuar como arcos em uma representação de rede de origens e destinos. O problema de blocagem ferroviária portanto, consiste em construir uma rede de blocagem na qual todos os vagões são otimamente roteados, minimizando o custo de transporte. Este é calculado através da soma ponderada dos custos de cada deslocamento de vagão pela malha, mais os custos de classificação dos vagões nos pátios e terminais.

A figura 02 mostra uma rede de blocagem onde 3 tipos de nós são identificados: origens (nós de 1 a 4), onde os vagões V1, V2, V3 e V4 se originam; pátios (nós de 5 a 8), onde os vagões podem ser consolidados ou classificados; e destinos (nós de 9 a 12), onde os vagões V1, V2, V3 e V4 são encontram seus destinos finais. Cada

arco na rede representa um bloco com a origem na parte traseira da seta e destino na parte frontal.

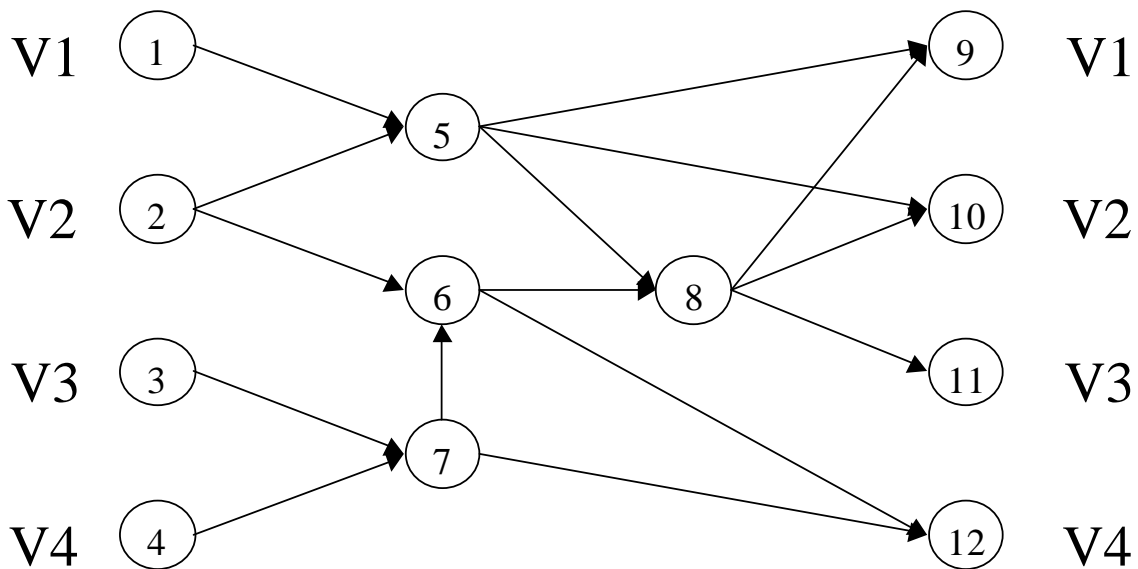


Figura 2 – rede de blocagem

Por exemplo, o arco(1,5) significa que um bloco será formado do pátio 1 para o pátio 5. Todos os vagões se deslocarão de suas origens para seus destinos através da rede de blocagem. Por exemplo um vagão V1, que tem origem em 1 e destino em 9 pode ser roteado em dois caminhos diferentes constituído de seqüências de blocos: 1-5-9 e 1-5-8-9. O primeiro caminho percorre os arcos (1,5) e (5,9) e envolve uma classificação intermediária no nó 5. Já o segundo caminho percorre os arcos (1,5), (5,8) e (8,9) e envolve duas classificações intermediárias nos nós 5 e 8. Uma alternativa seria criar o bloco (10,9) ligando o nó 10 ao 9. De maneira similar, um bloco (1,8) ligando o nó 1 ao 8, evitando a parada intermediária para classificação no nó 5, mesmo se este se encontrar fisicamente ao longo do caminho de 1 pra 8ema de otimização de rede. Deve-se ressaltar que na prática os pátios podem atuar tanto como origens quanto destinos ao mesmo tempo e os nós podem tanto receber quanto enviar vagões.

A partir do exemplo acima é possível compreender melhor o desafio da atividade de blocagem de vagões. O desafio desta atividade consiste em tomar dois diferentes tipos de decisão:

- Quais blocos devem ser criados?;
- Quais as rotas dos blocos criados ao longo da malha?.

Ao tomar estas decisões é preciso ter como objetivo a minimização da soma dos dois principais custos envolvidos no problema:

- Custo total do fluxo de vagões na malha;
- Custo de todas classificações (agrupamentos) de vagões nos pátios;

Para solucionar a atividade de blocagem de vagões, devem ser consideradas as seguintes restrições:

- A movimentação de todos os vagões de um mesmo carregamento deve ser realizada sempre em conjunto, não podendo separá-los em momento algum;
- Todo carregamento deve ser movimentado apenas em arcos existentes;
- O número de vagões movimentados tem que ser menor ou igual à capacidade de movimentação do arco;
- O número de blocos formados em um pátio (nó) está limitado pelo número de linhas do mesmo;
- O número de vagões em cada linha do pátio está limitado a quantidade de vagões que a linha comporta (referente ao tamanho máximo do bloco).

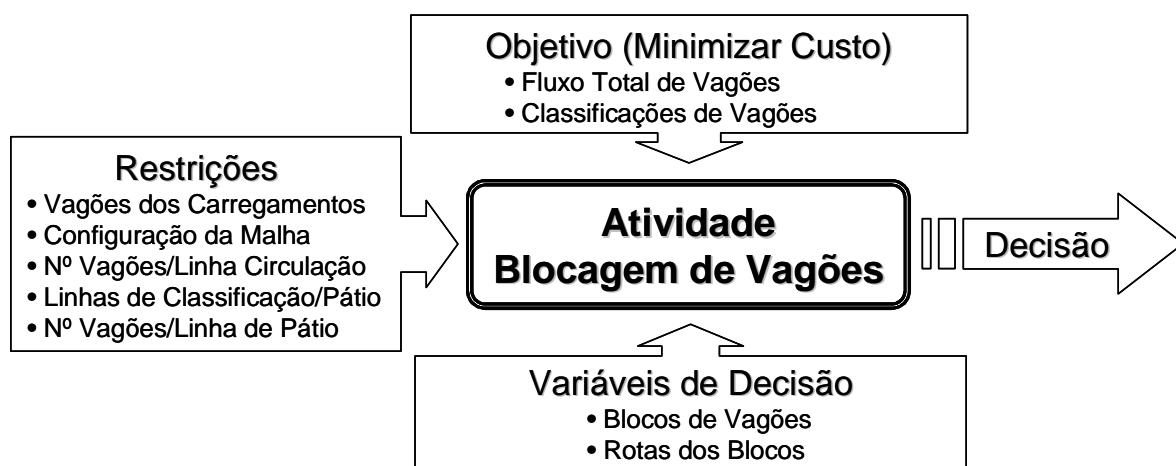


Figura 3 – modelagem conceitual da blocagem de vagões

Na figura 3 acima estão apresentadas as variáveis de decisão, função objetivo e restrições típicas de um problema de elaboração da blocagem de vagões.

2.2 MODELAGEM MATEMÁTICA

Conforme o objetivo desta monografia, para resolver este problema, será apresentada a modelagem desenvolvida por AHUJA ET AL (2005). Segundo o autor o problema de blocagem de vagões pode ser modelado matematicamente como um problema de alocação de fluxo em rede multiproduto. Neste problema buscam-se criar arcos de blocos e decidir qual carregamento k de um conjunto K , contendo v_k vagões com a mesma origem $o(k)$ e destino $d(k)$, deverá ser agrupado a quais outros carregamentos (formando blocos) e movimentá-los na rede de blocos por diferentes trens, através de pátios de classificação onde as operações de blocagem são realizadas.

Seja $G = (N, A)$ como a rede de blocos, sendo N o conjunto de todos os nós representando os pátios onde os carregamentos se originam, terminam ou trocam de trens e sendo A o conjunto de todos os arcos de blocos potenciais em $N \times N$, por exemplo $(i,j) \in A$ se um bloco pode ser construído do nó i para o nó j . O custo de classificação de um vagão no nó i é h_i e o custo unitário de movimentação de cada vagão pelo arco (i,j) é m_{ij} .

A atividade de blocagem requer que a movimentação de todos os v_k vagões de um mesmo carregamento $k \in K$ seja realizada em um único caminho da rede de blocos. Para realizar uma solução de blocagem eficiente é necessário restringir o número de blocos formados no nó $i \in N$ (dado por b_i), assim como restringir o número máximo de vagões que um nó comporta (dado por d_i), a fim de respeitar as capacidades físicas dos pátios em comportar vagões. O número máximo de vagões que pode ser movimentado no arco de bloco $(i,j) \in A$ é dado por u_{ij} . Estas restrições que se referem à capacidade dos pátios podem ser estimadas pela configuração geométrica dos mesmos.

O problema da atividade de blocagem consiste em dois grandes grupos de variáveis de decisão:

- variáveis de projeto $y_{ij} \in \{0,1\}$, relativas à decisão de quais arcos de blocos $(i,j) \in A$ devem ser criados: referente à criação dos blocos;
- variáveis de fluxo x_{ij}^k , referentes à decisão de como os vagões serão movimentados pela rede de blocos. Em outras palavras $x_{ij}^k = v_k$ se o carregamento k é movimentado no arco $(i,j) \in A$; caso contrário $x_{ij}^k = 0$. Referente às rotas dos blocos.

