

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

Luciano Bandeira Campos

**MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA O
PLANEJAMENTO DA REDE DE SERVIÇOS NO
TRANSPORTE FERROVIÁRIO DE CARGAS**

Vitória – ES

2009

LUCIANO BANDEIRA CAMPOS

**MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA O
PLANEJAMENTO DA REDE DE SERVIÇOS NO
TRANSPORTE FERROVIÁRIO DE CARGAS**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil – Área de Concentração em Transportes.

Orientadora: Prof^a Dra. Marta Monteiro da Costa Cruz.

Co-orientador: Dr. Fabiano Mezadre Pompermayer

Vitória – ES

2009

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

C198m Campos, Luciano Bandeira, 1970-
Modelo de otimização para o planejamento da rede de
serviços no transporte ferroviário de cargas / Luciano Bandeira
Campos. – 2009.
114 f. : il.

Orientadora: Marta Monteiro da Costa Cruz.
Co-Orientador: Fabiano Mezadre Pompermayer.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Espírito
Santo, Centro Tecnológico.

1. Transporte ferroviário de carga. 2. Transporte ferroviário –
Planejamento. 3. Programação não linear. 4. Programação
inteira. I. Cruz, Marta Monteiro da Costa. II. Pompermayer,
Fabiano Mezadre. III. Universidade Federal do Espírito Santo.
Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 624

MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA O PLANEJAMENTO DA REDE DE SERVIÇOS NO TRANSPORTE FERROVIÁRIO DE CARGAS

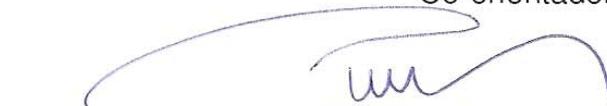
Luciano Bandeira Campos

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil – Área de Concentração em Transportes.

Aprovada em 04/09/2009 por:


Marta Monteiro da Costa Cruz.- Prof^a
Doutora em Engenharia de Transportes
Dept^o Eng. Produção / UFES
Orientadora


Fabiano Mezadre Pompermayer
Doutor em Engenharia de Produção
Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
Co-orientador


Gregório Coelho de Moraes Neto - Prof.
Doutor em Engenharia de Transportes
Dept^o Eng. Produção / UFES


Hostílio Xavier Rattón Neto – Prof.
Doutor em Transportes
Programa de Engenharia de Transportes – COPPE / UFRJ

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Expresso meus sinceros agradecimentos:

À minha orientadora professora Marta Monteiro da Costa Cruz, por acreditar em mim, pelo incentivo e oportunidade oferecida.

Ao meu co-orientador Fabiano Mezadre Pompermayer, que, apesar da distância física, deu valiosas contribuições a este trabalho.

Aos professores membros da banca examinadora, Gregório Coelho de Moraes Neto e Hostílio Xavier Rattton Neto, pela disponibilidade em avaliar este trabalho e pelas críticas construtivas apresentadas.

Ao amigo Jorge Moreira Caldas Fernandes, cujo apoio viabilizou meu ingresso neste Programa de Pós-Graduação e ao amigo Edmundo Ferraz, que também sempre acreditou no valor da educação e apoiou a continuidade dos meus estudos.

Ao Mark Wiley, da empresa Lindo Systems, que gentilmente cedeu para este trabalho uma licença temporária do aplicativo computacional escolhido para solucionar o problema. Agradeço também pelo pronto apoio no esclarecimento das dúvidas surgidas.

Ao professor Hélio Garcia Leite da Universidade Federal de Viçosa - UFV - pelas sugestões no texto e ao mestrando Daniel Binoti, também da UFV, pelo apoio na fase de busca por aplicativos para solução do problema.

Aos colegas de trabalho Adelcy Santos, Anderson Pereira, Daniel Dutra, Daniel Vieira, Ésio Nascimento, Eustáquio Andrade, Hamilton Alves, Ilton Silveira, José Eustáquio Oliveira, Márcio Pavan, Marcos Nóbrega, Marlon Tadeu, Pedro Camargo e Ubiratan Passos, pelas contribuições que ampliaram a compreensão da ferrovia estudada, facilitando a modelagem e conclusões.

Ao Camilo Grobério, pela amizade e apoio.

À minha tia Leda (*in memoriam*), cujo exemplo de dedicação sempre me inspirou.

Ao meu irmão e amigo Marcos Bandeira Campos, pelos artigos fornecidos e sugestões na forma de conduzir o trabalho.

Ao meu pai, João Carlos Chagas Campos, que será sempre meu modelo de esforço e determinação; e à minha mãe Heloísa Bandeira Campos, pelo apoio contínuo.

À minha esposa Márcia Maria Bandeira de Carvalho, pela compreensão, paciência e apoio. Às minhas filhas Lívia e Laura, que me deram forças para concluir este trabalho.

RESUMO

O transporte ferroviário é reconhecido por exigir altos investimentos em infraestrutura e material rodante, mas por outro lado apresenta bom desempenho energético em relação a outros modos de transporte. Apesar do bom desempenho energético, o gasto com combustível tem participação significativa nos custos variáveis. Isto tem motivado as ferrovias a investir em tecnologias e práticas operacionais que contribuam para reduzir o consumo de combustível. Focando-se os recursos material rodante e combustível, foi desenvolvido um modelo de otimização para apoio ao planejamento tático do transporte ferroviário de cargas, com visão integrada das operações em vias de circulação e pátios. O desenvolvimento do modelo foi guiado para aplicação a uma conhecida ferrovia brasileira, onde foi avaliado o transporte de minério de ferro feito simultaneamente por trens com diferentes opções preestabelecidas de configuração a partir de onze pontos de origem até um terminal exportador. Três pátios intermediários podem ser usados para combinar as composições ferroviárias entre si. O modelo facilita a tomada de decisão envolvendo a definição dos trens (serviços) a operar, sua frequência, e a sequência das operações e serviços a serem praticados desde a origem das cargas até o destino. Trata-se de um problema de planejamento denominado *planejamento da rede de serviços* (ou *service network design*). É possível, por exemplo, escolher entre operar trens longos ou curtos (com mudanças na frequência), e ainda optar entre trens diretos da origem ao destino ou trens que sofrem consolidações ao longo do trajeto. Os congestionamentos a que estão sujeitos pátios ferroviários e vias de circulação foram modelados e a formulação resultou em um problema de programação não linear inteira, cuja solução foi obtida por um aplicativo computacional que usa o método *branch-and-bound*. As soluções encontradas consideram a compensação entre operações que acarretem aumento dos custos em pátios ou, alternativamente, nas vias de circulação. Os resultados são discutidos e variam conforme a abordagem adotada para a função objetivo.

Palavras-chave: Transporte ferroviário. Transporte de carga. Planejamento de transporte. Planejamento tático. Programação não linear inteira.

ABSTRACT

Rail transportation typically demands large investment in rolling-stock and infrastructure and is also known for its good fuel efficiency when compared to other modes of transportation. In spite of good fuel efficiency, fuel consumption is still responsible for a significant part of variable costs. This has motivated railroads to improve technology and operational practices which may reduce fuel consumption. An optimization model with focus in rolling stock and fuel consumption was developed in order to help tactical planning of railroad freight transportation with an integrated view of the network (line and yard operations). The model development was guided for application in the iron ore transportation performed by a well-known Brazilian railroad. Different predefined train consist options are operated simultaneously from eleven mines toward an export terminal. Three intermediate terminals may be used to combine train consists. The model helps decision making process related to which trains (services) should run, how frequently and what should be the sequence of activities to be performed from origin to destination of freight. This kind of problem is known as *service network design*. It is possible to choose between long or short trains (by changing service frequency), as well as direct train connections or more than one train between terminals. Line and yard congestions were modeled and led to an integer nonlinear formulation, solved by software which uses a branch-and-bound based method. The solutions found considered the trade-off between yard and line costs. Finally, results are discussed and vary according to different approaches for the objective function.

Keywords: Rail transportation. Freight transportation. Transportation planning. Tactical planning. Integer nonlinear programming.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Estruturação da revisão bibliográfica	25
Figura 2:	Região viável não convexa, com ótimos local e global	28
Figura 3:	Representação genérica típica de uma rede.....	32
Figura 4:	Rede de serviços.....	36
Figura 5:	Gráfico de trens.....	40
Figura 6:	Cadeia de suprimentos do minério de ferro no sistema analisado	46
Figura 7:	Representação simplificada da malha ferroviária em estudo	49
Figura 8:	Trens circulando nos sentidos importação e exportação	53
Figura 9:	Nós relevantes para o transporte de carvão e minério	54
Figura 10:	Custos considerados na função objetivo	59
Figura 11:	Exemplo de rede física (a) e a correspondente rede de serviços (b)	59
Figura 12:	Efeito do congestionamento sobre o tempo de viagem dos trens	66
Figura 13:	Exemplo do sub-trecho 12 para modelagem do tempo de percurso por sistemas M/M/1 em série	69
Figura 14:	Curvas adotadas para tempo de circulação em função do tráfego	70
Figura 15:	Possibilidades de formação e tempos de acúmulo (lotes x hora).....	73
Figura 16:	Categorização dos serviços que entram e saem dos pátios de formação	73
Figura 17:	Exemplo de cálculo do consumo de combustível na circulação.....	80
Figura 18:	Consistência entre serviços e itinerários para balanço de massa em nó de baldeação.....	83
Figura 19:	Exemplo de solução a ser evitada, por estar associada a desmembramento dos trens.....	84
Figura 20:	Aplicativo computacional escolhido para solução do modelo.....	91
Figura 21:	Processo de busca do ótimo global pelo aplicativo computacional <i>What's Best!</i> [®]	92

Figura 22: Variação possível no valor da função objetivo para uma dada abordagem escolhida	94
Figura 23: Exemplo da variação do custo de combustível entre diferentes abordagens para a função objetivo	95
Figura 24: Solução para a rede de serviços minimizando o gasto de combustível (abordagem 1).....	98
Figura 25: Solução para a rede de serviços minimizando a frota necessária (abordagem 2).....	99
Figura 26: Solução para a rede de serviços na abordagem 3	99
Figura 27: Solução minimizando a frota necessária (abordagem 2), desprezando-se o congestionamento na circulação	101

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Compensação entre tempo de acúmulo e tempo de manobra em pátio de formação.....	77
Gráfico 2: Distribuição percentual do tempo gasto pelo material rodante na circulação e nos pátios	100
Gráfico 3: Tempos de permanência dos lotes em pátio, para os diversos cenários avaliados.....	102

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Caracterização das operações dos trens de minério e carvão na rede	55
Quadro 2: Caracterização dos serviços originados no nó 10	61
Quadro 3: Caracterização dos itinerários originados no nó 10.....	63
Quadro 4: Parâmetro indicativo dos serviços originados nos pátios de formação j	77
Quadro 5: Premissas adotadas para consumo específico de trens no mesmo trecho.....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Resultados comparativos dos custos	95
Tabela 2:	Comparação da parcela variável do custo entre as abordagens.....	96
Tabela 3:	Tempo de solução e diferença em relação ao limite teórico ótimo.....	97
Tabela 4:	Tempo de permanência da frota em pátios e na circulação	100

LISTA DE SÍMBOLOS

a = sub-trecho da malha física;

a_f = sub-trecho onde se adotou tempo fixo de percurso;

a_v = sub-trecho onde se adotou tempo variável de percurso;

A = conjunto dos sub-trechos a ;

ca = custo anual equivalente do equipamento [R\$/ano];

cd = custo unitário do óleo diesel [R\$/litro];

CT = custo total considerado na função objetivo [R\$/mês];

CC = custo de capital total do material rodante [R\$/mês];

CCc = custo de capital do material rodante em circulação [R\$/mês];

CCp = custo de capital do material rodante nos pátios [R\$/mês];

CD = custo total relativo ao consumo de óleo diesel [R\$/mês];

CDc = custo relativo ao consumo de diesel em circulação [R\$/mês];

CDp = custo relativo ao consumo de diesel nos pátios [R\$/mês];

ch_{lote} = custo horário do lote (locomotiva e vagões) [R\$/lote x h].

d^p = demanda de transporte para o grupo de carga p [lotes/mês];

FRC = fator de recuperação de capital;

$Frota_{req}$ = frota requerida pela solução gerada [locomotivas ou lotes de vagões];

$Frota_{disp}$ = frota disponível [locomotivas ou lotes de vagões];

h_l = total de lotes escoados pelo itinerário $l \in L$ [lotes];

h^p = total de lotes transportados para atendimento ao grupo de carga p [lotes/mês];

h_l^p = quantidade movimentada do grupo de carga $p \in P$ através do itinerário $l \in L^p$;

i = a taxa de juros por período (ano) de capitalização;

j = pátio intermediário $j \in J$ onde pode haver combinação de serviços;

J = conjunto dos pátios intermediários j ;

k_s = consumo de combustível no serviço s [litros];

k_{acop} = consumo de combustível associado a cada acoplamento [litros/acoplamento]

l = itinerário $l \in L$ para transporte de minério até o complexo portuário;

L = conjunto dos itinerários l ;

L^p = conjunto de itinerários que atendem ao grupo de carga p .

m_l = número de lotes contidos no serviço inicial do itinerário $l \in L$ [lotes];

m_s = número de lotes de material rodante contidos no serviço $s \in S$.