As variáveis de fluxo são dependentes das variáveis de projeto uma vez que os vagões só podem ser movimentados onde há arcos de blocos. Os conjuntos de arcos de A chegando e saindo do nó i são dados por $I(i)$ e $O(i)$, respectivamente. O problema consiste em encontrar y_{ij} e x_{ij}^k de forma a satisfazer ao modelo abaixo (figura 4):

Minimizar a função-objetivo:

$$\sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} m_{ij} x_{ij}^k + \sum_{i \in N} \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in O(i)} h_i x_{ij}^k \quad (1)$$

Sujeita às seguintes restrições:

$$\sum_{(i,j) \in O(i)} x_{ij}^k - \sum_{(i,j) \in I(i)} x_{ij}^k = \begin{cases} v_k & \text{if } i = o(k) \\ 0 & \text{if } i \neq o(k) \text{ or } d(k), \\ -v_k & \text{if } i = d(k) \end{cases} \quad \forall k \in K \quad (2)$$

$$\sum_{k \in K} x_{ij}^k \leq u_{ij} y_{ij}, \quad \forall (i,j) \in A \quad (3)$$

$$\sum_{(i,j) \in O(i)} y_{ij} \leq b_i, \quad \forall i \in N \quad (4)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in I(i)} y_{ij} \leq d_i, \quad \forall i \in N \quad (5)$$

$$y_{ij} \in \{0,1\}, \quad \forall (i,j) \in A \quad (6)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, v_k\}, \quad \forall (i,j) \in A, \forall k \in K \quad (7)$$

Figura 4 – modelagem matemática da atividade de blocagem de vagões

Nesta formulação proposta por AHUJA ET AL (2005), a função-objetivo (1) é dependente da soma de duas parcelas:

- $\sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} m_{ij} x_{ij}^k$: somatório dos custos de movimentação de todos os vagões por toda a rede de blocos;
- $\sum_{i \in N} \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in O(i)} h_i x_{ij}^k$: somatório dos custos de todos os vagões classificados nos pátios/nós.

A restrição (2) juntamente com a (7) garantem que a movimentação de todos os vagões de um mesmo carregamento seja realizada em um único caminho da rede de blocos. A restrição (3) assegura que um carregamento seja movimentado apenas em arcos existentes e que o número de vagões movimentados seja menor ou igual à capacidade de movimentação do arco. As inequações (4) e (5) restringem o número de blocos formados nos nós e o número de vagões que um nó pode comportar, respectivamente. A restrição (6) é utilizada para considerar as variáveis de projeto como binárias e inteira. A restrição (7) limita as variáveis de fluxo para assumirem apenas os valores zero ou o número de vagões do respectivo carregamento.

O problema de blocagem de vagões é considerada um problema de otimização de redes de grande dimensão. Por exemplo, concessionária ferroviária brasileira, MRS Logística S.A., em seu transporte de carga geral e expresso conta com 89 origens, 77 destinos e 192 terminais/pátios intermediários. A empresa movimenta cerca de 30.000 carregamentos por mês (cada um contendo de 1 a 50 vagões). No geral podem ser criados blocos de qualquer origem para qualquer pátio, de qualquer pátio para qualquer outro pátio e de qualquer pátio ou origem para qualquer destino. Isto resulta em um total de 89×192 (origens para pátios) + 192×192 (pátios para pátios) + 192×77 (pátios para destinos) + 89×77 (origens para destinos) = 75.589 blocos potenciais que podem ser criados. Como há cerca de 30.000 carregamentos e 75.589 blocos potenciais, o número de variáveis de decisão de roteamento destes carregamentos é da ordem de milhões. Assim uma atividade de blocagem típica na

MRS envolve dezenas de milhares de variáveis de projeto (referentes à decisão de construir ou não um arco de blocos) e milhões de variáveis de fluxo (referentes à decisão de roteamento dos carregamentos pela rede de blocos).

2.3 SOBRE A MODELAGEM DE BLOCAGEM DE VAGÕES

Algumas tentativas já foram realizadas com o intuito de modelar e desenvolver algoritmos de otimização para auxiliar a atividade de blocagem de vagões (BODIN ET AL., 1980). Porém a maioria dos problemas apresentava complexidade quanto ao tamanho da rede envolvida o que inviabilizava a solução. Assim a maioria das modelagens encontradas na literatura sobre o caso não apresentou respostas de qualidade ou não satisfaz algumas considerações práticas necessárias para a implementação da solução. A seguir são apresentadas algumas destas tentativas.

Um dos primeiros modelos de blocagem de vagões pertence a BODIN ET AL. (1980), que sugeriu programação linear inteira para a formulação do problema. O modelo, que é um problema de fluxo em rede multiproduto com algumas restrições adicionais, determina as estratégias de blocagem ótimas simultaneamente para todos pátios de classificação.

Além das equações de fluxo, que constituem a principal parte do modelo, a capacidade do pátio e a formação de pátios também foram consideradas. O modelo proposto considerou limites superiores para o número de vagões a serem classificados e para o número de blocos que podem ser formados em um pátio. Esta última restrição ocorre devido ao número limitado de linhas em um pátio destinadas à formação de blocos. O tamanho dos blocos formados também foi considerado.

Para finalizar foram utilizadas restrições de fechamento que serviram para garantir que todos os vagões do pátio i destinados para o pátio j fossem enviados para o próximo pátio de classificação. A função objetivo buscou minimizar a soma dos custos de deslocamento e classificação de vagões. Com algumas intervenções

manuais os autores resolveram o problema com 33 pátios de classificação e encontraram uma solução motivadora para o desenvolvimento de mais estudos.

O trabalho de BODIN ET AL. (1980), serviu de base para a modelagem apresentada por AHUJA ET AL (2005). Porém BODIN ET AL. (1980) não obteve sucesso na solução em problemas de escala real.

Uma proposta de solução para um problema definido em uma rede de escala maior que o primeiro estudo foi feita por ASSAD (1983). Os vagões são recebidos por um pátio de maneira arbitrária e estes têm que ser separados ao longo do trajeto para permitir que cada pátio na seqüência obtenha a parcela de fluxo a ele destinado.

Diversas estratégias de classificação podem ser utilizadas para distribuir os fluxos entre os pátios. Para o caso especial em que os pátios têm uma quantidade de fluxo igual, o autor mostrou que a busca por uma solução que minimize o trabalho total para cada pátio obter seu fluxo pode ser restrita a estratégias, onde o fluxo para o pátio i seja reservado somente após os tipos de fluxos anteriores terem sido classificados. Para os casos em que esta premissa não pode ser considerada, uma formulação do problema através de programação dinâmica é capaz de gerar uma solução eficiente.

Também foi discutido pelo autor extensões para o caso em que todos os pátios são vistos como uma fonte potencial de fluxo. Para este caso foi demonstrado que a programação matemática também funciona. Este trabalho também não obteve grandes sucessos ao ser aplicado a problemas reais mais complexos.

Uma heurística para o problema elaborada por VAN DYKE (1986, 1988) foi testada e implementada em ferrovias de grande porte. O sistema é baseado em um procedimento iterativo que busca melhorar um plano de blocagem existente através da solução de uma série de problemas de caminho mínimo em uma rede cujos arcos são os blocos disponíveis.

Segundo essa heurística, um fluxo é associado a um bloco se este bloco está no caminho de menor custo da origem do fluxo até seu destino. O custo de associar um fluxo a um bloco depende de uma série de fatores como prioridade do bloco, prioridade do fluxo, linha física utilizada no caminho e características dos pátios de origem e destino do bloco.

A solução deste problema determina a distribuição de menor custo de fluxos para um conjunto de blocos. Um procedimento iterativo permite ao usuário eliminar ou acrescentar blocos à solução. As restrições de capacidade dos blocos também são consideradas na heurística. A característica de interação da solução de um algoritmo com o usuário também foi utilizada por AHUJA ET AL (2005).

Recentemente um algoritmo de geração coluna foi apresentado por NEWTON (1996), que estudou um problema de projeto de rede mais geral. Este problema consiste em minimizar o custo de movimentar um conjunto de vagões em uma rede e satisfazer restrições de orçamento quando contabilizados os custos fixos dos arcos utilizados.

O problema de bloqueio das ferrovias é transformado neste problema geral ao considerar os nós como pátios de classificação e os arcos como blocos potenciais a serem criados. O custo fixo de se deslocar um bloco entre dois pátios de classificação está relacionado à utilização da linha do pátio de origem. Assim há uma restrição individual de orçamento para cada pátio baseada na quantidade de linhas disponíveis. Restrições de fluxo também são utilizadas para restringir o número de vagões que são classificados nas linhas dos pátios. A função objetivo consiste em minimizar a movimentação de todos os vagões.

Fluxos de trens expressos e de carga geral são considerados simultaneamente utilizando restrições de prioridade que limitam o número de blocos utilizados na entrega de cada vagão. O problema é solucionado utilizando um procedimento *branch-and-bound* que considera limites em cada nó computado através da decomposição de Dantzing-Wolfe.

Apesar de todos os avanços na área de otimização, a literatura disponível apresenta poucas modelagens viáveis para tratar das atividades de blocagem de vagões com toda a dimensão e complexidade inerentes à implementação prática. (AHUJA ET AL, 2004)

2.4 CONSIDERAÇÕES PARA A IMPLEMENTAÇÃO DA MODELAGEM

As soluções propostas para a atividade de blocagem de vagões devem ser capazes de lidar com diversas características e restrições operacionais que podem surgir ao realizá-la devido à acordos com os clientes, leis e regras de transporte que se aplicam em casos específicos, questões históricas, etc.

Tais restrições e características incluem dentre outras:

- Blocos que devem ser criados – devido à regras da empresa ou acordos comerciais;
- Blocos que não devem ser criados – há blocos que podem ser indesejáveis em função de questões de equipagem, locomotivas ou mesmo geográficas;
- Alguns carregamentos devem ser alocados em blocos pré-especificados;
- Proibição de criação de blocos pequenos – algumas ferrovias podem ter como regra que pequenos blocos não devem viajar longas distâncias pois isto envolve um custo e o faturamento destes blocos pode não justificar o custo;
- Preferência a certos blocos – visando não alterar o plano de blocagem drasticamente de um período para o outro em função de variações nas demandas;
- Geração de um plano de blocagem coerente com a grade de trens – por exemplo pode-se determinar que um bloco não pode viajar em mais que um certo número de trens diferentes, dado que a troca de trens envolve custos e atrasos no transporte;

- Permissão de alterações incrementais em uma dada solução de blocagem – a empresa pode desejar fazer alterações menores no plano de blocagem devido aos riscos associados menores e mais fáceis de se implementar quando comparados a mudanças drásticas;
- Otimização de apenas parte do plano de blocagem – que podem ser apenas alguns nós ou parte de um trecho da malha ferroviária.