M_j = quantidade de lotes contidos em todos os trens formados no pátio j [lotes/mês];

n = o tempo de uso do equipamento, em número de períodos de capitalização;

N = preço do equipamento novo [R\$];

o_s^j = parâmetro binário $\{0,1\}$ indicativo dos pátios intermediários $j \in J$ de origem dos serviços $s \in S$ ($o_s^j=1$ se o serviço s origina-se em j e $o_s^j=0$ em caso contrário);

o_s^p = parâmetro binário $\{0,1\}$ indicativo dos grupos de carga $p \in P$ de origem dos serviços $s \in S$ ($o_s^p=1$ se o serviço s parte do nó de origem de p e $o_s^p=0$ em caso contrário);

p = grupo de carga (*tipo de produto, origem, destino*);

P = conjunto dos grupos de carga p , aqui diferenciados apenas pela origem;

Q_{acop_j} = total de acoplamentos ocorridos no pátio j [acoplamentos/mês];

$Q_s^{a_f}$ = total de serviços utilizados (trens de minério) no sentido exportação do sub-trecho a_f [trens/mês];

$Q_s^{a_v}$ = total de serviços utilizados (trens de minério) no sentido exportação do sub-trecho a_v [trens/mês];

$Q_o^{a_v}$ = valor constante igual ao total de outros trens utilizados no sentido exportação do sub-trecho a_v [trens/mês];

Rs^{a_f} = limite superior admissível para $Q_s^{a_f}$ (capacidade disponível) [trens/mês];

$Rs_{m_s=2}^p$ = limite superior imposto para a frequência de serviços com dois lotes partindo da origem do grupo de carga p [trens/mês].

$Rm_{m_s=2}^j$ = limite admissível para a saída de lotes do pátio j supondo apenas formação de trens com dois lotes [lotes/mês];

$Rm_{m_s=3}^j$ = limite admissível para a saída de lotes do pátio j supondo apenas formação de trens com três lotes [lotes/mês];

s = trem ou serviço $s \in S$ para transporte de minério no sentido exportação;

S = conjunto dos serviços s ;

$S^{m_s=2}$ = conjunto de serviços contendo dois lotes;

$S^{m_s=3}$ = conjunto de serviços contendo três lotes;

t_a = tempo de circulação em um sub-trecho a qualquer [h];

T_{a_f} = tempo fixo de circulação para qualquer serviço s no sub-trecho a_f ;

TC = tempo dos lotes em circulação [lotes x h/mês];

t_j = tempo de permanência do trem a ser formado no pátio j devido à manobra, calculado por modelo de fila;

tm_{ac}^U = tempo médio de acúmulo por lote para qualquer serviço no grupo U [h/lote];

TP = tempo de permanência dos lotes em pátios [lotes x h/mês]; e

TP_{ac} = tempo de permanência em pátio na espera para acúmulo [lotes x h/mês];

TP_{des} = tempo adicional típico imposto aos trens longos, decorrente da manobra de desmembramento dos lotes ao chegarem no complexo portuário [lotes x h/mês].

TP_{man} = tempo de permanência em pátio devido à manobra de formação [lotes x h/mês];

$TS_i^{a_v}$ = tempo de permanência no i -ésimo sistema M/M/1 do sub-trecho a_v [h];

V = valor de revenda do equipamento após “ n ” anos de uso [R\$];

w_s^a = parâmetro binário $\{0,1\}$ indicativo dos sub-trechos $a \in A$ percorridos por cada serviço $s \in S$ ($w_s^a=1$ se o serviço s passa pelo sub-trecho a e $w_s^a=0$ em caso contrário);

w_l^s = parâmetro binário $\{0,1\}$ indicativo dos serviços $s \in S$ utilizados pelo itinerário $l \in L$ ($w_l^s=1$ se o serviço s é utilizado pelo itinerário l e $w_l^s=0$ em caso contrário);

Xe_j = fluxo de entrada de trens no pátio j ao longo do mês [trens/mês];

Xe_j^E = fluxo de entrada de trens com dois lotes no pátio j [trens/mês];

Xs_j = fluxo total de saída de trens formados no pátio j ao longo do mês [trens/mês];

Xs_j^F = fluxo de saída de trens com dois lotes formados no pátio j [trens/mês];

Xs_j^U = fluxo de saída de trens longos formados pela combinação de dois trens no pátio j [trens/mês];

Xs_j^V = fluxo de saída de trens longos formados pela combinação de três trens com um lote no pátio j [trens/mês];

Xs_j^G = fluxo de saída de todos os trens longos formados no pátio j [trens/mês];

y_s = vetor frequência de cada serviço $s \in S$ [utilizações/mês];

z_l = vetor frequência (variável de decisão) de cada itinerário $l \in L$ [utilizações/mês];

Δ_j = intervalo médio entre chegadas de trens a um pátio $j \in J$; [h/trem];

μ_{acop} = taxa de atendimento do processo de acoplamento [acoplamentos/h];

$\mu_i^{a_v}$ = taxa de atendimento do i -ésimo servidor do sub-trecho a_v [trens/h];

λ_{a_v} = fluxo total de trens no sentido exportação do sub-trecho a_v [trens/h];

$\lambda_{últ_j}$ = taxa de chegada das últimas parcelas dos trens formados no pátio j [trens/h];

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	OBJETIVOS	22
1.1.1	OBJETIVO GERAL	22
1.1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
1.2	METODOLOGIA.....	23
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	24
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1	CONSIDERAÇÕES SOBRE PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO.....	25
2.1.1	PROBLEMAS DE PROGRAMAÇÃO LINEAR (PPL).....	26
2.1.2	PROBLEMAS DE PROGRAMAÇÃO INTEIRA (PPI).....	26
2.1.3	PROBLEMAS DE PROGRAMAÇÃO NÃO LINEAR (PPNL).....	27
2.2	TEORIA DAS FILAS.....	29
2.3	MODELAGEM DE FLUXOS EM REDES.....	30
2.3.1	PROBLEMA DO FLUXO DE CUSTO MÍNIMO	32
2.4	MODELAGEM DE FLUXOS PARA PLANEJAMENTO EM REDES DE TRANSPORTE DE CARGA	33
2.4.1	PLANEJAMENTO DA REDE DE SERVIÇOS DE TRANSPORTE.....	35
2.5	PROBLEMAS CLÁSSICOS NO PLANEJAMENTO DO TRANSPORTE FERROVIÁRIO	39
2.6	CATEGORIZAÇÃO DOS TEMPOS NO TRANSPORTE FERROVIÁRIO.....	41
2.7	PLANEJAMENTO INTEGRADO DA REDE DE SERVIÇOS EM FERROVIAS.....	42
3	PLANEJAMENTO E OPERAÇÃO DO TRANSPORTE DE MINÉRIO NA FERROVIA ANALISADA	46
3.1	A CADEIA DE SUPRIMENTOS DO MINÉRIO DE FERRO.....	46
3.2	ASPECTOS FÍSICOS E OPERACIONAIS DA FERROVIA	48
3.3	O TRANSPORTE DE MINÉRIO DE FERRO.....	50
3.3.1	POSSIBILIDADES OPERACIONAIS PARA OS FLUXOS DE TRENS CARREGADOS COM MINÉRIO.....	55

3.3.1.1	Trens Diretos.....	56
3.3.1.2	Trens Formados ao Longo do Trajeto	56
3.3.1.3	Compensação	57
4	DESENVOLVIMENTO DO MODELO	58
4.1	SERVIÇOS E ITINERÁRIOS	59
4.1.1	CARACTERIZAÇÃO DOS SERVIÇOS OU TRENS TÍPICOS	61
4.1.2	CARACTERIZAÇÃO DOS ITINERÁRIOS	62
4.2	CUSTO DE CAPITAL DO MATERIAL RODANTE	64
4.2.1	CUSTO DE CAPITAL DO MATERIAL RODANTE EM CIRCULAÇÃO	65
4.2.1.1	Estimativa do Tempo de Circulação	66
4.2.1.2	Cômputo do Custo de Capital na Circulação	70
4.2.2	CUSTO DE CAPITAL NOS PÁTIOS	71
4.2.2.1	Tempo de Espera para Acúmulo	72
4.2.2.2	Tempo Devido às Manobras de Formação	75
4.2.2.3	Tempo Total nos Pátios Intermediários	77
4.2.2.4	Tempo Adicional para Desmembramento de Trens Longos no Porto	78
4.3	CUSTO DE COMBUSTÍVEL	78
4.3.1	CUSTO DE COMBUSTÍVEL EM CIRCULAÇÃO	79
4.3.2	CUSTO DE COMBUSTÍVEL NOS PÁTIOS.....	81
4.4	FUNÇÃO OBJETIVO	81
4.5	RESTRIÇÕES	82
4.5.1	ATENDIMENTO DA DEMANDA.....	82
4.5.2	CONSISTÊNCIA ENTRE SERVIÇOS E ITINERÁRIOS	83
4.5.3	RESTRIÇÃO A DESMEMBRAMENTOS NOS PÁTIOS INTERMEDIÁRIOS	84
4.5.4	IMPEDIMENTOS NA PROGRAMAÇÃO DE TRENS COM DOIS LOTES NOS PONTOS DE CARREGAMENTO.....	85
4.5.5	LIMITAÇÕES NA CAPACIDADE DE TRÁFEGO – TRECHOS SINGELOS	85
4.5.6	LIMITAÇÕES NA CAPACIDADE DOS PÁTIOS INTERMEDIÁRIOS	86
4.5.7	LIMITAÇÃO DE FROTA.....	87
4.5.8	RESTRIÇÕES ELEMENTARES	88
4.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	88

5	SOLUÇÃO, RESULTADOS E DISCUSSÃO	89
5.1	OPÇÕES PARA SOLUÇÃO	89
5.2	OPÇÃO ESCOLHIDA E ESTRATÉGIA ADOTADA	90
5.3	CENÁRIOS ANALISADOS	93
5.4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	94
6	CONCLUSÃO	104
7	REFERÊNCIAS	108
	APÊNDICES	111
	APÊNDICE A: MAPEAMENTO DOS SERVIÇOS	111
	APÊNDICE B: MAPEAMENTO DOS ITINERÁRIOS.....	112
	APÊNDICE C: SOLUÇÕES ENCONTRADAS	113

1 INTRODUÇÃO

Num contexto empresarial, conforme exposto por Ballou (2006), a gestão logística é um processo de coordenação das diversas atividades necessárias para disponibilizar bens e serviços nas condições, locais e momentos requeridos pelos consumidores. Busca-se assegurar um adequado nível de atendimento das necessidades dos clientes, e ao mesmo tempo da forma mais favorável à empresa. Isto exige um planejamento logístico eficaz para tomada de decisões relacionadas a três categorias de problemas: estratégia de localização das instalações; decisões sobre estoques e estratégia de transporte.

Com relação ao planejamento do transporte, as empresas frequentemente estão envolvidas com questões relacionadas à instalação e operação de redes de transporte, o que exige decisões nos níveis estratégico, tático e operacional.

No caso do modo ferroviário, são necessários altos investimentos em frota de *material rodante* (vagões e locomotivas), *via permanente* (pátios ferroviários e vias de circulação), obras de arte (pontes, túneis, viadutos) e infra-estrutura de apoio (oficinas, escritórios, postos de abastecimento, centros de controle). Neste contexto, ferramentas de apoio à decisão têm papel relevante no auxílio ao planejamento do transporte, facilitando a gestão da alocação dos ativos.

Assad (1980a) expõe os diversos aspectos decisórios em uma ferrovia, e mostra que se trata de um complexo sistema com diversas partes inter-relacionadas. Assim, decisões sobre processos nos terminais, por exemplo, poderão ter efeitos sobre os processos na vias de circulação e vice-versa.

Decisões do dia a dia (curto prazo) são suportadas por um planejamento tático (de médio prazo), o qual frequentemente utiliza informações em um nível mais agregado e possui alcance sobre toda a ferrovia. Este planejamento define, por exemplo, a escolha dos trens a serem operados (tamanho, trajeto e frequência), a definição do roteiro das cargas e a sequência de trens e operações a serem feitas nos terminais desde a origem até o destino da carga.

A proposta deste trabalho é facilitar o planejamento tático acima, aplicando-o para o fluxo de exportação em uma ferrovia que faz parte da cadeia de suprimentos do

minério de ferro. A ferrovia pertence a uma conhecida mineradora brasileira e faz amplo uso de diferentes configurações de trens com tamanhos preestabelecidos e dedicados exclusivamente ao transporte de minério entre 11 pontos de carregamento (situados próximos às minas) e um terminal portuário exportador.

O problema observado na ferrovia em questão diz respeito à definição do “mix” de trens a serem operados na malha. Esta decisão tem sido dificultada na medida em que, graças ao avanço tecnológico, alternativas de tipos de formação de trem se multiplicaram. É possível, por exemplo, optar entre operar com trens curtos (mais frequentes), ou com trens longos. Cada alternativa de configuração do trem é denominada trem típico, com características próprias (carga transportada, consumo de combustível, número de locomotivas e vagões transportados, pátios de origem e destino do trem). Outra questão a ser considerada diz respeito à escolha entre trens diretos desde a origem ao destino da carga ou trens que sofram consolidações ao longo do trajeto (trens indiretos).

A decisão sobre a proporção entre os diversos trens típicos tem profunda repercussão no desempenho da ferrovia como um todo. Optar por trens curtos, por exemplo, pode implicar em uma malha com tráfego mais congestionado devido ao maior número de trens nas vias de circulação. Trens longos por outro lado, reduzem o congestionamento de tráfego na circulação e melhoram a eficiência no consumo de combustível, mas suas manobras de formação fazem com que o material rodante fique retido por mais tempo nos pátios ferroviários, o que também ocorre com os trens que não são diretos.

Dentre os modos de transporte, o modo ferroviário destaca-se por sua alta eficiência energética, podendo transportar carga por longas distâncias e apresentar consumo de combustível relativamente baixo, principalmente quando comparado ao modo rodoviário (MAGALHÃES, 2001).

Apesar da reconhecida eficiência energética, o gasto com combustível tem participação considerável no custo variável das ferrovias, o que as têm levado a buscar boas práticas operacionais para redução do consumo de combustível.