Um esquema do problema que leva em conta as considerações acima está apresentado na figura 5 abaixo.

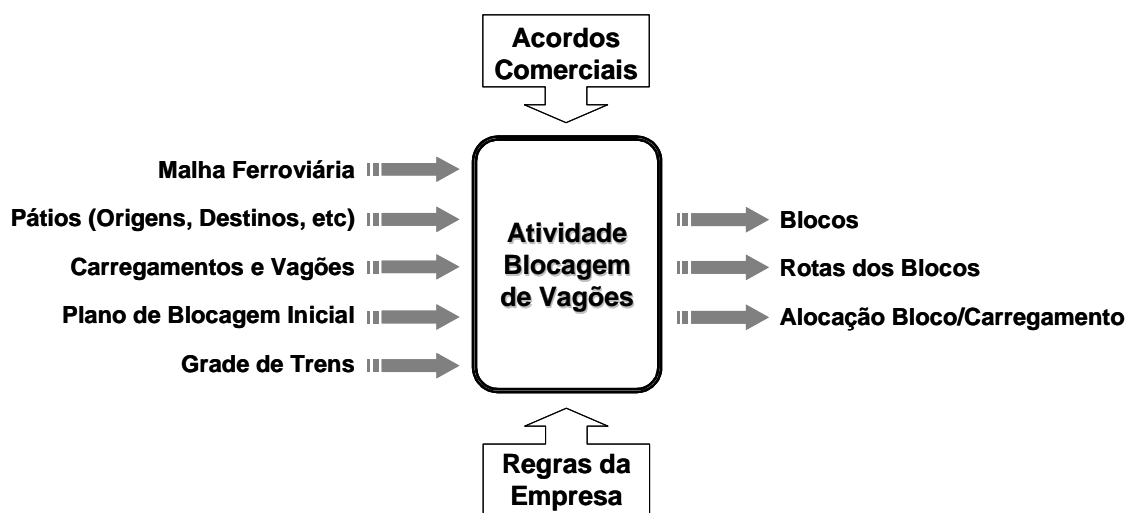


Figura 5 – esquema prático da atividade de blocagem de vagões

Uma vez obtido o plano de blocagem de vagões, segue a necessidade de elaboração da grade de trens, problema a ser tratado no próximo capítulo.

3. GRADE DE TRENS

3.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Após a elaboração do plano de blocagem deve ser estabelecido um plano de circulação de trens para que os vagões possam ser movimentados de suas origens até seus destinos. A atividade responsável por este plano é a elaboração da grade de trens, também conhecida como planejamento e/ou programação de trens.

Ao realizar esta atividade deve-se, primeiramente, ter uma noção do elevado custo de operação de uma ferrovia, a fim de conscientizar quanto ao impacto que uma decisão proveniente desta atividade pode ocasionar nos resultados das ferrovias. Por exemplo, na ferrovia brasileira MRS Logística S.A., cerca de 7.300 trens de carga geral e carga expressa são operados anualmente contendo em média 70 vagões por trem. Este contexto apresenta um custo de operação da ordem de centenas de milhões de reais. Considerando que em geral as empresas não utilizam de ferramentas de otimização analítica para auxílio na elaboração de suas grades de trens realizando esta atividade manualmente e que há inúmeras variáveis envolvidas no problema, o potencial de redução de custos através da aplicação de pesquisa operacional é da ordem de milhões de reais. Além do mais uma grade de trens otimizada é capaz de gerar uma redução dos tempos de viagem dos vagões, reduzindo conseqüentemente o tamanho da frota de vagões demandados e aumentando o nível de serviço para os clientes.

Em geral a atividade de elaboração da grade de trens lida com 3 componentes distintos:

- Malha ferroviária;
- Trens que trafegam pela malha;
- Blocos de vagões que viajam nos trens.

Estes elementos estão ilustrados na figura 6, que representa um pequeno exemplo de malha ferroviária com 9 nós (pátios) e as respectivas rotas de trens e blocos. O trem A parte do nó 1 e continua pela rota 1-6-7-8-9, chegando ao destino final em 9. O trem B possui a rota 2-3-4-9 e o trem C a rota 1-2-5-9. 3 blocos de vagões b_1 , b_2 e b_3 viajam nestes trens. O bloco b_1 inicia no trem A no trecho 1-6-7, enquanto o bloco b_2 viaja no mesmo trem ao longo do trecho 6-7-8.

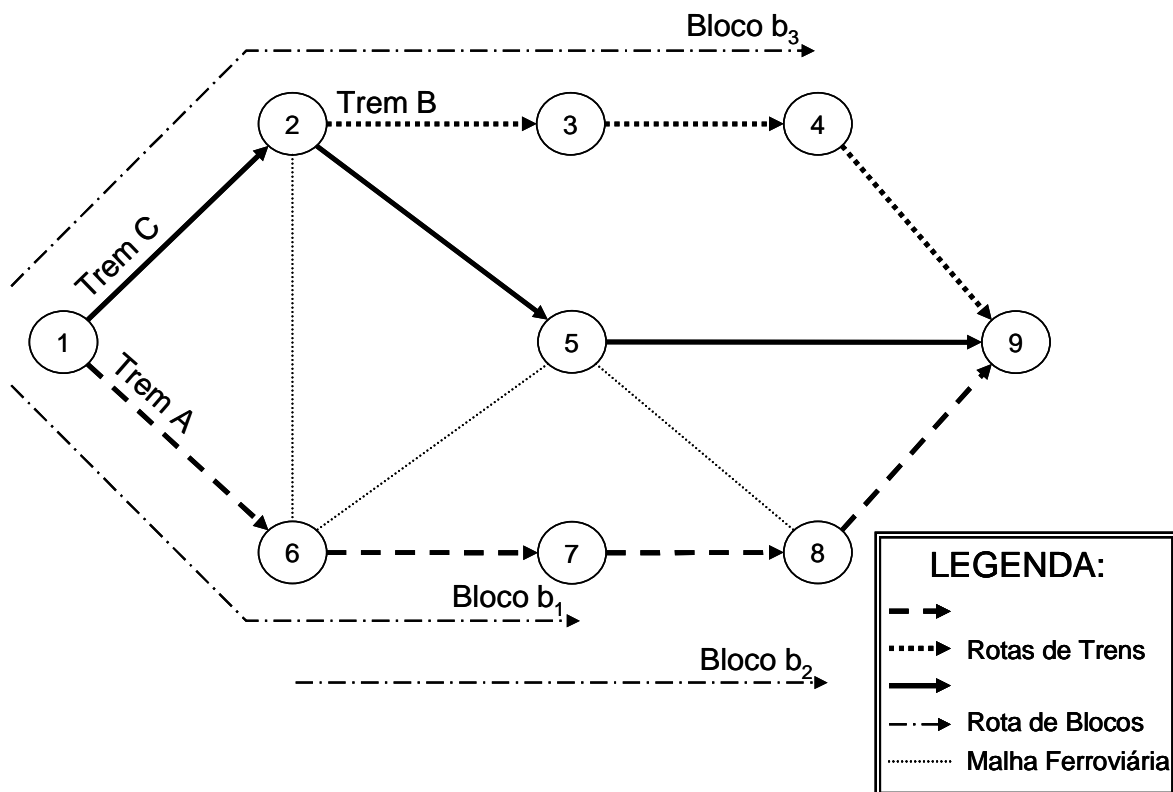


Figura 6 – representação dos elementos malha e rotas de trens e blocos

Durante a viagem de cada trem de sua origem para seu destino, blocos de vagões são anexados e desanexados a ele nos vários pátios em que pára. Geralmente vários blocos viajam em um trem ao longo de sua rota e da mesma maneira um bloco pode viajar em diversos trens de sua origem a seu destino. Por exemplo, ainda na figura 6, o bloco b_3 inicia no nó 1 e viaja no trem C ao longo do trecho 1-2. No nó 2 o bloco é desanexado do trem C e anexado ao trem B onde viaja até o nó 4, que é seu destino final. A transferência de blocos de um trem para outro

é conhecida como conexão de blocos de vagões. Dos blocos utilizados no exemplo acima, apenas b_3 realiza conexão.

Com o simples exemplo descrito acima é possível compreender a dinâmica da atividade de elaboração da grade de trens. No contexto desta dinâmica podem ser encontrados cinco diferentes tipos de decisões a serem tomadas, quais sejam:

- Quantidade de trens a serem colocados em circulação;
- Origem, destino e rota de cada trem;
- Horários de chegada e de partida de cada trem em cada pátio onde as paradas são realizadas;
- Frequência de cada trem incluindo o número de vezes em 7 dias que um trem deve ser colocado em circulação e os dias da semana;
- Blocos de vagões que devem ser anexados a trens para trafegarem pela malha, considerando a minimização dos custos de transporte (incluindo distâncias viajadas, equipagem, locomotivas, consumo de combustível, tempos de utilização dos ativos, etc).

Geralmente estas decisões são tomadas para períodos de 7 dias, uma vez que na maioria dos casos as demandas de transporte de carga são atendidas baseadas neste período. Para viabilizar uma grade de trens, devem ser consideradas as seguintes restrições:

- O número de trens que se originam em um nó dentro de um mesmo horizonte de tempo deve ser limitado. Esta restrição também se aplica ao número de trens que chegam e partem de qualquer pátio, mesmo se este for o destino final. Estes limites garantem uma distribuição uniforme de horários de chegadas e partidas dos trens ao longo do dia, reduzindo congestionamentos;
- O número de trens passando por um arco da rede (referente à linha de circulação da malha) também deve ser limitado. Esta condição é conhecida como restrição de capacidade da linha;
- Ao atribuir blocos à trens, o número total de vagões anexados não deve ultrapassar os números máximos e mínimos de vagões dos trens

previamente determinados. Esta condição é conhecida como restrições de máximos e mínimos tamanhos de trens.