Diante do exposto, surgiu a motivação para uma modelagem do problema na ferrovia citada, de forma a auxiliar o planejamento tático com foco no uso eficaz dos veículos (vagões e locomotivas) e no consumo de combustível.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver, sob a ótica da otimização, um modelo matemático para auxílio ao planejamento tático integrado do transporte ferroviário (fluxo de vagões carregados) realizado com diferentes configurações de trens com tamanhos preestabelecidos. Deverão ser consideradas tanto as operações em vias de circulação quanto em pátio (visão integrada), para determinar a distribuição da carga entre trens e as frequências das diversas opções de trens, a partir de uma demanda de transporte, restrições e uma função objetivo.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- a) desenvolver um modelo matemático de otimização para aplicação em uma ferrovia brasileira, focando-se os trens dedicados ao transporte de minério no sentido exportação;
- b) aprimorar um modelo preliminar desenvolvido para o trecho principal da ferrovia estudada, incluindo a interação entre trens e o efeito de congestionamento nos pátios de manobra e nas vias de circulação;
- c) determinar as frequências dos trens típicos a serem operados, levando-se em conta a proporção adequada entre trens longos e curtos;
- d) determinar para cada mina:
 - as sequências de trens típicos e operações até o destino da carga; e
 - os volumes de cargas movimentados em cada sequência.
- e) avaliar as soluções indicadas para um cenário de demanda sob diferentes critérios de otimização.

1.2 METODOLOGIA

Inicialmente fez-se uma pesquisa exploratória de modelos para planejamento de fluxos em redes de transporte, quando foram identificados modelos concebidos para problemas semelhantes ao descrito, independentemente do modo de transporte. Segundo Crainic (2003), o problema descrito é típico do nível tático e pertence a uma categoria denominada *planejamento da rede de serviços* (de transporte) ou *service network design*.

Dentre os modelos pesquisados, foi identificado um, cuja formulação está disponível tanto para uma visão genérica de transporte (CRAINIC, 2003; CRAINIC; ROUSSEAU, 1986), quanto para uma visão ferroviária (CRAINIC; FERLAND; ROUSSEAU, 1984). Ambas as abordagens possuem o mesmo embasamento conceitual, o qual se mostrou adequado para este trabalho, com adaptações. Outros trabalhos encontrados na literatura (KEATON, 1989; HAGHANI, 1989; MARÍN; SALMERÓN, 1996) tratam o mesmo tipo de problema e citam o modelo de Crainic, Ferland e Rousseau (1984) como referência.

A adoção da abordagem de Crainic, Ferland e Rousseau (1984) deveu-se ao fato de sua conceituação para a rede de serviços de trens ter se mostrado facilmente aplicável ao transporte de minério. Foi ainda o único modelo que evidenciou uma forma de modelagem dos tempos em pátios, a qual pôde ser adaptada para a realidade de trens de minério com tamanhos preestabelecidos. Além disto, a abordagem considerou o congestionamento tanto em vias de circulação quanto em pátios de manobra, o que nem sempre foi verificado nos demais trabalhos pesquisados.

Apesar da adequação conceitual para a ferrovia aqui considerada, a abordagem de Crainic Ferland e Rousseau (1984) foi concebida com enfoque abrangente para fluxos de vagões com carga geral numa visão multiproduto, onde cada trem típico pode assumir tamanho variável, tornando a solução mais difícil que a do problema do transporte de minério, além de exigir um processo iterativo para solução.

Apesar de mais restrito, o problema no caso do minério de ferro resultou em uma formulação não linear inteira, o que exigiu método de solução robusto o suficiente de forma a gerar solução em tempo aceitável, além de permitir avaliar se as soluções

geradas estavam adequadas (distinção entre ótimos locais e global). Para isto, foi identificado um aplicativo computacional disponível no mercado (GAU; SCHRAGE, 2003), que permitiu solucionar o problema de forma a atender aos requisitos mencionados.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O trabalho está dividido em seis capítulos.

No capítulo dois, apresenta-se a revisão bibliográfica. São pesquisados modelos de planejamento sob um enfoque de otimização e aspectos específicos relacionados ao problema aqui tratado.

No capítulo três, a descrição do problema é feita no contexto da aplicação à ferrovia considerada. Para isto, discute-se o transporte de minério e carvão na ferrovia, características operacionais da malha, tipos de trens praticados e questões relacionadas ao planejamento dos trens.

O capítulo quatro é dedicado à apresentação do modelo desenvolvido para a ferrovia, levando-se em conta o embasamento teórico discutido no capítulo dois, aplicado ao contexto do capítulo três.

No capítulo cinco são feitas a análise e a discussão dos resultados a partir de diferentes abordagens para a função objetivo, em um dado cenário de demanda de transporte.

Por fim, as conclusões são apresentadas no capítulo seis.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A estruturação da revisão bibliográfica está mostrada na Figura 1 e abordou primeiramente aspectos fundamentais relacionados à natureza e solução de problemas de otimização. Em seguida, a pesquisa concentrou-se na modelagem de fluxos em redes e no planejamento de redes de serviços de transportes em geral. Por fim, considerou-se o modo ferroviário, com a identificação dos problemas típicos de planejamento do transporte, conceitos e modelagem no nível tático.

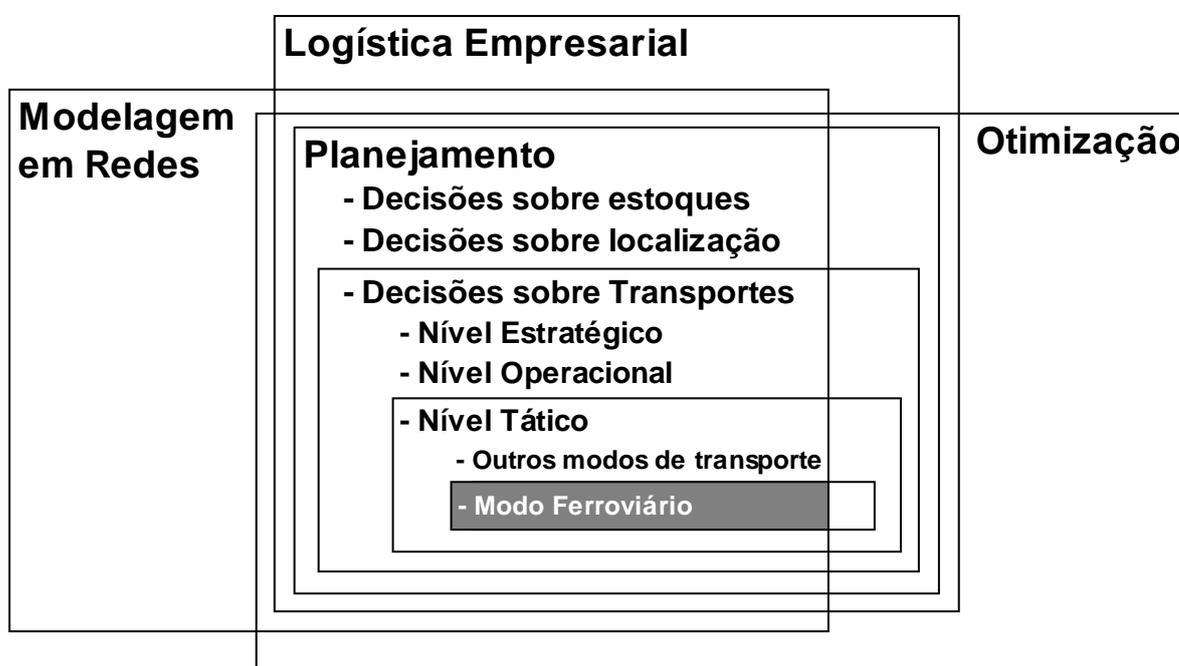


Figura 1: Estruturação da revisão bibliográfica

2.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO

A literatura na área de otimização é muito vasta e pretende-se aqui apenas apontar considerações importantes sobre algumas categorias de problemas de otimização relacionadas à aplicação aqui tratada.

Segundo Ragsdale (2007), o objetivo em um problema de otimização é matematicamente representado através de uma função objetivo cujo formato geral está representado na expressão (1):

$$\text{Maximizar (ou minimizar): } f_o(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

As variáveis x_1, x_2, \dots, x_n são denominadas variáveis de decisão, as quais estão sujeitas a restrições cujo formato geral está representado nas expressões (2) a (4):

$$f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq b_1 \quad (2)$$

:

$$f_k(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq b_k \quad (3)$$

:

$$f_m(x_1, x_2, \dots, x_n) = b_m \quad (4)$$

O propósito em tais problemas é encontrar valores para as variáveis de decisão que maximizem ou minimizem o valor da função objetivo (solução ótima), satisfazendo ao mesmo tempo todas as restrições.

Um conjunto de valores especificados para cada variável de decisão de forma a satisfazer todas as restrições constitui uma solução viável. O conjunto de todas as soluções viáveis é denominado região viável.

Modelos de otimização pertencem a uma categoria de modelos denominados prescritivos, pois podem ser usados pelas organizações para “prescrever” as condições que as permitam alcançar seus objetivos da melhor forma possível.

2.1.1 Problemas de Programação Linear (PPL)

Tais problemas caracterizam-se por apresentar todas as funções (1) a (4) na forma linear. Num PPL, a região viável é um conjunto convexo¹. No caso de um PPL de minimização, uma solução ótima é um ponto na região viável que conduz ao menor valor possível da função objetivo (WINSTON, 2004). Com base em Goldberg e Luna (2000, p. 562), pode-se concluir que se tal valor mínimo existe, então pelo menos uma solução ótima é um ponto extremo da região viável. Tal valor mínimo quando existe é único, podendo haver outras soluções que levem ao valor mínimo.

2.1.2 Problemas de Programação Inteira (PPI)

Em um problema de programação linear tradicional, a técnica mais eficiente de solução é conhecida como método simplex. Entretanto, conforme ressaltado por

¹ Maior detalhamento do conceito de convexidade aplicado a funções e conjuntos pode ser encontrado em Winston (2004) e Goldberg e Luna (2000).

Ragsdale (2007), o acréscimo de uma simples restrição obrigando as variáveis de decisão a assumirem valores inteiros leva a um problema de programação linear inteira (PPLI), cujo grau de dificuldade aumenta consideravelmente em relação ao PPL. A solução do problema na versão relaxada (sem restrição inteira) e o posterior arredondamento dos valores obtidos podem levar a soluções não viáveis. Além disto, mesmo que a solução seja viável, não há garantia de que seja ótima.

Hillier e Lieberman (1988, p. 697) destacam que embora PPLs limitados tenham um número finito de soluções viáveis, a quantidade de soluções pode ser demasiadamente grande, tornando a busca da solução ótima pela enumeração exaustiva das soluções um processo muito demorado e, portanto, impraticável. Neste contexto, o método *branch-and-bound* é citado como boa opção para solucionar o problema, na medida em que permite chegar à solução ótima pela enumeração inteligente de parte das soluções viáveis sem, no entanto, recorrer a uma busca exaustiva. Vale mencionar que o método *branch-and-bound* não se restringe apenas aos problemas de programação inteira.

O tempo de solução em um PPL cresce fortemente com o aumento do número de variáveis, mas pode ser reduzido na medida em que cresce o número de restrições. A qualidade da formulação do problema é outro ponto de atenção, podendo ser fator decisivo na obtenção (ou não) da solução (LINDO SYSTEMS INC, 2006, p. 274).

2.1.3 Problemas de Programação Não Linear (PPNL)

Conforme Ragsdale (2007), a principal diferença entre PPLs e PPNLs é que um PPNL pode possuir função objetivo não linear e/ou uma ou mais restrições não lineares. Além disto, PPNLs podem apresentar múltiplos ótimos locais.

Um ponto pertencente à região viável é considerado um ótimo local quando nenhum outro ponto em sua vizinhança produz resultado melhor na função objetivo. Um ponto é considerado um ótimo global quando nenhum outro ponto da região viável produz resultado melhor na função objetivo. Todo ótimo global é um ótimo local, mas nem sempre o inverso é verdadeiro.

Segundo Pillo e Palagi (2002), se a função objetivo é convexa e se a região viável é convexa, então tem-se um problema convexo e, neste caso, se houver um ótimo local, este ótimo é global.

PPLs viáveis são convexas. Já os PPNLs viáveis podem ser convexas ou não. Ao contrário dos PPLs, mesmo que o PPNL seja convexo, sua solução ótima não será necessariamente um ponto extremo da região viável e poderá inclusive situar-se no interior da região viável. Problemas não convexas podem possuir múltiplos ótimos locais, tornando mais difícil a busca do ótimo global.

Segundo Ragsdale (2007), as características dos PPNLs exigiram algoritmos diferentes dos utilizados para PPLs. Tais algoritmos, embora desenvolvidos especificamente para PPNLs, frequentemente são falhos na obtenção do ótimo global em problemas não convexas, e o processo de busca pode terminar em um ótimo local que não seja um ótimo global. Em tais casos, o ótimo local encontrado no processo de busca depende da solução inicial adotada (ponto de partida) e é difícil saber a real “distância” entre o ótimo local encontrado e o ótimo global. Por esta razão, pode ser aconselhável resolver o problema diversas vezes a partir de diferentes soluções iniciais, de forma a comparar os resultados finais obtidos. Esta situação está ilustrada na Figura 2, onde o ótimo local representado pelo ponto C foi obtido usando-se o ponto A como solução inicial. O ótimo global está localizado no ponto G e foi obtido a partir da solução inicial representada pelo ponto D.

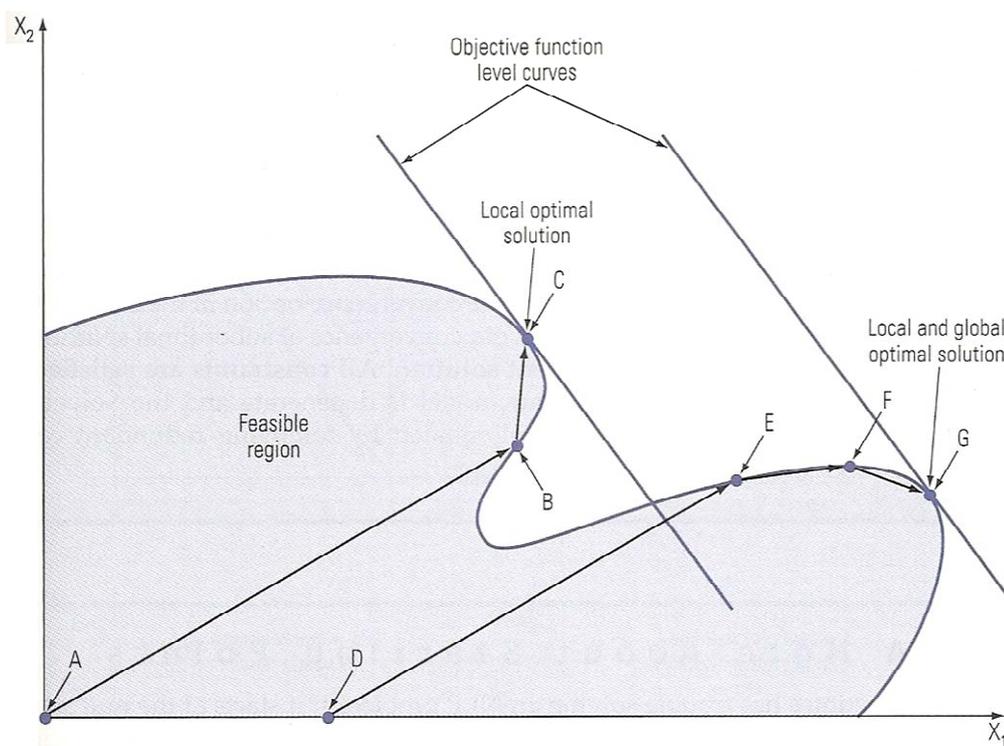


Figura 2: Região viável não convexa, com ótimos local e global

Fonte: Ragsdale (2007, p. 343).

2.2 TEORIA DAS FILAS

A modelagem de sistemas com o auxílio de teoria das filas é aplicada frequentemente para avaliações de capacidade em diversos tipos de sistemas, incluindo sistemas de transporte, e pode subsidiar a formulação de modelos para decisões nos níveis estratégico, tático e operacional.

Se o sistema estiver bem dimensionado para a demanda, isto é, se o número de recursos disponíveis (atendentes, equipamentos, etc) e os tempos de processamento estiverem adequados para a taxa de chegada dos clientes (veículos, pessoas, trens, etc), então a taxa de utilização do sistema e os tempos de espera se manterão dentro de limites aceitáveis.

Segundo Anderson, Sweeney e Williams (2005), modelos de filas são adequados para representar sistemas operando em regime permanente.

Prado (2004) apresenta os principais modelos de filas e suas aplicações práticas, ressaltando que a abordagem matemática por tais modelos pressupõe que o sistema seja estável. Sistemas estáveis são definidos como aqueles em que existe estabilidade no fluxo de chegada e no processo de atendimento, ou seja, o ritmo médio de chegada λ dos clientes ao sistema (clientes por unidade de tempo) e o ritmo médio de atendimento μ (clientes por unidade de tempo) por cada servidor são constantes. Outro pré-requisito para que um sistema possa ser considerado estável é que a capacidade de atendimento seja maior que o ritmo de chegada, ou seja: $\mu > \lambda$ (do contrário, haveria filas crescendo indefinidamente).

Dentre os modelos de filas existentes, o mais elementar e conhecido é o M/M/c, válido para sistemas com c servidores, população infinita e fila única, onde tanto o ritmo médio de chegada λ dos clientes como o ritmo médio de atendimento μ seguem distribuição de Poisson.

Conforme destacado por Prado (2004), o modelo M/M/c frequentemente não dimensiona filas de forma correta para situações reais. No entanto, tem grande aplicação teórica e mostra-se bastante útil na melhor compreensão do processo de geração de filas. A ressalva quanto ao modelo M/M/c se deve principalmente ao fato das taxas de atendimento dos processos reais normalmente não seguirem a distribuição de Poisson. Como consequência, o modelo M/M/c é mais conservador,

pois tende a superdimensionar o sistema, projetando filas maiores do que as que seriam verificadas na prática. Em outras palavras, para um dado tempo de fila, o número de servidores necessários em um sistema M/M/c seria maior que o total de servidores em um sistema real. No entanto, para baixos valores na taxa de utilização, os resultados do modelo M/M/c e os obtidos com outras distribuições ficam bastante próximos.

A principal vantagem do uso de teoria das filas e em particular o modelo M/M/c é o fato da formulação relativamente simples permitir efetuar análises mais rápidas e diretas do que aquelas feitas por outras abordagens como, por exemplo, uso de simulação ou modelos de filas mais sofisticados.

2.3 MODELAGEM DE FLUXOS EM REDES

As redes estão presentes no nosso dia a dia nas mais variadas formas, de maneira que a sua modelagem pode representar tanto redes físicas ou não, aplicando-se conceitos da teoria de grafos, conforme pode ser visto em Goldberg e Luna (2000) e Ahuja, Magnanti e Orlin (1993). Algumas definições importantes são:

*Grafo*²: “[...] estrutura de abstração que representa um conjunto de elementos denominados *nós* [também denominados *vértices*] e suas relações de interdependência ou *arestas*”.

*Grafo direcionado*³: grafo em que “[...] o sentido das ligações entre os vértices é importante. Nesse caso normalmente as arestas são chamadas por *arcos*”.

*Rede*⁴: grafo direcionado atravessado por um fluxo que circula através de suas arestas.

Ahuja, Magnanti e Orlin (1993) representam um grafo direcionado por $G = (N, A)$ como um conjunto N de n nós e um conjunto A de a arcos. Cada arco une nós adjacentes i e j , constituindo-se um par ordenado de elementos distintos de N . Nos grafos não direcionados, os nós são unidos por *arestas*, as quais são pares não ordenados de nós. As redes são frequentemente representadas por grafos em que

² GOLDBARG, M.C.; LUNA, H.P.L. *Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos*. 2. tiragem. Rio de Janeiro: Ed. Campus 2000. 641 p. p. 571.

³ Ibid., p. 574.

⁴ Ibid., p. 578.

se associam valores numéricos aos nós, arcos e arestas⁵. Um arco (i,j) indica a possibilidade de um fluxo x_{ij} partindo do nó i e chegando ao nó j . Uma aresta entre os nós i e j pode ser representada por (i,j) ou (j,i) .

Tratando-se de redes físicas, os arcos podem ser comparados a vias de mão única por onde escoam determinados fluxos; já as arestas, podem ser comparadas a vias de mão dupla, ou ainda representar conexões em que a direção não é um fator relevante. Arcos e arestas podem representar rodovias, tubulações, cabos, rotas aéreas, entre outros. Valores numéricos a eles associados podem indicar capacidades de fluxo, distâncias, custos por unidade de fluxo, etc. Os nós, por sua vez, podem representar terminais de transporte, armazéns, estações de bombeamento, torres de transmissão, etc e apresentar valores numéricos para simples identificação ou para indicar níveis de oferta e demanda de fluxos.

Grafos também possuem aplicação para a representação de redes não físicas. Um exemplo disto é no gerenciamento de projetos, onde se tomam decisões levando-se em conta diversas tarefas com diferentes tempos de duração, conectadas entre si por relações de precedência. Neste caso, os nós podem assumir valores identificando as tarefas que representam. Os arcos interligam tarefas (nós) e assumem valores para indicar a duração da tarefa precedente (nó de origem).

Goldbarg e Luna (2000, p. 578) indicam que normalmente as redes possuem dois nós que se destacam: o nó *fonte* e o nó *sumidouro*. Mesmo que a rede possua estes nós em maior quantidade, “[...] qualquer tipo de rede pode ser reduzida a uma rede com apenas um nó fonte e um nó sumidouro, mesmo que artificialmente configurados [...]”. Uma representação típica de rede está mostrada na Figura 3, em que os nós são representados por círculos e os arcos pelas setas, as quais indicam o sentido convencional dos fluxos.

⁵ Embora Goldbarg e Luna (2000) restrinjam o conceito de redes a representações por grafos direcionados, Ahuja, Magnanti e Orlin (1993) utilizam o termo *redes não direcionadas* para os casos de grafos não direcionados.

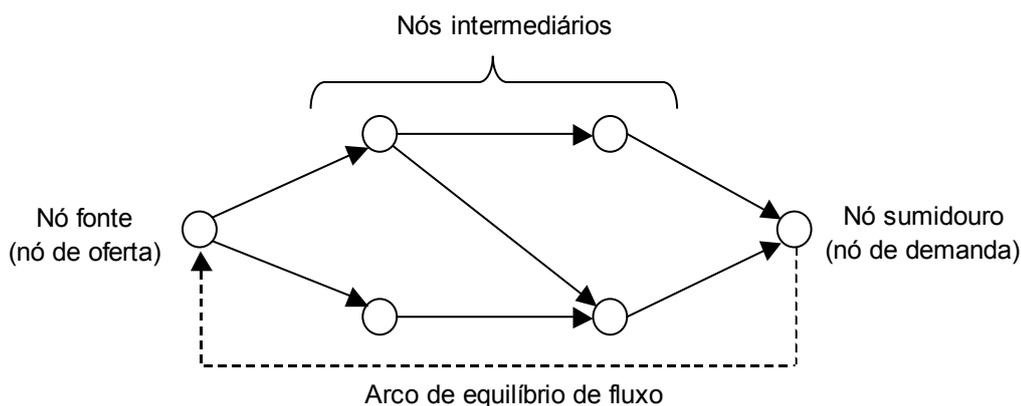


Figura 3: Representação genérica típica de uma rede

Fonte: Goldberg e Luna (2000, p. 578).

Nota: adaptado pelo autor.

Problemas de fluxos em redes possuem muitas variações, porém os objetivos frequentemente estão relacionados à minimização do custo total do fluxo na rede.

A conceituação de todas as categorias de problemas está além do objetivo deste trabalho, de forma que será discutido a seguir o problema do fluxo de custo mínimo, que é o caso mais tradicional e que está diretamente relacionado ao problema aqui tratado, com base em Ahuja, Magnanti e Orlin (1993) e Ragsdale (2007).

2.3.1 Problema do Fluxo de Custo Mínimo

Este é o principal problema de fluxo em redes, do qual derivam diversos outros. Considere-se um grafo direcionado $G = (N, A)$ representando uma rede de n nós e a arcos, por onde flui um determinado tipo de entidade ou produto. Cada arco (i,j) , comportará um fluxo x_{ij} , (unidades movimentadas), o qual estará sujeito a um custo unitário c_{ij} . O custo varia linearmente com o fluxo, de forma que o custo total do fluxo no arco (i,j) será $c_{ij} \cdot x_{ij}$. O objetivo deste problema é determinar o fluxo x_{ij} em cada arco (variável de decisão), de forma a minimizar o custo total dos fluxos em todos os arcos da rede. O fluxo na rede decorre da existência de ofertas e demandas de fluxo concentradas em alguns nós. Assim, para cada nó $i \in N$, associa-se um valor b_i representando o total de oferta ou demanda por fluxo no nó. Se $b_i > 0$, i é denominado um *nó de oferta*, e nele há mais fluxo saindo que entrando (fluxo

resultante é positivo)⁶. Para $b_i < 0$, tem-se um *nó de demanda*, onde há mais fluxo entrando que saindo. Se o fluxo resultante no nó for nulo, tem-se $b_i = 0$, e o nó é denominado nó de *baldeação* ou nó de *transshipment*.

A formulação matemática deste problema é :

$$\text{Minimizar } F = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot x_{ij}, \text{ sendo } i \text{ e } j \in N \quad (5)$$

$$\text{sujeito a } \sum_{j=1}^n x_{ij} - \sum_{j=1}^n x_{ji} = b_i, \text{ para cada } i \in N \quad (6)$$

$$l_{ij} \leq x_{ij} \leq u_{ij}, \text{ para cada } (i,j) \in A \quad (7)$$

No problema acima, tem-se para cada arco (i,j) um limite inferior l_{ij} e um limite superior u_{ij} admissíveis para o fluxo. Normalmente o limite inferior é nulo.

A expressão (6) é uma restrição indicando o balanço de massa do fluxo nos nós.

2.4 MODELAGEM DE FLUXOS PARA PLANEJAMENTO EM REDES DE TRANSPORTE DE CARGA

O planejamento de redes de transporte tem sido amplamente estudado e nos últimos anos foi beneficiado pela rápida evolução dos recursos computacionais, permitindo modelar e solucionar problemas mais complexos em menor tempo.

O trabalho de Magnanti e Golden (1978) categoriza problemas de redes de transportes de modo geral e apresenta a formulação para cada caso. Percebe-se um nítido foco no uso de algoritmos adequados para maior eficácia na implementação dos modelos.

Crainic (2003) apresenta o estado da arte em modelos de otimização para transporte de carga em longa distância. Trata-se de uma revisão mais ampla e recente das principais questões relacionadas ao planejamento e gestão do transporte, sem se restringir a um modo específico de transporte. São aplicadas técnicas de pesquisa operacional para decisões em transportes e discutidas modelagens para grande leque de problemas de âmbito estratégico, tático e operacional.

⁶ Alguns autores usam convenção contrária, como Ragsdale (2007).

Problemas de natureza estratégica são descritos como sendo inerentes a decisões da alta administração, com foco no longo prazo e frequentemente envolvendo altos investimentos. Exemplos citados por Crainic (2003) envolvem a localização de terminais, o planejamento da malha viária física, aquisição de recursos e a política tarifária.