O principal objetivo na elaboração da grade de trens é minimizar a soma ponderada dos custos dos seguintes elementos:

- Distância total de viagem dos vagões em trens;
- Tempo total de viagem dos vagões em trens;
- Número total de vagões que realizaram conexão de blocos em trens;
- Quantidade de locomotivas e equipagens requeridas;
- Número total de trens formados por semana.

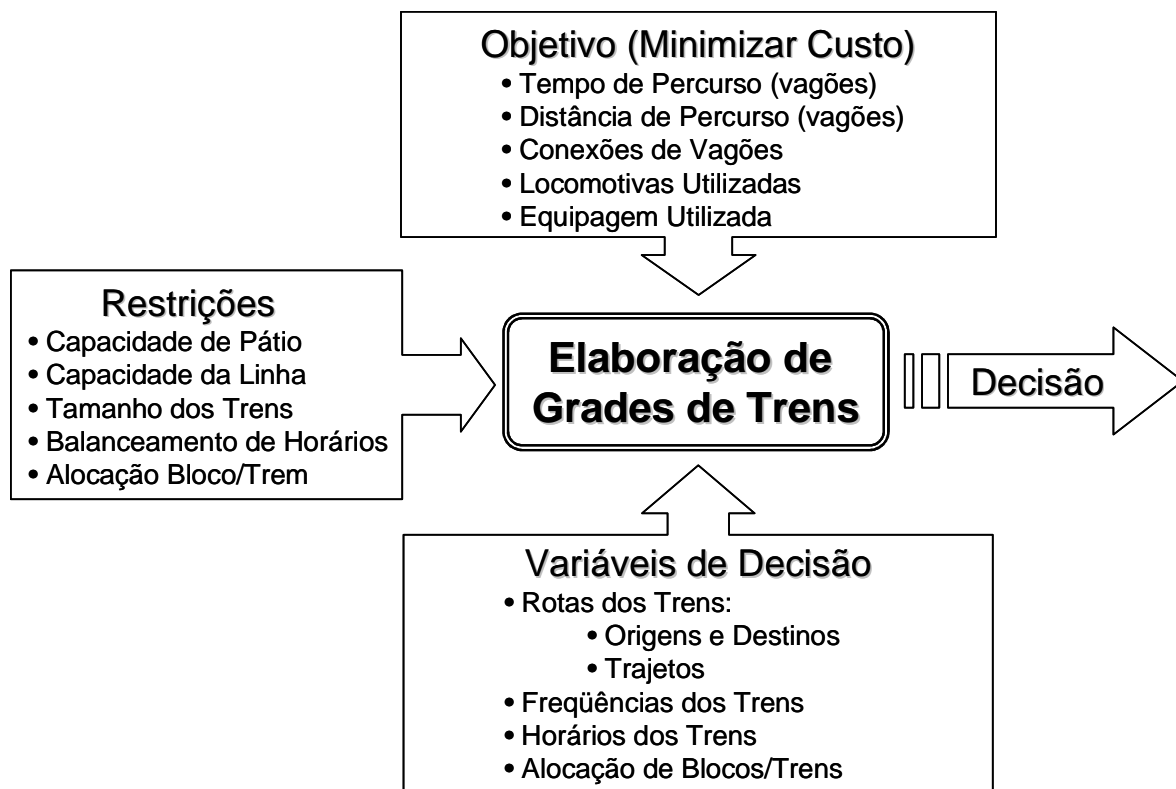


Figura 7 – modelagem conceitual da elaboração da grade de trens

Na figura 7 acima estão representadas as variáveis de decisão, função objetivo e restrições típicas de um problema de elaboração de grade de trens. Em um planejamento de grade de trens, pode ser também considerada no objetivo a minimização do número de paradas dos trens nos pátios, alocações pré-

determinadas de blocos em trens ao longo dos dias da semana e a elaboração de grades adequadas às restrições de locomotivas e equipagens.

A baixa frequência com que novas grades de trens são elaboradas se deve ao fato, dentre outras, de que se torna extremamente complexo e demorado realizar esta atividade sem o auxílio computacional de ferramentas de otimização. Com a disponibilidade destas ferramentas, as grades de trens poderiam ser elaboradas com uma frequência maior, reduzindo custos operacionais e proporcionando maior eficiência ao transporte ferroviário de carga.

3.2 MODELAGEM MATEMÁTICA

Apresenta-se a seguir a modelagem deste problema desenvolvida também por AHUJA ET AL (2005), que resolve o problema com programação linear inteira de grande dimensão.

Considera-se neste modelo que os trens circulam segundo a mesma grade todos os dias (eliminando o efeito de sazonalidade semanal) e desconsideram-se os horários de circulação. Ainda assim demonstra-se que o problema apresenta milhões de variáveis e restrições.

Seja N como o conjunto de nós/pátios na malha e A como o conjunto de arcos/linha de circulação. No modelo são utilizados dois nós fictícios s e t para representar as origens e os destinos de todos os trens, respectivamente. Parte-se da premissa que do nó fonte s estão disponíveis fluxos de diferentes produtos representando os trens que se destinam ao nó final t . Estes produtos ou trafegam pelos nós reais da rede (caso o trem correspondente é formado) ou pelos nós fictícios no arco (s,t) sem passar por outros nós (caso o trem não seja formado).

Para formulação do modelo, considere M um número infinitamente grande. $I(i)$ e $O(i)$ representam o conjunto de arcos chegando e partindo do nó $i \in N$, respectivamente.

De maneira similar $o(b)$ e $d(b)$ representa a origem e o destino do bloco b . T_i^+ , T_i e T_a se referem à capacidade máxima de trens que chegam no nó i , que partem do nó i e que trafegam no arco a ao longo de um período, respectivamente. Considere f_a^k como o custo unitário de um trem k passar pelo arco a , c_{ka}^b como o custo unitário do bloco b trafegar no trem k pelo arco a e s_i^b como o custo unitário de conexão do bloco de vagões b no nó i .

São criados dois diferentes grupos de variáveis de decisão:

- y_a^k igual 1 se o trem $k \in K$ passa pelo arco $a \in A$, e 0 caso contrário;
- x_{ka}^b igual a 1 se o bloco $b \in B$ trafega no arco $a \in A$ no trem $k \in K$, e 0 caso contrário.

O problema consiste em encontrar y_a^k e x_{ka}^b de forma a satisfazer ao modelo abaixo (figura 8):

Minimizar a função-objetivo:

$$\begin{aligned} & \sum_{k \in K} \sum_{a \in A} f_a^k y_a^k + \sum_{b \in B} \sum_{k \in K} \sum_{a \in A} c_{ka}^b x_{ka}^b \\ & + \sum_{b \in B} \sum_{\substack{i \in N \\ i \neq o(b), i \neq d(b)}} s_i^b \left| \sum_{a \in O(i)} x_{ka}^b - \sum_{a \in I(i)} x_{ka}^b \right| \end{aligned} \quad (1)$$

Sujeita às seguintes restrições:

$$\sum_{a \in O(i)} y_a^k - \sum_{a \in I(i)} y_a^k = \begin{cases} 1, & \text{if } i = s \\ 0, & \text{if } i \neq s, t, \\ -1, & \text{if } i = t \end{cases} \quad \forall i \in N, \forall k \in K \quad (2)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{a=(s,i)} y_a^k \leq T_i^+, \quad \forall i \in N \quad (3)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{a=(i,t)} y_a^k \leq T_i^-, \quad \forall i \in N \quad (4)$$

$$\sum_{h \in K} y_h^a \geq T_a, \quad \forall a \in A \quad (5)$$

$$\sum_{h \in K} \sum_{a \in O(i)} x_{ka}^b - \sum_{h \in K} \sum_{a \in I(i)} x_{ha}^b = \begin{cases} 1 & \text{if } i = o(b) \\ 0 & \text{if } i \neq o(b) \text{ or } d(b), \\ -1 & \text{if } i = d(b) \end{cases} \quad \forall i \in N, \forall b \in B \quad (6)$$

$$\sum_{b \in B} x_{ka}^b \leq M y_a^k, \quad \forall a \in A, \forall k \in K \quad (7)$$

$$L_a^k y_a^k \leq \sum_{b \in B} v^b x_{ka}^b \leq U_a^k y_a^k, \quad \forall k \in K, \forall a \in A \quad (8)$$

$$y_a^k \in \{0, 1\}, \quad \forall k \in K, \forall a \in A \quad (9)$$

$$y_{ka}^b \in \{0, 1\}, \quad \forall k \in K, \forall a \in A, \forall b \in B. \quad (10)$$

Figura 8 – modelagem matemática da elaboração da grade de trens

Nesta formulação, a função-objetivo (1) é consta da soma de três parcelas:

- $\sum_{k \in K} \sum_{a \in A} f_a^k y_a^k$: somatório dos custos de circulação de todos os trens em toda a malha;
- $\sum_{b \in B} \sum_{k \in K} \sum_{a \in A} C_{ka}^b x_{ka}^b$: somatório dos custos da circulação de todos os blocos em todos os trens por toda a malha;
- $\sum_{b \in B} \sum_{i \in N} S_i^b \left| \sum_{a \in O(i)} x_{ka}^b - \sum_{a \in I(i)} x_{ka}^b \right|$: somatório dos custos de todas as conexões de blocos de vagões em todos os pátios/nós.

Ainda na formulação acima, as seguintes restrições estão modeladas:

- A restrição (2) refere-se ao balanceamento do fluxo dos trens, isto é, controla a quantidade de trens que chegam e partem de cada pátio;
- As inequações (3) e (4) garantem que a quantidade de trens chegando e saindo dos pátios/nós i respectivamente, não ultrapasse a capacidade máxima do pátio estipulada para um dia;
- De maneira similar em (5), o número máximo de trens que passam por um arco qualquer ao longo do dia é limitado pela capacidade de circulação de trens da linha ao longo de um período de tempo;
- Em (6) o balanceamento do fluxo de blocos de vagões é realizado, controla a equivalência entre a quantidade de blocos que são anexados e desanexados dos trens;
- A restrição (7) garante o tráfego de um bloco em um arco se somente se há um trem que passa por este mesmo arco;
- A restrição (8) garante que a quantidade de vagões em um trem em determinado arco (somatório da quantidade de vagões v^b de cada bloco no trem), não ultrapasse os limites mínimos e máximos estabelecidos (L_a^k e U_a^k , respectivamente);
- (9) e (10) são utilizadas para garantir que as variáveis de decisão sejam binárias e inteiras.

Em relação ao tamanho deste problema de programação linear inteira para uma ferrovia brasileira típica, retoma-se o exemplo da empresa MRS Logística S.A. que possui cerca de 300 pátios (nós onde os trens podem ter suas origens, destinos ou realizar paradas intermediárias), cerca de 400 arcos, 180 blocos e 25 trens por dia.

Com estes valores a formulação envolve 10.000 (400×25) variáveis de decisão y_a^k e 1.800.000 ($400 \times 25 \times 180$) variáveis de decisão x_{ka}^b , além de mais de 120.000 restrições (300×400). Isto mostra que mesmo para uma ferrovia de malha pequena e com poucos trens, o problema se torna inviável para ser resolvido sem o auxílio de ferramentas de suporte à tomada de decisão.

No caso de malhas ferroviárias maiores e de não adotar as premissas citadas no início da formulação matemática apresentada, o número de variáveis de decisão

pode chegar a trilhões, o que excede a capacidade de otimização dos softwares comerciais existentes, criando a necessidade, portanto, de fragmentações do problema e heurísticas para solucionar o mesmo. (AHUJA ET AL, 2005)

3.3 SOBRE A MODELAGEM DE GRADE DE TRENS

A elaboração da grade de trens é um problema de otimização de redes de grandes dimensões, podendo chegar a envolver até trilhões de variáveis de decisão. A dificuldade de se elaborar uma grade de trens manualmente foi a responsável por desencadear diversas tentativas de desenvolvimento de algoritmos de otimização para o problema que são de extrema utilidade para a prática da atividade. Muitos estudos já foram realizados na tentativa de solucionar o problema, porém a maioria não obteve êxito nos resultados quando aplicados em um ambiente real. (CORDEAU ET AL.,1998)

Nos primeiros estudos realizados sobre a elaboração de grade de trens as soluções não levavam em consideração a atividade de blocagem de vagões. Uma das primeiras tentativas de integrar a blocagem de vagões à grade de trens foi realizada por ASSAD (1980), com um modelo de fluxo em rede multiproduto para a modelagem do problema. Um problema ainda mais complexo foi estudado por CRAINIC, FERLAND, e ROUSSEAU (1984) que propuseram um modelo e uma heurística para solução do problema com foco em um planejamento tático. O modelo é um problema de fluxo de multi produtos em rede, inteiro misto e não linear que envolve blocagem de vagões, formação e roteamento de trens. As demandas de transporte são divididas em classes onde cada classe se constitui em um par origem/destino e a um produto. Um conjunto de itinerários viáveis são definidas para cada classe. Um itinerário representa a rota do trem e as operações que o trem deve realizar em cada parada intermediária entre sua origem e seu destino. Ao selecionar a melhor distribuição do tráfego para cada classe, os problemas de blocagem, roteamento e formação são resolvidos simultaneamente.

A função-objetivo busca minimizar o somatório dos custos de operação e atrasos associados aos itinerários estabelecidos para os trens. A metodologia da solução encontrada é melhor explicada em CRAINIC e ROSSEAU (1986) que escreveram sobre uma abordagem geral para elaboração da grade de trens no contexto do transporte de múltiplos produtos.

Em geral os modelos que tentaram abranger todos os aspectos envolvidos na elaboração de grade de trens para serem solucionados de uma só vez, se tornaram tão complexos que não chegaram a ser resolvidos plenamente.

Estudos mais recentes como AHUJA ET AL (2004) apresentam melhores resultados reais ao dividir o problema em duas etapas diferentes: roteamento de trens (origens, destinos, rotas e alocação bloco/trem) e programação dos trens (frequência dos trens e seus horários de circulação), que são resolvidas separadamente.

Em geral a primeira etapa é otimizada e sua solução é utilizada como entrada para a otimização da segunda etapa. Este tipo de procedimento leva obviamente a soluções sub ótimas, porém consegue gerar resultados para o problema melhores que os obtidos manualmente baseados apenas no empirismo dos programadores. (AHUJA ET AL, 2005)

3.4 CONSIDERAÇÕES PARA A IMPLEMENTAÇÃO DA MODELAGEM

Para modelar o problema da grade de trens, outras restrições e características devem ser consideradas, a saber:

- Trens que devem ser criados devido à regras da empresa ou acordos comerciais;
- Trens que não devem ser criados em função de custos de equipagem, locomotivas e outros;
- Algumas rotas podem ser indesejadas;

- Blocos que devem ser necessariamente alocados em trens pré-especificados;
- Trens pequenos devem ser evitados em função de ganhos de escala;
- Trens preferenciais visando a não alterar a grade de trens drasticamente de um período para o outro em função de variações nas demandas;
- Grade de trens coerente com o plano de blocagem;
- A empresa pode desejar fazer alterações menores na grade de trens devido aos riscos associados menores e mais fáceis de se implementar quando comparados a mudanças drásticas;
- Otimizar parcialmente uma grade de trens;
- Variação de demanda ao longo dos dias da semana ou de um outro período qualquer;
- Restrição de rotas de trens restritas a passar por locais específicos como sedes de equipagem ou pontos de abastecimento;
- Cumprimento de determinados horários acordados com clientes ou outros.

Para sintetizar toda a atividade de elaboração da grade de trens com as considerações acima, foi elaborado o esquema de modelagem apresentado na figura 9 a seguir.

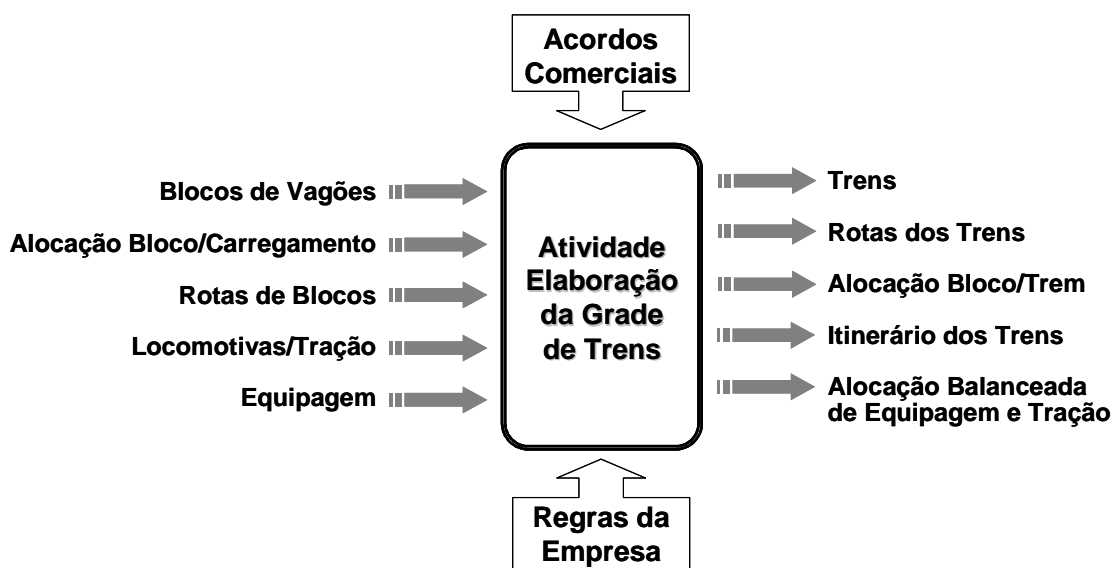


Figura 9 – esquema prático da elaboração da grade de trens

A partir da grade de trens são realizadas demais atividades do processo de planejamento e programação da operação do transporte ferroviário de carga como a programação de locomotivas, equipagem e distribuição de vagões. No capítulo seguinte é apresentada a atividade de programação de locomotivas.

4. PROGRAMAÇÃO DE LOCOMOTIVAS

4.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O atividade de programação de locomotivas consiste em alocar um conjunto de locomotivas para atender aos trens programados em um dado horizonte de tempo e determinar as rotas de todas as locomotivas na malha ferroviária. Para tal é necessário considerar o número de locomotivas existentes em cada tipo de frota, necessidades de abastecimento e manutenção, tração requerida para deslocamento de cada trem e capacidade de tração das locomotivas. Neste problema, deve ser considerado também o fato de os trens apresentarem frequências semanais diferentes (por exemplo: alguns trens circulam diariamente enquanto outros apenas circulam em dias específicos da semana). Em geral o objetivo da solução do problema é aumentar a utilização média das locomotivas e, conseqüentemente, reduzir o número de locomotivas necessárias ao transporte ferroviário. O problema de programação de locomotivas é encontrado em dois níveis distintos: tático e operacional.