O âmbito tático considera problemas com horizonte de médio prazo. São decisões normalmente relacionadas à forma como a rede do serviço de transportes será operada e onde há oportunidades para otimização do desempenho do sistema. Exemplos citados envolvem a programação do serviço, a definição das rotas a operar, os roteamentos de veículos e, quando visto de uma forma mais abrangente, o reposicionamento da frota⁷, (distribuição dos veículos vazios ou unidades de tração) no próximo período de planejamento.

No âmbito operacional, o fator tempo tem grande importância e consideram-se decisões de curto prazo num ambiente dinâmico, exigindo-se conhecimento detalhado e monitoramento mais frequente do sistema. Decisões típicas do nível operacional incluem o roteamento e despacho de veículos, a implementação e ajustes na programação de serviços, de equipes e atividades de manutenção, o reposicionamento de veículos vazios nos terminais e a alocação de locomotivas ou unidades de tração aos trens e serviços.

Note-se que o termo *roteamento*⁸ de veículos é citado tanto no nível tático quanto operacional. A diferença reside basicamente no horizonte de tempo da tomada de decisão. Trata-se de estabelecer, ao menor custo possível, um roteiro para os veículos ao longo de uma rede de transportes, de forma a atender às necessidades dos clientes distribuídos na rede, onde há vários pontos de carga e descarga. Existem muitas variações para este problema, e Ballou (2006) reduz sua classificação a três modelos básicos: a rota possui um ponto de origem diferente do ponto de destino; existem várias rotas com pontos de origem e destino distintos; a rota possui pontos de origem e destino coincidentes.

Goldberg e Luna (2000, p. 441) apresentam uma classificação mais detalhada para o problema do roteamento de veículos e citam que é basicamente um problema *espacial*. Entretanto, o nível de dificuldade do planejamento da frota aumenta

⁷ Também conhecido como *fleet repositioning*.

⁸ Também chamado *routing* ou *roteirização*.

quando é preciso levar em conta o fator *tempo*. Neste caso, deve-se planejar o roteamento e o *sequenciamento*⁹ dos veículos, o qual consiste em estabelecer uma sequência adequada das operações de carga e descarga associadas às chegadas e partidas dos veículos, bem como a restrições de tempo.

Assim como o roteamento, problemas de sequenciamento (ou programação) e distribuição de veículos podem envolver decisões tanto de nível tático quanto operacional, dependendo do horizonte de análise.

2.4.1 Planejamento da Rede de Serviços de Transporte

Os conceitos apresentados a seguir foram descritos por Crainic (2003) e serão aplicados para a compreensão e modelagem do problema tratado nesta dissertação.

Segundo Crainic (2003), decisões sobre a forma como os serviços de transporte serão oferecidos são categorizadas no nível tático, em que se busca um equilíbrio entre custos baixos para as empresas e adequado nível de serviço oferecido aos clientes. Trata-se de um planejamento mais conhecido como *service network design*, que aqui será chamado *planejamento da rede de serviços* (de transporte). Este tipo de decisão possui papel importante nas empresas que operam sistemas de consolidação de cargas, onde um veículo ou comboio atende a vários clientes e são utilizados terminais, onde as cargas são classificadas, redirecionadas, reagrupadas ou divididas. Comboios (ou trens, no caso de ferrovias) são formados e/ou separados nos terminais.

Uma rede de serviços permite compreender as várias formas de se operar um sistema, o qual pode se utilizar de uma rede física. A representação gráfica de uma rede física tende a ser mais simples que a de uma rede de serviços. Crainic (2003, p. 480) utiliza a Figura 4 para representar uma rede de sete serviços diferentes que interagem com cinco terminais, exemplificando diferentes alternativas para movimentação das cargas. Assim, para mover um produto do terminal A ao terminal D, é possível fazê-lo diretamente, optando-se por dois serviços alternativos S1 ou S2. Outra opção é utilizar o serviço S3, que inclui uma parada no terminal C, onde outros produtos são deixados ou são agregados para seguir rumo ao terminal D. Pode-se ainda utilizar o serviço S4, que deixa o produto no terminal C antes de

⁹ Também chamado *scheduling* ou *programação*.

seguir para o terminal E. No terminal C, o produto pode ser transferido para o serviço S3 ou S5 rumo ao terminal D, seguindo inclusive juntamente com produtos do terminal B transferidos do serviço S6.

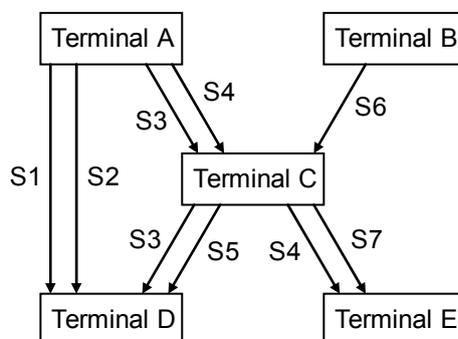


Figura 4: Rede de serviços

Fonte: Crainic (2003, p. 480)

Serviços distintos interligando os mesmos terminais (arcos paralelos ligando um par de nós) podem representar modos de transporte diferentes ou não. No caso de um único modo de transporte, a distinção pode se referir, por exemplo, ao tempo de transporte e ao custo de cada serviço (CRAINIC, 2003, p. 467).

Para uma *rota* física ligando um terminal de origem a um terminal de destino da carga, pode haver diferentes *itinerários* possíveis.

Itinerário é definido como: *a sequência dos serviços utilizados e das operações nos terminais, desde a origem até o destino final da carga*.

Dependendo do itinerário escolhido, o tempo total da origem ao destino da carga poderá variar em função não somente das distâncias percorridas, mas também das operações que ocorrem nos terminais. Outro fator que afeta o tempo é a frequência com que são oferecidos os diversos serviços. A dosagem da frequência dos serviços e das diversas operações nos terminais afeta diretamente os níveis de congestionamento tanto nos terminais quanto nas vias de conexão entre eles.

Portanto, o planejamento de nível tático envolve decisões inerentes ao planejamento da rede de serviços, tais como: a definição das rotas (itinerários) que serão oferecidas, a frequência dos serviços, a distribuição do fluxo de produtos entre as rotas oferecidas, as regras de consolidação nos terminais, e a estratégia de realocação dos veículos vazios no próximo horizonte de planejamento.

Crainic (2003) classifica os modelos para planejamento da rede de serviços em dois grandes grupos:

- a) modelos para o planejamento dinâmico da rede de serviços; e
- b) modelos para o planejamento de *frequência* na rede de serviços.

Modelos para o planejamento dinâmico da rede de serviços possuem características mais próximas do contexto operacional, focando a *programação (schedule)* dos serviços. Conforme exposto na seção 2.4, a dimensão *tempo* é inerente aos problemas de programação. Este grupo de modelos normalmente utiliza uma rede *espaço-tempo* para representar o sistema durante vários períodos de tempo.

O problema objeto desta dissertação pertence ao segundo grupo de modelos. O simples fato de envolver a decisão da frequência de serviços indica que a dimensão tempo é considerada e, portanto, não deixa de ser um problema de programação, porém em nível mais agregado que o primeiro grupo de modelos. Como resultado, gera-se um plano de transporte que serve como guia para as operações do dia a dia. Estes modelos permitem avaliar cenários formulados na etapa de planejamento estratégico e traduzem a rede de serviços como um ambiente *estático*.

Uma formulação para o planejamento de *frequência* na rede de serviços é apresentada por Crainic (2003, p. 484), baseada no modelo proposto por Crainic e Rousseau (1986), desenvolvida para redes de transporte multiproduto e multimodal: para cada *grupo de carga*¹⁰ $p \in P$, busca-se atender sua demanda de transporte ω^p ao menor custo total possível e respeitando restrições inerentes ao sistema.

Um grupo de carga é especificado por $p = (\text{tipo de produto, origem, destino})$, e seu produto pode ser escoado por diferentes itinerários até o destino final.

A rede de serviços analisada é representada por um grafo $G = (N, S)$, onde os nós representam os terminais e os arcos correspondem aos serviços oferecidos, conforme exemplificado na Figura 4. Cada serviço $s \in S$, possui uma rota na rede física, ligando terminais de origem e destino do serviço, podendo passar por diversos terminais intermediários. Levando-se em conta os diversos itinerários $l \in L^p$ disponíveis para atender ao grupo de carga p , o volume de carga movimentado através do itinerário $l \in L^p$ será representado por h_l^p .

¹⁰ Também conhecido como *traffic class*.

São duas as variáveis de decisão no modelo para planejamento de *frequência* na rede de serviços: a frequência y_s para cada serviço e os volumes h_i^p movimentados nos diversos itinerários dentro do período analisado.

A formulação desenvolvida para o custo generalizado de transporte no sistema leva em conta a possibilidade de não linearidades decorrentes, por exemplo, do congestionamento nas vias e terminais. Este congestionamento pode ser traduzido em atrasos cada vez maiores na medida em que aumenta o fluxo de cargas em instalações de capacidade limitada, aumentando o custo.

Segundo Crainic (2003), a formulação citada acima possui estrutura não linear, inteira-mista e ainda não há método desenvolvido para gerar uma solução exata. Crainic e Rousseau (1986) detalham o algoritmo usado para a solução do modelo acima, que é a versão generalizada para o problema do planejamento da rede de serviços, evoluído a partir do estudo específico do caso ferroviário, feito por Crainic, Ferland e Rousseau (1984), cujo enfoque maior foi na modelagem da função objetivo.

O algoritmo proposto por Crainic e Rousseau (1986) divide o problema em dois subproblemas solucionados de forma cíclica e alternada: inicialmente todas as frequências dos serviços são preestabelecidas com valores relativamente altos (valores fixos iniciais), traduzindo um nível de serviço inicial. Fixada a frequência de serviços (y_s), otimiza-se o fluxo a ser escoado para cada grupo de carga entre os itinerários disponíveis (h_i^p). Em seguida, fixa-se a distribuição da carga (h_i^p) encontrada anteriormente e modifica-se a frequência dos serviços, de forma a melhorar a função objetivo. A nova frequência de serviços encontrada é então fixada e reinicia-se o ciclo até que as melhorias possíveis na função objetivo sejam menores que um valor preestabelecido.

Segundo Powell (2002, p. 688), “Problemas de planejamento da rede de serviços são talvez os mais difíceis problemas em logística (até mais difíceis que problemas de roteamento de veículos) [...]” e cita o trabalho de Crainic e Rousseau (1986) como excelente revisão para a versão estática de tais problemas.

Além da formulação acima, há também outros esforços para desenvolver modelos de rede de serviços, tanto em ambientes estáticos quanto dinâmicos. Nota-se que

simplificações são incorporadas em muitos modelos, diante da complexidade dos sistemas e dos problemas tratados.

O planejamento tático específico para ferrovias será tratado na seção 2.7.

2.5 PROBLEMAS CLÁSSICOS NO PLANEJAMENTO DO TRANSPORTE FERROVIÁRIO

Embora não seja recente, o trabalho de Assad (1980a) é uma referência muito citada no tocante ao desenvolvimento de modelos para planejamento do transporte *ferroviário*. Conceitos específicos do modo ferroviário são apresentados e discutidos no contexto de sistemas de transporte. Além disso, estudos e modelos para os problemas tipicamente ferroviários são agrupados e categorizados, permitindo uma visão abrangente das decisões inerentes ao modo.

Newman, Nozick e Yano (2002) oferecem uma visão abrangente dos problemas de otimização no modo ferroviário e uma revisão de literatura mais recente da modelagem dos diversos tipos de problemas.

No transporte ferroviário de cargas, frequentemente os vagões são reorganizados e *classificados* em pátios de manobra intermediários entre a origem e o destino da carga. Nesses pátios, vagões de diferentes procedências podem ser agrupados em um *bloco*¹¹ e alocados a um mesmo trem para percorrerem trajetos comuns até novos pátios adiante, onde operações de reclassificação serão necessárias para separar vagões com destinos diferentes. Tal procedimento de consolidação permite maior aproveitamento da capacidade de tração das locomotivas e contribui para a redução do número de trens necessários ao transporte. A definição dos vagões a serem agrupados em um bloco e os reagrupamentos possíveis ao longo da viagem constitui o *problema da blocagem*¹².

Com relação a decisões de roteamento, podem ser consideradas sob dois aspectos: roteamento dos trens e roteamento da carga¹³, mais explicitamente descritas por Crainic, Ferland e Rousseau (1984). Enquanto o roteamento dos trens especifica as rotas dos trens, no caso das cargas trata de definir a sequência de trens a serem

¹¹ Grupo de vagões que se deslocam juntos, por uma ou mais partes da viagem.

¹² Ou *blocking problem*.

¹³ Ou *traffic routing*, aplicável a cada grupo de carga.

utilizados e as operações que deverão ser feitas nos pátios desde a origem até o destino da carga.

Decisões de roteamento e de blocagem estão fortemente inter-relacionadas, uma vez que diferentes grupos de carga (tipo de carga, origem, destino) compartilham um mesmo bloco em partes do trajeto da origem ao destino.

O *problema da programação dos trens* abrange o roteamento (dimensão espacial) e incorpora a dimensão tempo, o que pode ser feito de forma mais agregada (simples definição de frequências dos trens) ou detalhada, através do estabelecimento de uma grade com os horários de chegada e partida para sincronização dos movimentos dos trens nas diversas estações ou pátios ao longo da viagem (*timetable*).

Um recurso utilizado pelas ferrovias para a programação dos trens no tempo e espaço é o gráfico de trens, que permite visualizar a grade de trens e planejar os horários para cruzamento de trens em vias singelas, conforme exemplificado na Figura 5.