No nível tático, deve-se decidir qual conjunto de locomotivas será alocado a cada trem considerando os diversos tipos de máquinas (C38, SD40, U23, etc) em função de algumas de suas características como potência, capacidade de tração e custos. Algumas locomotivas alocadas podem estar sendo rebocadas como os vagões, ao invés de estarem tracionando os trens. O reboque de locomotivas permite que locomotivas extras possam ser deslocadas nos trens, dos locais da malha em que estas não estão sendo demandadas para locais em que há necessidade da utilização destas. Também é possível para as locomotivas viajarem escoteiras (trem formado apenas de locomotivas, sem vagões). Esta alternativa de utilização de locomotivas é utilizada para deslocá-las e posicioná-las nos locais da malha onde as mesmas estão sendo demandadas. Deslocar as locomotivas como escoteiras é diferente de rebocá-las pois no primeiro caso as locomotivas

independem dos trens. Além do mais, as escoteiras geralmente se deslocam a uma velocidade maior que a das locomotivas rebocadas. Entretanto o custo das escoteiras é maior por envolver necessidade de maquinistas e por não gerar receita, uma vez que não carregam vagões.

No nível operacional, também o problema consiste em decidir quais locomotivas serão alocadas a cada trem . Porém neste nível deve-se levar em consideração as necessidades de abastecimento de cada locomotiva. Por exemplo, suponha que uma locomotiva possua combustível suficiente apenas para viajar por mais 300 Km e que um trem potencial para fazer a alocação só vai passar por um ponto de abastecimento em sua rota após percorrer 500 Km. Logicamente não é possível alocar aquela locomotiva ao trem. Outra importante questão que deve ser considerada no nível operacional é a manutenção. Todas locomotivas precisam de passar por manutenção regularmente. Por exemplo, considere que cada locomotiva deva entrar em manutenção em cada 3000 Km e que esta manutenção só possa ser realizadas em locais específicos na malha denominados oficinas. Sendo assim ao decidir em que trem alocar uma locomotiva, é necessário verificar se a decisão respeita a necessidade de manutenção das máquinas.

Outra questão que deve ser considerada na programação de locomotivas de nível operacional é a incerteza nos tempos de circulação. Ao contrário do nível tático em que se adota a premissa de que todos os trens circulam segundo o tempo planejado, no nível operacional na maioria das vezes isto não acontece. Incorporar esta incerteza nos tempos de circulação e atualizar a alocação de locomotivas adequadamente a um custo mínimo é uma das grandes dificuldades da programação em um nível operacional.

Ao alocar locomotivas aos trens há outro tipo de problema a ser considerado. Quando um trem chega ao seu destino, todo o conjunto de locomotivas pode ser acoplado e outro trem que está de partida (conexão direta) ou as locomotivas do conjunto são separadas e reagrupadas com outras provenientes de outros trens para que então possam ser anexadas a trens de partida (quebra de tração). A conexão direta é sempre mais desejada pois no outro caso, por depender de

locomotivas provenientes de mais de um trem, a vulnerabilidade ao atraso dos trens é maior. Optar por substituir mais de uma locomotiva por apenas uma de potência equivalente ao somatório das outras substituídas também não é desejável, pois caso a única locomotiva do trem quebre, o trem pára e a circulação no trecho em que se encontra fica obstruída.

O desafio da atividade de programação de locomotivas consiste em tomar os seguintes tipos de decisão:

- Quais locomotivas devem ser alocadas para tracionar quais trens?
- Quais locomotivas devem ser alocadas a quais trens para serem rebocadas?
- Quais locomotivas devem viajar escoteiras?

Ao tomar estas decisões é preciso ter como objetivo a minimização da soma dos dois principais custos envolvidos no problema:

- Custo das locomotivas tracionando os trens;
- Custo das locomotivas sendo rebocadas nos trens;
- Custo das locomotivas escoteiras;
- Custo fixo da quebra de tração;
- Custo da penalidade de alocar apenas uma locomotiva ao trem;
- Economia das locomotivas não utilizadas.

Para solucionar a atividade de programação de locomotivas, devem ser consideradas as seguintes restrições:

- Capacidade de tração das locomotivas (em peso);
- Potência das locomotivas;
- Número máximo de eixos do conjunto de locomotivas alocadas a um trem;
- Número máximo de locomotivas alocadas a um trem;
- Respeitar conjuntos específicos de locomotivas (quadro de tração);
- Disponibilidade de locomotivas de cada tipo/frota.

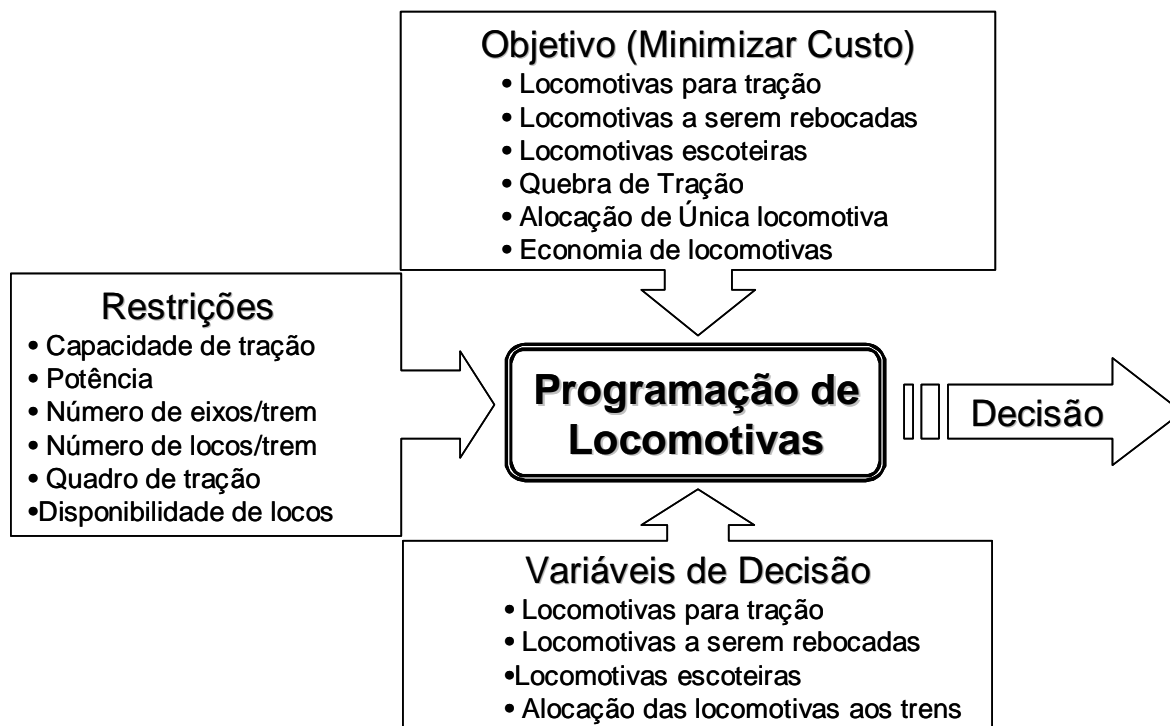


Figura 10 – modelagem conceitual da programação de locomotivas

Na figura 10 acima estão representadas as variáveis de decisão, função objetivo e restrições típicas de um problema de programação de locomotivas.

A programação de locomotivas está entre as mais importantes atividades do processo de planejamento e programação da operação do transporte ferroviário de carga. A falta de ferramentas de planejamento e programação para suportar as decisões desta atividade resulta na utilização altamente ineficiente de um dos recursos mais caros das ferrovias: locomotiva.

4.2 MODELAGEM MATEMÁTICA

Conforme orientação do capítulo de introdução, para a formulação matemática desta atividade, apresenta-se a modelagem desenvolvida também por AHUJA ET AL (2005). Esta modelagem está focada na programação de locomotivas de nível tático descrita no item anterior e adota-se a premissa de que os trens apresentam

circulação regular diária. Atrasos (variações nos tempos de circulação), abastecimento e parada para manutenção não são consideradas. O objetivo do modelo é determinar as locomotivas que irão tracionar, ser rebocadas e viajar escoteiras, além das conexões diretas (trem a trem), buscando-se minimizar todos os custos envolvidos.

É considerado como entrada de dados do modelo, as rotas e tempos de circulação dos trens. O conjunto de todos os trens é chamado de L . Considera-se que um mesmo trem, circulando diferentes dias da semana esteja representado por diferentes trens do conjunto L , uma para cada dia. Para cada $l \in L$ são conhecidos sua origem e destino, assim como os tempos de partida e chegada. Considere T_l e β_l o peso (em tonelada) e a potência por tonelada necessários para tracionar o trem l e E_l a penalidade por alocar apenas uma única locomotiva ao trem.

K representa o conjunto de todos os tipos de locomotivas disponíveis para tracionar os trens. Considere h^k e λ^k como as respectivas potência e número de eixos de cada tipo de locomotiva $k \in K$. O custo semanal de possuir uma locomotiva do tipo k é dado por G^k , enquanto B^k representa o tamanho da frota disponível para alocação. Cada locomotiva do tipo k alocada para tracionar um trem l proporciona a capacidade de tração t^k_l .

O modelo de programação de locomotivas é formulado como um problema de fluxo em rede multiproduto de variáveis inteiras com restrições adicionais. Esta formulação de programação inteira mista representa o fluxo de locomotivas em uma rede espaço/tempo. Nesta rede, os arcos representam os trens e os nós representam os eventos (que podem ser as chegadas e partidas dos trens e locomotivas), e cada diferente tipo de locomotiva representa um produto.

A rede espaço/tempo é referenciada por $G = (N, A)$ onde N e A representam os conjuntos de nós e arcos, respectivamente. Para cada evento de chegada, é criado um nó de chegada e para cada evento de partida, é criado um nó de partida. A cada nó $i \in N$ são associados dois atributos: local e tempo. O conjunto de nós referentes às chegadas e partidas dos trens são representados por $DepNodes$ e $ArrNodes$

respectivamente e os nós de espera (onde as locomotivas permanecem fora de trens) por $GrNodes$. Considere $AllNodes = DepNodes \cup ArrNodes \cup GrNodes$.

Esta rede contém 4 tipos de arcos como exibido na figura 11. O conjunto de arcos de trens ($TrArcs$) contém um arco para todos os trens programados. Seus pontos extremos representam os locais e tempos de sua chegada e partida. Cada nó de chegada e de partida é conectado a um nó de espera por um arco de conexão. Estas conexões pertencem ao conjunto de arcos de conexão ($CoArcs$). Em seguida são criados os nós de espera em cada pátio na ordem cronológica de seus atributos de tempo e estes são conectados aos nós de espera seguintes através dos arcos de espera, representados por $GrArcs$. Estes arcos permitem que as locomotivas que chegaram possam permanecer em um estoque para aguardar que seja alocada a algum trem de partida. Um determinado trem que repassa todo seu conjunto de locomotivas para o próximo trem de partida é representado pelo arco de conexão direta, que liga um nó de chegada diretamente a um nó de partida. Estes arcos também pertencem ao conjunto $CoArcs$.

Finalmente, também permite-se a utilização de locomotivas escoteiras. Um arco de escoteiras é criado de um nó de espera para outro nó de espera. Cada arco pertence ao conjunto $LiArcs$ e tem um custo fixo F_l que representa o custo fixo de alocação de apenas uma locomotiva com maquinista da origem do arco de escoteiras para o destino. O arco de escoteiras também apresenta um custo variável que depende da quantidade de locomotivas viajando no grupo de escoteiras.

Considere $AllArcs = TrArcs \cup CoArcs \cup LiArcs$ e d^k_l o custo de rebocar a locomotiva do tipo k no arco de trem $l \in TrArcs$. Para cada nó i , o conjunto de arcos que chegam em i e que partem de i são representados por $I(i)$ e $O(i)$, respectivamente.

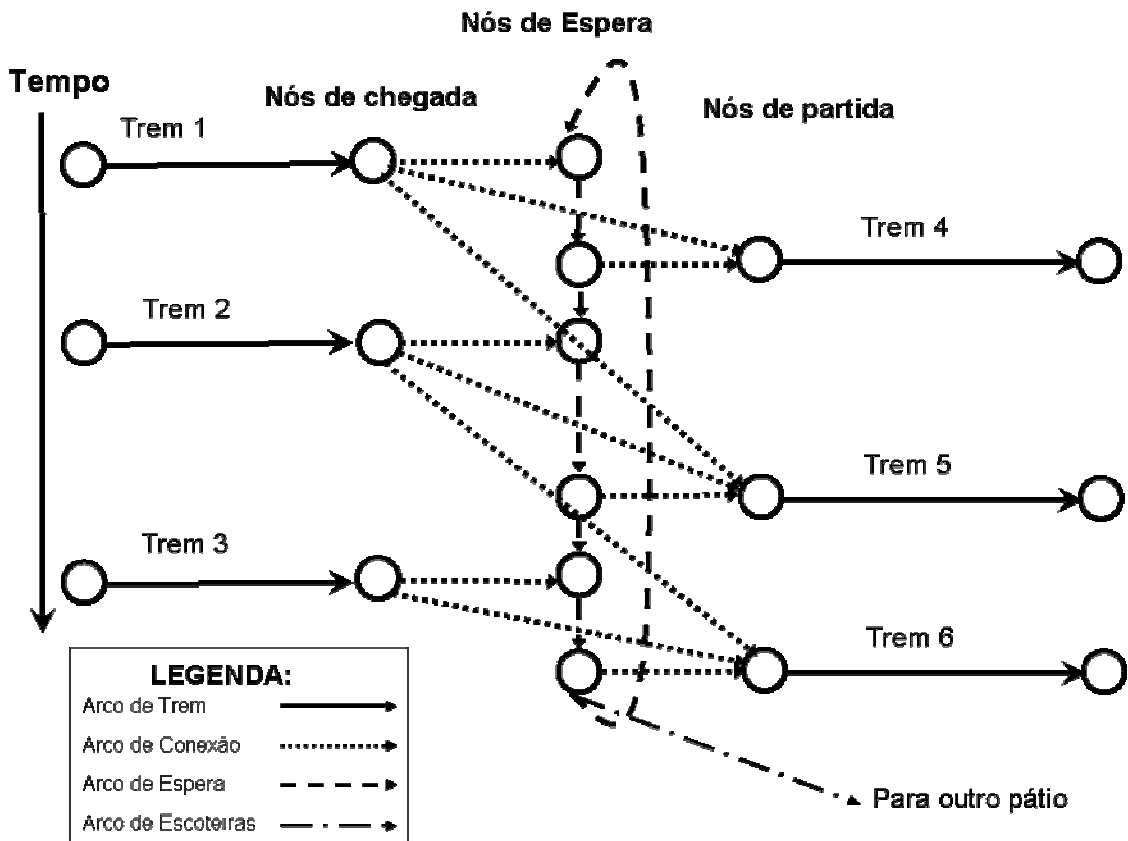


Figura 11 – exemplo de rede espaço/tempo para um tempo

A formulação proposta possui 5 tipos de variáveis de decisão diferentes:

- x_l^k é o número de locomotivas para tracionar do tipo k alocadas aos trens l ;
- y_l^k é o número de locomotivas não tracionando (rebocadas, escoteiras ou ociosas) do tipo k em todos os arcos;
- $z_l = 1$ se ao menos uma locomotiva circula no arco $l \in LiArcs \cup CoArcs$, $z_l = 0$ caso contrário;
- $w_l = 1$ caso apenas uma locomotiva seja alocada ao trem l , e $w_l = 0$ caso contrário;
- s^k indica o número de locomotivas do tipo k não utilizadas.

Encontra-se abaixo, na figura 12, a formulação matemática para a elaboração da grade de trens como um problema de programação inteira:

Minimizar a função-objetivo:

$$\begin{aligned} & \sum_{l \in TrArcs} \sum_{k \in K} c_l^k x_l^k + \sum_{l \in AllArcs} \sum_{k \in K} d_l^k y_l^k + \sum_{l \in LiArcs} F_l z_l + \sum_{l \in CB} V z_l \\ & + \sum_{l \in TrArcs} E_l w_l - \sum_{k \in K} G^k s^k \end{aligned} \quad (1)$$

Sujeita às seguintes restrições:

$$\sum_{k \in K} t_l^k x_l^k \geq T_l \quad \forall l \in TrArcs \quad (2)$$

$$\sum_{k \in K} h_l^k x_l^k \geq \beta_l T_l \quad \forall l \in TrArcs \quad (3)$$

$$\sum_{k \in K} \lambda_l^k x_l^k \leq 24 \quad \forall l \in TrArcs \quad (4)$$

$$\sum_{k \in K} (x_l^k + y_l^k) \leq 12 \quad \forall l \in TrArcs \cup LiArcs \quad (5)$$

$$\sum_i (x_i^k + y_i^k) = \sum_j (x_j^k + y_j^k) \quad \forall i \in AllNodes, \forall k \in K \quad (6)$$

$$\sum_{k \in K} y_l^k \leq 12 z_l \quad \forall l \in CoArcs \cup LiArcs$$

$$\sum_{l \in O(i)} z_l = 1 \quad \forall i \in ArrNodes$$

$$\sum_{l \in I(i)} z_l = 1 \quad \forall i \in DepNodes$$

$$\sum_{k \in K} (x_l^k + y_l^k) + w_l \geq 2 \quad \forall l \in TrArcs$$

$$\sum_{l \in S} (x_l^k + y_l^k) + s^k = B^k \quad \forall k \in K$$

$$x_l^k \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall l \in TrArcs, \forall k \in K$$

$$y_l^k \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall l \in TrArcs, \forall k \in K$$

$$z_l \in \{0, 1\} \quad \forall l \in CoArcs \cup LiArcs$$

$$w_l \in \{0, 1\} \quad \forall l \in TrArcs.$$

(15)

Figura 12 – modelagem matemática da programação de locomotivas

A função objetivo (1) contém 6 termos: custos locomotivas em tração, reboque e escoteira, custo fixo de alocação de apenas uma locomotiva ao trem, custo fixo de quebra de tração e economia de locomotivas. O somatório de todos estes custos envolvidos na solução é o resultado da função objetivo.

As restrições (2) e (3) garantem que as locomotivas alocadas atendam às necessidades de tonelagem e potência respectivamente. A restrição (4) está relacionada ao número máximo de eixos enquanto a restrição (5) limita o número de locomotivas por trem. Na (6) é feito um balanço de fluxo nos nós. As restrições (7), (8) e (9) garantem que pelo menos uma conexão direta ou quebra de tração ocorra para cada trem que chega em seu destino. A alocação de apenas uma única locomotiva é representada pela restrição (10). As demais restrições são utilizadas com para garantir as condições básicas de um modelo de fluxo em rede.

4.3 SOBRE A MODELAGEM DE PROGRAMAÇÃO DE LOCOMOTIVAS

Devido a importância da atividade de programação de locomotivas, há na literatura muitos trabalhos relacionados à tentativa de solução do problema. Em Cordeau et al. (1998) é apresentada um excelente levantamento de modelos de programação de locomotivas e algoritmos para solucionar o problema. A maioria dos modelos existentes considera que um trem pode receber mais de uma locomotiva podendo ser de diferentes tipos. Entretanto alguns modelos consideram que apenas uma locomotiva é alocada a cada trem, conhecidos como modelos de alocação de única locomotiva.

Modelos de alocação de única locomotiva podem ser formulados como uma variante do modelo de fluxo em rede multiproduto de variáveis inteiras. Alguns artigos sobre estes tipos de modelo foram escritos por FISCHETTI E TOTH [22], FORBES ET AL. [24] e WRIGHT [49]. Modelos de alocação de única locomotiva podem ser aplicáveis a ferrovias européias mas não para ferrovias brasileiras e americanas onde na maioria dos trens são alocados mais de uma locomotiva.