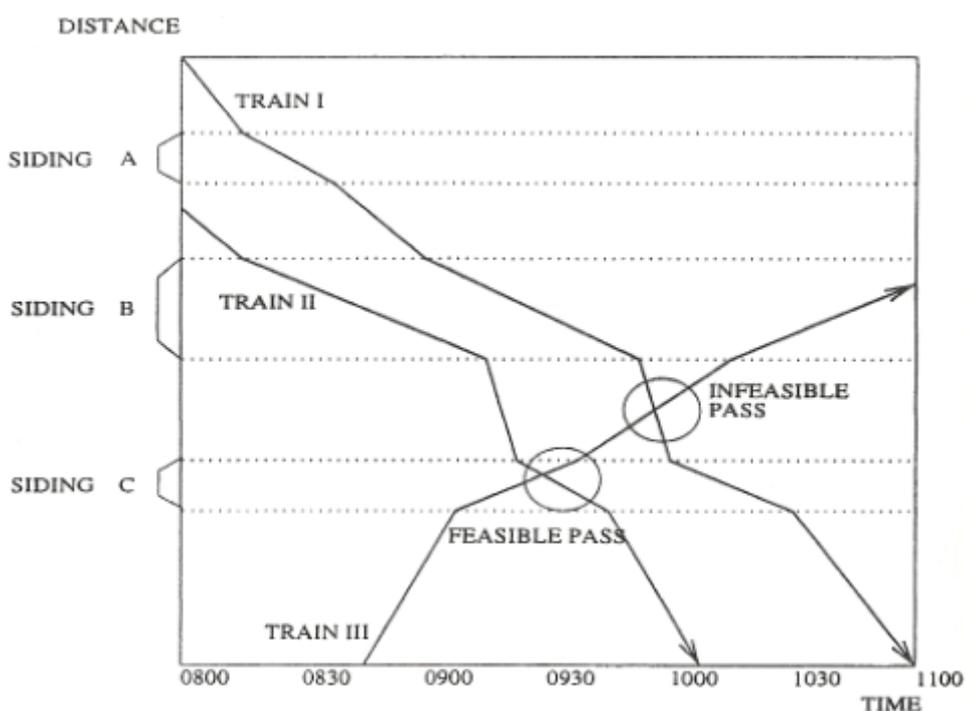


Figura 5: Gráfico de trens

Fonte: Newman, Nozick e Yano (2002, p. 708).

Formados os blocos, políticas, regras e restrições permitirão alocá-los aos trens programados, processo que constitui o *problema da formação de trens*¹⁴, estreitamente ligado aos problemas da blocagem e da programação dos trens. O problema da formação de trens é tratado por Jha, Ahuja e Şahin (2008) numa visão de curto prazo (planejamento diário) e com enfoque nos algoritmos de solução.

2.6 CATEGORIZAÇÃO DOS TEMPOS NO TRANSPORTE FERROVIÁRIO

Quanto ao tempo que os vagões permanecem nas diversas etapas ao longo da viagem, há várias formas possíveis de categorização e agrupamento, sendo a descrição a seguir decorrente das conceituações encontradas em Assad (1980a), Crainic, Ferland e Rousseau (1984) e Turnquist e Daskin (1982)¹⁵.

Tempo de classificação: corresponde ao tempo de processo do vagão no pátio, incluída a recepção, inspeções, manobras de blocagem e de formação do trem¹⁶.

Tempo de acúmulo: corresponde ao tempo de espera do vagão nos pátios, necessário para que o trem ou bloco atinja uma quantidade mínima de vagões necessária à partida do trem.

Tempo de conexão: corresponde ao tempo que o vagão necessita aguardar até o horário de partida do próximo trem que o transportará. Após a classificação e acúmulo dos vagões, os mesmos ainda estão sujeitos a atrasos diretamente relacionados aos horários de partida preestabelecidos dos trens.

Tempo de linha: está associado ao trem. Os fatores que mais afetam o tempo de linha são o tempo mínimo de viagem entre pátios e os atrasos sofridos pelo trem em decorrência de ultrapassagens, cruzamentos e congestionamentos.

Crainic, Ferland e Rousseau (1984) consideram ainda tempos de paradas do trem em pátios intermediários, para receber ou deixar vagões antes de chegar ao destino.

Segundo Brina (1988a p. 227), o tempo de permanência dos vagões em pátios e terminais é de cerca de 80% do tempo (apenas 20% em circulação).

¹⁴ Também conhecido como *train make-up problem* ou *block-to-train assignment problem*.

¹⁵ Turnquist e Daskin (1982) discutem exclusivamente tempos de classificação e de conexão.

¹⁶ Esta abrangência é adotada por Crainic, Ferland e Rousseau (1984), mas as operações citadas podem ser consideradas separadamente.

Assad (1980a), por sua vez, ressalta que boa parte do tempo de viagem dos vagões é gasta em operações nos pátios e terminais, e ao contrário do que ocorre no transporte de passageiros, no transporte de cargas as operações e critérios para formação dos trens nos pátios e terminais afetam fortemente a circulação dos trens, sendo a modelagem da interação entre pátios e circulação um desafio.

2.7 PLANEJAMENTO INTEGRADO DA REDE DE SERVIÇOS EM FERROVIAS

Dentre as categorias de modelos para o planejamento do transporte ferroviário citadas por Assad (1980a), um grupo denominado “modelos de redes ferroviárias” refere-se a modelos que buscam integrar atividades de linha (viagens) e pátio, de maneira a gerar decisões mais coordenadas, com vistas ao sistema como um todo. Isto implica em algumas simplificações e um nível mais agregado das informações. Tais modelos são denominados por Newman, Nozick e Yano (2002), como *modelos integrados* e normalmente focam o nível tático de decisão. Há também modelos táticos específicos para os problemas apresentados (programação, blocagem, roteamento, etc) porém com menor nível de integração das diferentes atividades.

Os trabalhos a seguir podem ser considerados como pertencentes a este grupo de modelos, em variados graus de integração:

Em Assad (1980b), o problema do roteamento e da formação de trens é tratado sob o ponto de vista de fluxo em redes e otimização combinatória, além de apresentar uma categorização hierárquica para os problemas ferroviários, no nível estratégico, tático e operacional. Os problemas abaixo são citados como típicos do nível tático em ferrovias:

- a) roteamento da carga, seleção dos trens a operar e definição de suas frequências;
- b) identificação de comprimentos adequados para os trens (trens curtos mais frequentes ou longos e menos frequentes);
- c) problema da formação do trem: quais blocos alocar a cada trem;
- d) problema da blocagem: definição dos blocos a serem formados nos pátios;

e) distribuição das manobras de classificação entre os diversos pátios da ferrovia, levando-se em conta as limitações de cada local.

Crainic, Ferland e Rousseau (1984) constitui a aplicação ferroviária para o planejamento de frequência em redes de serviços de transporte, cujo conceito para sistemas de transporte em geral foi apresentado na seção 2.4.1. No caso ferroviário, os serviços de transporte são *serviços de trens*. O modelo foi aplicado experimentalmente em uma grande ferrovia canadense com 107 nós e cerca de 7000 grupos de carga $p =$ (tipo de produto, origem, destino), gerando uma solução de alocação dos recursos para atendimento à demanda de transporte ao menor custo possível. São tratadas as decisões de nível tático descritas acima conforme Assad (1980b), além de considerar o congestionamento tanto nos pátios quanto nas vias de circulação. A formulação possui estrutura não linear, inteira-mista, em que a componente inteira refere-se à frequência de cada serviço e a componente não inteira refere-se ao fluxo de carga em cada itinerário. O congestionamento nos pátios foi modelado com o auxílio de teoria das filas (modelo M/M/1), ao passo que o congestionamento nas vias de circulação foi estimado a partir de curvas de tempos de viagem históricos na ferrovia em que o modelo foi aplicado. Foi necessário desenvolver uma heurística¹⁷ específica para solução do problema, face à grande dimensão da malha analisada e à natureza matemática do modelo, os quais inviabilizaram uma solução exata.

Keaton (1989), desenvolve um modelo para a mesma categoria de problemas, buscando minimizar o custo para atendimento da demanda de transporte e definindo quais terminais devem ser atendidos por conexões diretas de trens. O fluxo de vagões e conexões entre trens, incluindo as operações nos pátios intermediários são representados por grafos, em que frequências e operações preestabelecidas para os trens estão associadas a arcos específicos. A função objetivo é linear e o custo total inclui custos fixos dos trens, custos relacionados ao tempo dos vagões e custos das operações nos pátios. A formulação é inteira-mista e a decisão de operar trens com determinada frequência é definida por variáveis (0-1) associadas aos arcos. O fluxo de vagões entre terminais e nas operações entre trens nos terminais é a variável de decisão não inteira. Além da demanda a ser atendida, outras restrições são o

¹⁷ Segundo Goldbarb e Luna (2000, p.21), técnicas heurísticas são uma alternativa para obtenção de soluções não necessariamente ótimas, mas obtidas a partir de um processo de busca eficiente.

tamanho do trem e o número máximo de blocos formados nos pátios. O modelo desconsidera congestionamentos em pátios ou vias de circulação e são assumidos tempos médios para cada etapa da origem ao destino dos vagões. Embora a representação gráfica proposta facilite a compreensão do processo e dos fluxos, precisa ser definida para cada par origem-destino dos vagões. Tal aspecto é uma limitação, dado o amplo leque de frequências e combinações de conexões.

Haghani (1989), combina o problema tático de roteamento e formação de trens ao problema da distribuição de vagões vazios, cujas características operacionais levaram ao uso de uma rede espaço-tempo para modelagem do processo. O problema é de programação inteira-mista, sendo a função objetivo não linear e composta por uma série de funções de custo. Algumas destas funções consideram o efeito congestionamento, como o custo crescente de classificação com o fluxo de vagões nos pátios, e também o custo de viagem também diretamente proporcional ao fluxo de vagões entre terminais. Entretanto, são assumidos tempos fixos de viagem entre os terminais. As variáveis de decisão inteiras são o fluxo de locomotivas nos arcos da rede e as variáveis não inteiras correspondem aos fluxos de vagões vazios e carregados. As restrições são lineares e incluem conservação de fluxo nos nós, limitação do fluxo de vagões entre terminais, e alocação de locomotivas de forma a garantir o fluxo necessário de vagões vazios e carregados. Importante notar que a resposta do modelo indica o fluxo de vagões e locomotivas entre terminais para um dado intervalo de tempo, mas não estabelece a frequência dos trens, a qual pode variar para um dado fluxo de vagões e locomotivas. A dificuldade matemática para solução do problema exigiu o desenvolvimento de uma heurística própria.

Marín e Salmerón (1996) tratam o problema de definir as frequências dos serviços e o fluxo de carga em cada itinerário usando a mesma conceituação de Crainic, Ferland e Rousseau (1984), mas as variáveis de decisão são todas inteiras e são comparados os resultados obtidos por diferentes técnicas heurísticas. Os tempos de viagem são fixos e são estabelecidas restrições para o tamanho dos trens, fluxo de vagões nos terminais e atendimento da demanda. Como nos casos anteriores, conclui-se que a natureza matemática do problema aliada à aplicação em grandes malhas ferroviárias exige o uso de heurísticas, mas fica demonstrado que é possível

encontrar a solução exata pelo método *branch-and-bound* no caso de malhas ferroviárias de menor porte.

Das referências pesquisadas acima, o modelo específico que mais contribuiu para a formulação do problema no caso do transporte de minério de ferro foi o de Crainic Ferland e Rousseau (1984), desenvolvido com foco em trens de carga geral e que explorou o conceito de itinerário introduzido na seção 2.4.1, cerne da modelagem. A adequação do modelo ao presente trabalho deve-se principalmente à forma de tratar os tempos nos pátios intermediários, incluindo dois processos simultâneos: o efeito congestionamento (diretamente proporcional ao fluxo de vagões) e o tempo de espera para acúmulo de vagões (inversamente proporcional ao fluxo de vagões). O modelo assume tamanho variável do trem para uma dada frequência, com total de vagões/trem limitado a um patamar de referência acima do qual incorrem custos adicionais a título de penalidade. A questão do tamanho do trem exigiu portanto uma adequação da modelagem para o caso do minério de ferro (trens com tamanhos preestabelecidos), em que a frequência do trem está diretamente associada a um fluxo de vagões resultante.

Portanto, conforme mencionado na seção 1.2 (metodologia), a solução do problema para aplicação ao transporte de minério utilizou o embasamento conceitual de Crainic, Ferland e Rousseau (1984), que se mostrou adequado, mas cuja formulação precisou ser adaptada para trens com tamanhos preestabelecidos e num problema mais restrito.

A seguir, no capítulo três, a descrição do problema será feita no contexto do transporte de minério de ferro, para aplicação do modelo desenvolvido nesta dissertação.

3 PLANEJAMENTO E OPERAÇÃO DO TRANSPORTE DE MINÉRIO NA FERROVIA ANALISADA

A ferrovia em estudo é um dos elos da cadeia de suprimentos do minério de ferro e pertence a uma conhecida mineradora brasileira, a qual conta com três sistemas distribuídos geograficamente para produção e escoamento do minério de ferro. Cada sistema é constituído por três elementos-chave: minas, ferrovia e porto. Nem todas as minas são necessariamente de propriedade da mineradora.

3.1 A CADEIA DE SUPRIMENTOS DO MINÉRIO DE FERRO

O planejamento, a organização e o controle da produção estão presentes em cada elemento-chave do sistema considerado. Dado o elevado nível de interdependência entre as partes do sistema, tais atividades de gerenciamento devem ser conduzidas levando-se em conta um contexto mais amplo, sempre em busca da maior integração possível mina-ferrovia-porto. A cadeia de suprimentos do minério de ferro onde está inserida a ferrovia em estudo está representada na Figura 6.