Para resolver este tipo de problema são utilizados os modelos de alocação de múltiplas locomotivas. Estes modelos foram estudados por CHIH ET AL [16], FLORIAN ET A [23], NOU ET AL [40] E ZIARATI ET AL [52]. A maioria destes

modelos retrata o problema para ferrovias de transporte de carga, havendo poucos trabalhos aplicados ao transporte ferroviário de passageiros.

Embora haja uma vasta literatura sobre o problema de programação de locomotivas, poucos foram os trabalhos que foram aplicados à ferrovias reais e que obtiveram sucesso. Dentre as principais razões para a falta de sucesso na aplicação de diversos modelos existentes estão:

- A alocação de locomotivas a trens quando na verdade o que se necessita é de decidir a alocação de um conjunto de locomotivas;
- Locomotivas rebocadas e escoteiras não são consideradas adequadamente;
- Não são consideradas restrições referentes a preferências de alocações específicas.

Além do mais, na maioria dos casos as soluções não privilegiam as conexões diretas gerando atrasos no programado e conseqüentemente aumentando os custos da solução embora estes muitas vezes não sejam computados na função objetivo.

4.4 CONSIDERAÇÕES PARA A IMPLEMENTAÇÃO DA MODELAGEM

Para adequar as soluções de programação de locomotivas a um contexto real, estas devem ser capazes de lidar com diversas características e restrições operacionais que podem surgir ao realizá-la devido à acordos com os clientes, leis e regras de transporte que se aplicam em casos específicos, questões históricas, etc.

Tais restrições e características incluem dentre outras:

- Alocações que devem ser realizadas – devido à regras da empresa ou acordos comerciais;
- Alocações que não devem ser realizadas – há alocações que podem ser indesejáveis e função questões de equipagem, quadro de tração, etc;
- Alguns trens devem ser alocados a conjuntos de locomotivas pré-especificados (quadros de tração);

- Alguns fluxos trabalham com locomotivas cativas;
- Incorporar à lógica a capacidade de alocar locomotivas utilizadas para auxílio de tração;
- Considerar que os trens não circulam todos os dias da semana;
- Gerar uma programação de locomotivas coerente com a grade de trens;
- Gerar uma programação de locomotivas coerente com o quadro de maquinistas;
- Permitir alterações incrementais em uma dada solução de programação;
- Otimizar apenas parte das locomotivas;
- Considerar as necessidades de abastecimento e manutenção das locos;
- Considerar que os trens atrasam ou adiantam seus tempos programados de circulação.

A solução de programação de locomotivas incorporando as considerações práticas descritas acima, mais as variáveis e restrições apresentadas na modelagem está esquematizada na figura 5 abaixo.

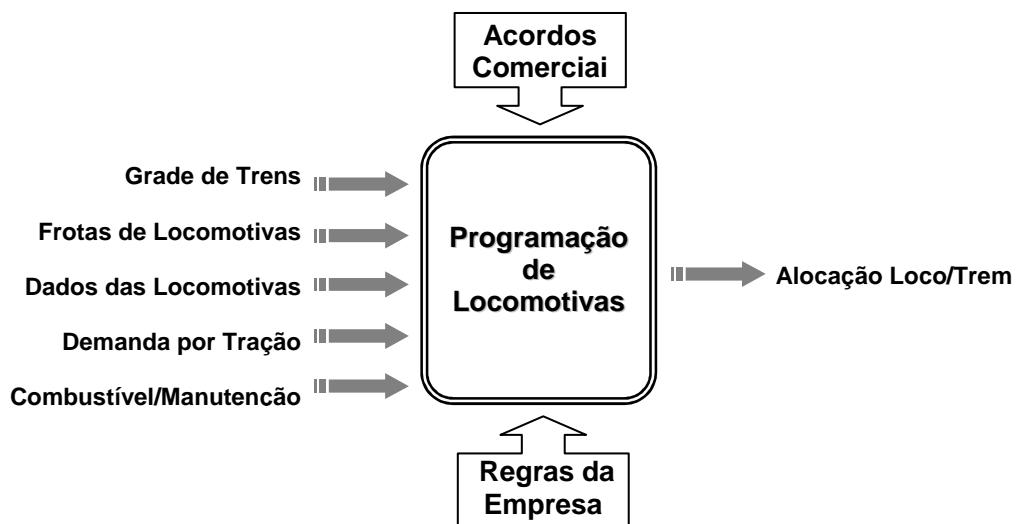


Figura 13 – esquema prático da atividade de programação de locomotivas

5. CONCLUSÃO

Ao longo da monografia foram apresentadas as 3 atividades mais importantes do processo de planejamento e programação do transporte ferroviário de carga: blocagem de vagões, grade de trens e programação de locomotivas.

Cada uma das atividades foi descrita detalhadamente abordando a importância desta para a operação ferroviária, as principais particularidades, os objetivos e as restrições que tornam suas soluções bastante desafiantes do ponto de vista da pesquisa operacional e de quem as executa nas empresas ferroviárias.

Em seguida foi apresentado um exemplo de modelagem matemática de cada atividade, baseada em um recente trabalho dos autores AHUJA ET AL (2005). Posteriormente foi feita uma revisão bibliográfica de técnicas de pesquisa operacional aplicadas aos problemas das atividades na tentativa de solucioná-los. Ao final da apresentação de cada atividade foram feitas algumas considerações práticas para obtenção de êxito no desenvolvimento de suas soluções.

No decorrer dos capítulos foi evidenciada a dificuldade em solucionar os problemas apresentados. Para suprir esta lacuna há vários paradigmas a serem quebrados nas empresas de transporte ferroviário de carga, dentre eles, sugere-se que a realização das atividades descritas na monografia sejam desempenhadas com o auxílio de ferramentas de pesquisa operacional e não apenas baseadas no empirismo de seus executores.

Porém, com a carência de soluções práticas de pesquisa operacional, se uma empresa ou pesquisador desejar desenvolver e aplicar ferramentas de pesquisa operacional que auxiliem as organizações a encontrarem soluções próximas ao ótimo que possam ser facilmente aplicadas na prática, resultando em redução de custos e aumento do nível de serviço e da satisfação dos clientes, estes devem inovar e criar suas soluções customizadas.

Sendo assim, conclui-se que há inúmeras oportunidades de inovação e melhoria das soluções de pesquisa operacional das atividades do processo de planejamento e programação do transporte ferroviário de carga, no intuito de contribuir com a literatura e prática atual.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A. A. ASSAD **Modelling of Rail Networks: Toward a Routing/Makeup Model.** Transp. Res., 1980a.
- A. A. ASSAD **Analysis of Rail Classification Policies.** INFOR 21, 1983.
- R. K. AHUJA; K. C. JHA; J. LIU **Solving real-life railroad blocking problems.** Operations Research, 2004.
- R. K. AHUJA; G. SAHIN; J. LIU **Railroads yard location problem.** Working paper, Innovative Scheduling Systems, Inc.. Gainesville, 2005.
- BODIN L. D.; GOLDEN B. L.; A. D. SCHUSTER; W. ROMIG; **A Model for the Blocking of Trains,** Transp. Res. 14B, 115–120 (1980).
- K. C. CHIH; M. A. HORNUNG; M. S. ROTHENBERG; and A. L. KORNHOUER. **Implementation of a real time locomotive distribution system.**
- J.-F. CORDEAU; F. SOUMIS; AND J. DESROSIERS; **A Benders Decomposition Approach for the Locomotive and Car Assignment Problem,** Technical report G-98-35, GERAD, École des Hautes Études Commerciales de Montréal, Canada, 1998.
- T. G. CRAINIC; J.-A. FERLAND; AND J.-M. ROUSSEAU; **A Tactical Planning Model for Rail Freight Transportation,** Transp. Sci. 18, 165–184 (1984).
- M. FISCHETTI and P. TOTH. **A package for locomotive scheduling,** Technical Report DEIS-OR- 97-16, University of Bologna, Bologna, Italy, 1997.
- M. FLORIAN; G. BUSHELL; J. FERLAND; G. GUERIN, and L. NASTANSKY. **The engine scheduling problem in a railway network.** INFOR 14:121–138, 1976.
- M. A. FORBES; J. N. HOLT; and A. M. WATTS. **Exact solution of locomotive scheduling problems.** Journal of Operational Research Society 42:825–831, 1991.
- P. IRELAND; R. CASE; J. FALLIS; C. VAN DYKE; J. KUEHN; and M. MEKETON. **The Canadian Pacific Railway transforms operations research by using models to develop its operating plans.** Interfaces 34(1):5–14, 2004.
- H. N. NEWTON. **Network design under budget constraints with application to the railroad blocking problem.** Ph.D. thesis, Industrial and Systems Engineering Department, Auburn University, Auburn, AL, 1996.

A. NOU; J. DESROSIERS; and F. SOUMIS. **Weekly locomotive scheduling at Swedish State Railways.** Technical Report G-97-35, GERAD, 'Ecole des Hautes 'Etudes Commerciales de Montr' eal, Montr' eal, Quebec, Canada, 1997.

S. SUZUKI; **A Method of Planning Yard Pass Trains on a General Network,** In Operational Research '72, M. Ross (ed.), North Holland, Amsterdam, 353–361, 1973.

M. A. THOMET; **A User-Oriented Freight Railroad Operating Policy,** IEEE Trans. Systems, Man Cybernet. 1, 349–356 (1971).

C. D. VAN DYKE; **The Automated Blocking Model: A Practical Approach to Freight Railroad Blocking Plan Development,** Transp. Res. Forum 27, 116–121 (1986).

C. D. VAN DYKE; **Dynamic Management of Railroad Blocking Plans,** Transp. Res. Forum 29, 149–152 (1988).

M. B. WRIGHT. **Applying stochastic algorithms to a locomotive scheduling problem.** Journal of Operational Research Society 40:187–192, 1989.

K. ZIARATI; F. SOUMIS; J. DESROSIERS; S. GELINAS; and A. SAINTONGE. **Locomotive assignment with heterogeneous consists at CN North America.** European Journal of Operational Research 97:281–292, 1997.