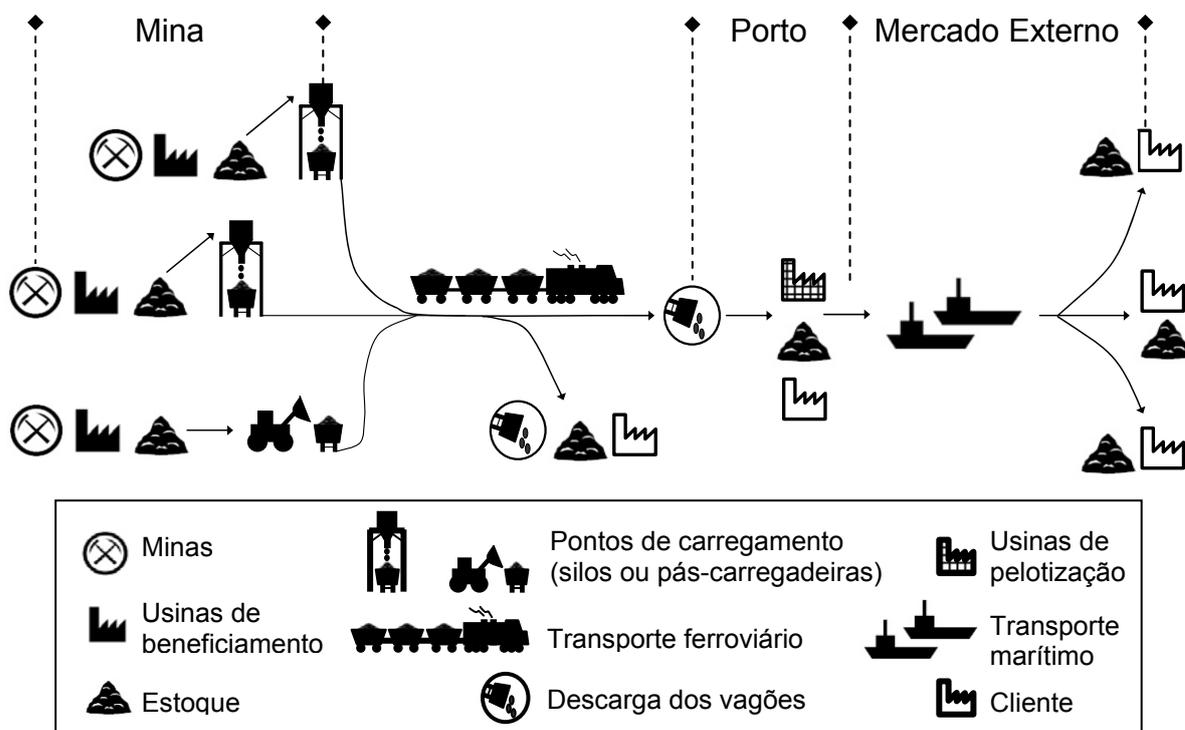


Figura 6: Cadeia de suprimentos do minério de ferro no sistema analisado

Nóbrega (1996) desenvolveu uma modelagem matemática para auxílio ao planejamento de curto prazo no que se refere à produção, transporte e embarque de minério no sistema integrado mina-ferrovia-porto aqui tratado. Segundo Nóbrega (1996), decisões de longo prazo são tomadas a partir de previsões sobre o mercado de minério de ferro, tendo como consequência a realocação, venda ou aquisição de ativos para adequação ao nível de demanda. O médio prazo leva em conta os níveis de produção, transporte e embarque de minério ao longo dos meses do ano, considerando possíveis variações sazonais de volume. A visão de curto prazo desdobra um programa mensal ou bimestral em um detalhamento diário. O nível de curtíssimo prazo fica limitado ao sequenciamento das operações dos equipamentos dentro de cada dia.

Considerando um horizonte de até quatro meses, o processo para atendimento da demanda por minério de ferro para embarque no porto tem início com a programação de uma sequência de navios que deverão ser atendidos. A demanda e o prazo de atendimento são negociados pela área comercial junto aos clientes e leva em conta a oferta disponível nas minas (cada mina produz diferentes tipos de minérios, com variações nas características físico-químicas). Os atendimentos a serem feitos indicam os tipos e quantidades de minério a serem fornecidos, e são traduzidos em demandas específicas para cada mina no intervalo de tempo considerado.

No curto prazo, o planejamento estabelece a sequência de quantidades e tipos de minérios que deverão ser entregues diariamente no porto, sendo parte da demanda entregue a clientes ao longo da ferrovia. Isto é feito levando-se em conta os prazos de atendimento e especificações de cada cliente.

Sob o ponto de vista do escoamento do produto minério de ferro, as operações nos três elementos-chave do sistema em estudo são descritas sucintamente a seguir:

A mineração abrange a extração do minério, além de sua movimentação, beneficiamento, estocagem e expedição para a ferrovia. A conexão com a ferrovia utiliza 11 pontos de carregamento distribuídos na malha ferroviária e localizados próximos às minas. A transferência do produto para os vagões nos pontos de carregamento é feita mediante o uso de silos ou de pás-carregadeiras.

O transporte ferroviário envolve as operações para carregamento dos vagões, manobras em pátios e as viagens dos pontos de carregamento até o porto, onde o minério é descarregado utilizando-se viradores de vagões. Uma parcela pequena dos vagões é entregue diretamente para descarga nas siderúrgicas clientes distribuídas ao longo da ferrovia (cerca de 13% do minério transportado em 2007).

Após descarga no porto, o minério é estocado e misturado em pilhas antes de ser finalmente embarcado por meio de equipamentos denominados carregadores de navios. O processo de mistura combina minérios com diferentes características visando atender às especificações mínimas exigidas pelos clientes.

Parte do minério estocado é ainda processada em usinas de pelotização antes do embarque. As usinas estão instaladas no complexo portuário e transformam minério fino em pelotas, produto de maior valor agregado.

Toda a movimentação do minério no porto é feita por equipamentos específicos para manuseio de granéis sólidos, tais como transportadores de correia, empilhadeiras e recuperadoras, sendo também usados nas minas e instalações dos clientes.

Além das usinas de pelotização, o complexo portuário possui ainda instalações para manuseio de outras cargas, tais como: soja, fertilizante, carvão, derivados de petróleo, calcário, dentre outros. As cargas citadas são denominadas genericamente de “carga geral”, para fins de simplificação e distinção do minério de ferro.

3.2 ASPECTOS FÍSICOS E OPERACIONAIS DA FERROVIA

A malha ferroviária em estudo possui 905 km de extensão, dos quais 610 km são em via dupla e o restante em vias *singelas*, que são vias únicas usadas para tráfego nos dois sentidos. Nas vias singelas, o número de trens previstos para trafegar entre dois pontos define a quantidade de *pátios de cruzamento* a construir. Tais pátios constituem trechos com uma via adicional paralela à via principal de tráfego, permitindo o cruzamento de trens que viajam em sentidos opostos ou até mesmo a ultrapassagem entre trens deslocando-se no mesmo sentido.

Os 11 pontos de carregamento estão distribuídos conforme a Figura 7. Nota-se que um dos pontos de carregamento está situado nos domínios de uma ferrovia vizinha,

cuja conexão com a ferrovia em estudo ocorre no ponto G. Os 905 quilômetros da ferrovia são mais bem visualizados a partir das quatro partes abaixo descritas:

- trecho A-B-C: possui via dupla e é denominado Linha Tronco, com 540 quilômetros de extensão. É o trecho mais antigo da ferrovia e mais demandado em termos de fluxo de transporte;
- trecho B-D-E: possui 170 quilômetros de extensão e será denominado Ramal 01, com via dupla apenas entre B e D;
- trecho D-F-G: será denominado Ramal 02 e possui 90 km de extensão, com um pequeno trecho duplicado. Os trechos com vias singelas possuem diversos pátios de cruzamento, capazes de comportar simultaneamente trens que se movimentam em sentidos opostos e;
- outros trechos: não estão representados na Figura 7 e compreendem ramais secundários de pequena extensão com baixo fluxo de carga, não utilizados para o transporte de minério de ferro.

No trecho duplicado, um par de travessões instalado aproximadamente a cada 7,5 quilômetros permite aos trens em qualquer sentido de deslocamento mudar de uma via para a outra, mediante comandos do centro de controle de tráfego. As seções de bloqueio¹⁸ possuem extensão aproximada de 3,5 quilômetros.

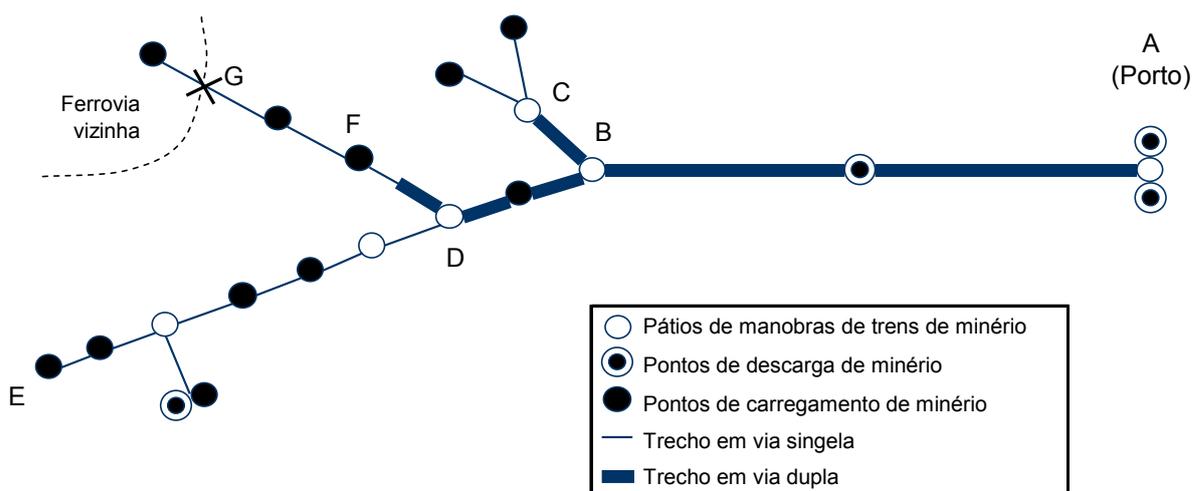


Figura 7: Representação simplificada da malha ferroviária em estudo

¹⁸ Trecho da via férrea que permite a presença de apenas um trem circulando em determinado sentido. O acesso de outro trem à seção de bloqueio ocorre somente após desocupação da mesma.

O atual sistema de sinalização será modernizado futuramente, permitindo o tráfego com distância mais reduzida entre os trens se comparado à situação atual, o que ampliará a capacidade de tráfego.

A ferrovia também transporta carga geral, porém em trens específicos e distintos dos trens para transporte de minério. Ao fim de 2007, a frota total era composta por 347 locomotivas e cerca de 20.000 vagões. Do total de vagões, 61% constituem uma frota homogênea projetada especificamente para o transporte de minério de ferro e para descarga em viradores de vagões.

Em 2007, foram transportadas 144 milhões de toneladas de carga, das quais 81% de minério de ferro¹⁹. Do total de minério transportado, uma parcela mínima (cerca de 1%) utilizou vagões de carga geral, pois as siderúrgicas de menor porte não possuem viradores de vagões. Tal transporte será desconsiderado neste trabalho.

3.3 O TRANSPORTE DE MINÉRIO DE FERRO

Na Figura 7, estão indicados quatro possíveis locais de descarga com viradores de vagões (pontos de descarga): dois ao longo da ferrovia (siderúrgicas clientes) e dois no complexo portuário. Um dos pontos de descarga do complexo portuário pertence a uma siderúrgica cliente vizinha ao porto.

Durante a viagem, os vagões são transportados em grupos com tamanho predeterminado de 84 unidades. Cada grupo é denominado *lote* e a princípio permanece unido durante toda a viagem entre pontos de carregamento e descarga. No entanto, o número de lotes a ser transportado em cada trem varia de acordo com a opção de formação de trem escolhida. Daí resultam trens típicos com variados comprimentos, quantidades de locomotivas e posicionamento das mesmas ao longo da composição.

A maior diversidade de opções de formação dos trens e o uso de trens longos só foi possível graças à adoção da *tração distribuída*, que se caracteriza, dentre outros aspectos, pela utilização de duas ou mais locomotivas fisicamente não conectadas entre si, operando em diferentes partes do trem. Tal prática é resultado do avanço tecnológico no modo ferroviário e tem contribuído para a melhoria do desempenho

¹⁹ Incluindo pequena parcela de pelotas, produzida em uma usina próxima à ferrovia.

da ferrovia, com reflexo positivo nos índices de segurança e consumo de combustível.

Segundo Borba (2001), a tração distribuída acarreta maior distribuição dos esforços nos engates ao longo do trem, reduzindo a resistência ao movimento e proporcionando economia de combustível, se comparada à situação de um trem com mesmo comprimento, porém utilizando *tração convencional* (locomotivas posicionadas na extremidade dianteira do trem). Boneti (2007) relata economias de combustível entre 4% e 6%, podendo chegar a 10%.

A redução no consumo de combustível decorrente do uso da tração distribuída é mais evidente em trechos com traçado mais sinuoso, onde as curvas contribuem para a maior resistência ao movimento do trem.

O número de lotes atualmente transportados por trem na ferrovia varia de um a três. No passado já se operou trens com até quatro lotes, mas tal prática foi abandonada por dificuldades nas manobras de formação e na condução dos trens.

Historicamente, a relação entre o número de vagões para cada locomotiva nos trens sofreu variações na ferrovia estudada, dependendo inclusive do trem típico considerado, conforme abordado por Campos, Pompermayer e Cruz (2008). Atualmente, tem sido adotada a relação de uma locomotiva para cada lote de 84 vagões, o que será aqui uma premissa do modelo a ser proposto (número de locomotivas no trem igual ao número de lotes, independentemente do trem típico considerado). A exceção ocorre em poucos trechos específicos com rampa acentuada e fora da linha tronco, onde são utilizadas locomotivas auxiliares, conhecidas como *helpers*, que proporcionam esforço trator adicional apenas para vencer distâncias relativamente curtas.

Ao tempo compreendido entre duas descargas sucessivas de um vagão dá-se o nome de *ciclo*, que poderá ser “fechado” ou “aberto”. No caso do ciclo fechado, as descargas sucessivas do vagão ocorrem no mesmo local (exemplo: porto). No caso do ciclo aberto, as descargas ocorrem em locais distintos (exemplo: vagão descarregado no porto é enviado a um ponto de carregamento para posterior descarga em siderúrgica cliente ao longo da ferrovia). O processo do transporte é, portanto, cíclico e pode ser descrito conforme a seguir, tomando-se como ponto de partida o instante em que o vagão se torna vazio.

Considerando o volume a transportar em um dado mês, o planejamento discutido na seção 3.1 estabelece o número de lotes que deverão ser carregados em cada ponto de carregamento. O programa mensal de carregamento é então desdobrado em programas diários, a serem cumpridos mediante uma programação para distribuição dos lotes de vagões vazios originados nos quatro pontos de descarga existentes.

Os lotes de vagões descarregados no complexo portuário são alocados a trens no sentido importação, com destino aos pontos de carregamento. Tais trens estão sujeitos a *manobras de desmembramento* em pátios intermediários existentes no decorrer do trajeto. Nas manobras de desmembramento os trens são subdivididos em trens com menor quantidade de lotes, permitindo uma alocação mais adequada dos lotes vazios aos pontos de carregamento que os aguardam.

Cada ponto de carregamento possui características de desempenho e restrições próprias, sendo que alguns são incapazes de carregar trens com mais de um lote, por razões técnicas relacionadas à topografia e limitação de espaço físico. No entanto, mesmo que o ponto de carregamento possa receber trens maiores, pode ser conveniente que ele receba em dados instantes trens com menor quantidade de lotes. Isto ocorre por questões relacionadas a um nível de demanda mais baixo para aquele ponto de carregamento ou para melhor distribuição de lotes vazios entre pontos de carregamento distintos que estejam demandando lotes simultaneamente.

Depois de carregados, os lotes são conduzidos em trens no sentido exportação, rumo aos pontos de descarga. No decorrer do trajeto, tais trens estão sujeitos a *manobras de formação* nos mesmos pátios intermediários citados anteriormente, onde os lotes são combinados a lotes de outros trens, resultando em trens maiores. Uma vez chegados a um dos quatro pontos de descarga, os lotes são desmembrados dos trens e conduzidos à descarga nos viradores de vagões, após a qual o ciclo se reinicia. Quando a descarga ocorre no complexo portuário, o material rodante é inspecionado, reorganizado e submetido a procedimentos de manutenção. Locomotivas são reabastecidas e o ciclo de viagens se reinicia.

Na Figura 8, podem ser vistos trens nos sentidos importação (vagões vazios) e exportação (vagões cheios), circulando em trecho duplicado.

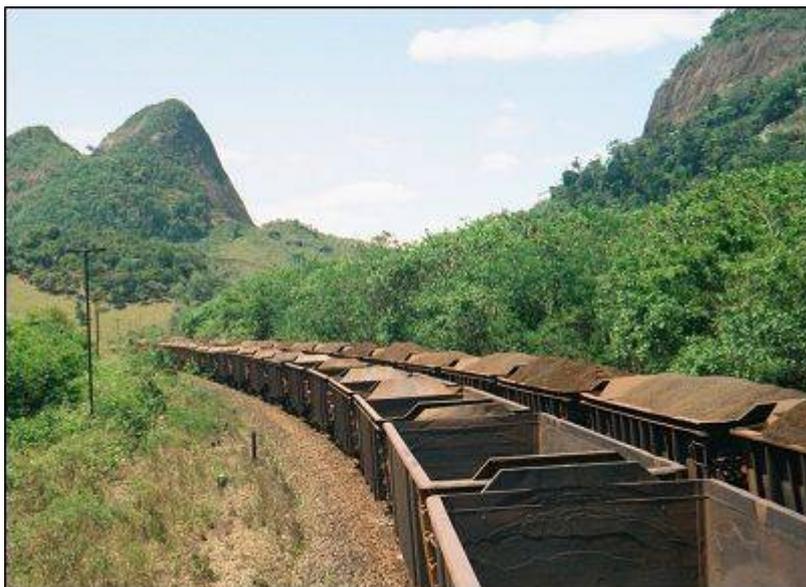


Figura 8: Trens circulando nos sentidos importação e exportação

Convém aqui mencionar um aspecto que se aplica a pequena parcela dos lotes descarregados no complexo portuário: alguns dos lotes vazios (cerca de 13% em 2007) são direcionados para carregamento de carvão mineral nas instalações do complexo. Esta carga é importada e provém de navios descarregados no porto. Os lotes com carvão são destinados às duas siderúrgicas clientes já mencionadas e situadas fora do complexo portuário. Embora o vagão não seja ideal para o transporte de carvão, trata-se de uma forma de agregar receita aproveitando-se o retorno do lote que, do contrário, seguiria vazio no sentido importação. Depois de entregues aos clientes, os lotes de carvão são descarregados também em viradores de vagões e devolvidos vazios à ferrovia, iniciando-se um novo ciclo. Portanto, os trens que partem do complexo portuário transportam em sua maioria lotes vazios, mas alguns dos lotes podem estar carregados com carvão.

Além dos tempos gastos com o deslocamento do trem, carregamentos dos lotes e manobras de formação e desmembramento, os trens também estão sujeitos a outros eventos rotineiros que aumentam o tempo de ciclo dos lotes: trocas de maquinistas, paradas para abastecimento e restrições de velocidade decorrentes da manutenção programada da via permanente. Além disto, podem ocorrer ainda eventos indesejáveis e imprevisíveis tais como: acidentes, manutenções corretivas na via permanente, no sistema de sinalização, no material rodante, dentre outros.

As operações descritas acima são mais bem compreendidas a partir da Figura 9 e do Quadro 1, nos quais estão indicados os principais locais (aqui denominados nós) e atividades relacionadas ao transporte de minério de ferro e carvão na malha. A numeração adotada na Figura 9 será posteriormente utilizada no desenvolvimento do modelo.

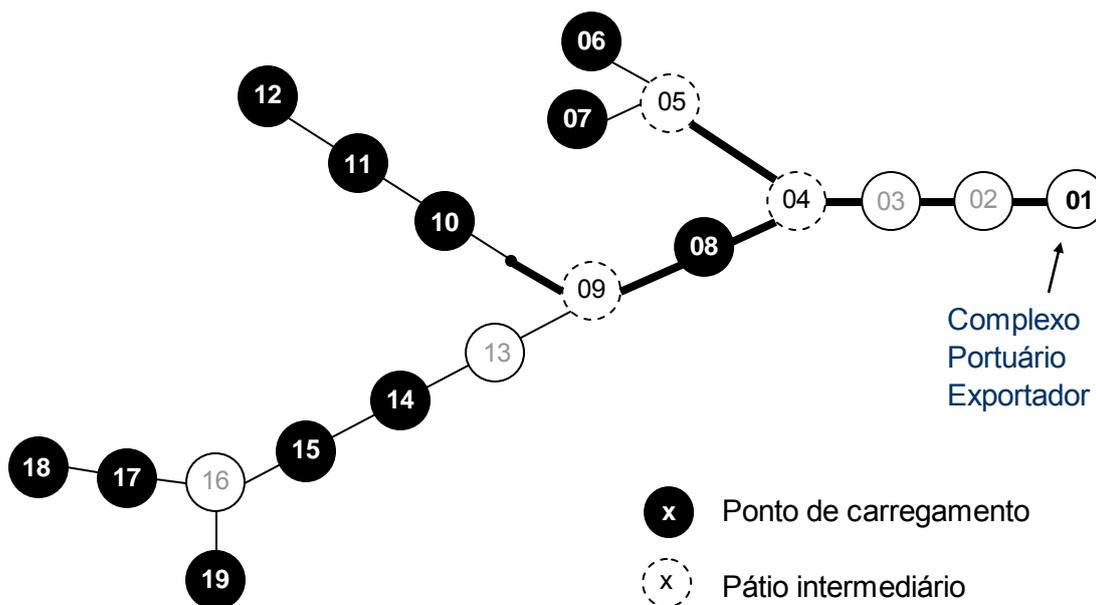


Figura 9: Nós relevantes para o transporte de carvão e minério

Por fim, conforme apontado por Nóbrega (1996), vale considerar que o transporte de minério está sujeito a interferências sazonais ao longo do ano, como o período das chuvas (quando a velocidade dos trens é mais baixa) e o período da safra de grãos (quando um maior número de trens de carga geral passa a competir com o transporte de minério de ferro, consumindo capacidade de tráfego).

Nó	Pontos de Carregamento		Tamanhos dos Trens Carregados c/ Minério		Manobras de Recomposição ⁽¹⁾	Pontos de Descarga		Origem de Trens Vazios	Abastecimento	Troca de Maquinista
	Minério	Carvão	1 lote	2 lotes		Minério	Carvão			
1		x				x		x	x	
2										x
3						x	x	x		x
4					x				x	
5					x					x
6	x		x							
7	x		x							
8	x		x	x						
9					x					x
10	x		x	x						
11	x		x	x						
12	x		x							
13 ⁽²⁾										
14	x		x	x						
15	x		x	x						
16										
17	x		x							
18	x		x	x						
19 ⁽³⁾	x		x			x	x	x		

Quadro 1: Caracterização das operações dos trens de minério e carvão na rede

Notas:

- (1) Manobras de formação e desmembramento ao longo da viagem (fora dos pontos de origem e destino da carga).
- (2) Atualmente ocorrem trocas de equipe e manobras de recomposição no nó 13. Entretanto, tais atividades foram representadas no nó 09, pois trata-se do cenário mais provável num futuro próximo, quando deverão ser concluídos investimentos no pátio representado pelo nó 09.
- (3) Na prática, devido a rampa acentuada ascendente no sentido de 19 a 16, trens partem de 19 limitados a ½ lote de vagões carregados. Em 16, dois trens sequenciais de ½ lote provenientes de 19 combinam-se, formando um lote completo para seguir viagem.

3.3.1 Possibilidades Operacionais para os Fluxos de Trens Carregados com Minério

Esta seção detalha as possibilidades de formação de trens, levando-se em conta que o foco do estudo está no fluxo de tráfego no sentido exportação, conforme objetivos apresentados no capítulo um.

Uma vez carregado com minério, como o lote de vagões será conduzido até seu destino? Tem-se aqui um problema de decisão entre operar trens diretos da origem até o destino ou executar manobras de formação (combinação de trens) que poderão ser feitas nos nós 04, 05 e 09 (Figura 9), dando origem a trens maiores.

Atualmente, trens destinados ao complexo portuário (nó 01) possuem dois ou três lotes. As decisões de formação definirão o número de trens em circulação (com consequências no nível de congestionamento e tempo de viagem) e afetarão

principalmente o tráfego no trecho entre os nós 04 e 01, que concentra todo o fluxo no sentido exportação.

3.3.1.1 Trens Diretos

Uma vez carregado, o trem poderá seguir diretamente até o ponto de descarga (nós 01, 03 ou 19) sem sofrer recomposições ao longo do trajeto. É o caso de todos os trens destinados aos nós 03 e 19 (clientes ao longo da ferrovia), os quais sempre transportam um único lote desde o ponto de carregamento até o destino. Trens destinados ao nó 19 são sempre provenientes de 17 ou 18. Trens destinados ao nó 03 podem ser originados de qualquer ponto de carga.

Trens diretos com apenas um lote (muito curtos) para o nó 01 não são praticados pois aumentariam o número de trens em circulação e percorreriam distâncias muito longas, justamente no trecho mais demandado (do nó 04 ao nó 01). Além disto, demandariam um quadro de maquinistas muito grande. Não são praticados trens diretos com três lotes, pois os pontos de carregamento foram originalmente projetados para carregar e liberar trens com no máximo dois lotes (contribuíram para isto restrições topográficas construtivas, com impacto no investimento necessário para construção dos pátios ferroviários de carregamento).

Assim, trens diretos do ponto de carregamento até o terminal portuário, quando praticados, seguem sempre com dois lotes.

3.3.1.2 Trens Formados ao Longo do Trajeto

As possibilidades para manobras de formação nos nós 04, 05 e 09 dependem da infra-estrutura disponível nesses nós e da configuração dos trens provenientes dos pontos a montante. As alternativas de formação são descritas a seguir:

- a) nó 05: recebe sempre trens com um lote, podendo formar trens com dois ou três lotes;
- b) nó 09: recebe trens com um ou dois lotes, podendo formar trens com dois ou três lotes;

- c) nó 04: recebe trens com um ou dois lotes, podendo formar trens com dois ou três lotes; trens com três lotes provenientes dos nós 05 ou 09 nunca são manobrados em 04.

Trens com três lotes formados nos pátios intermediários (nós 04, 05 e 09) sempre terão como destino o complexo portuário.

3.3.1.3 Compensação

É preciso, portanto, uma solução que leve em conta a compensação²⁰ entre operar trens longos ou curtos, bem como trens diretos ou não. Pode-se levar em conta o nível exigido de manobras e o nível de congestionamento, além de custos associados ao trem típico como, por exemplo, o consumo de combustível e o gasto com mão de obra (trens longos exigem mais manobras e tempos de espera nos pátios, mas podem reduzir o quadro necessário de maquinistas, o consumo de combustível, bem como o nível de congestionamento nas vias de circulação).

A seguir, será apresentado no capítulo quatro o modelo de otimização desenvolvido, utilizando-se o embasamento teórico discutido no capítulo dois aplicado ao contexto do presente capítulo.

²⁰ Também conhecida como *trade-off*, onde “[...] o resultado incorre em um aumento de custos em uma determinada área com o intuito de obter uma grande vantagem em relação às outras [...]”, conforme glossário de logística em Magalhães (2001).

4 DESENVOLVIMENTO DO MODELO

O modelo aqui desenvolvido constitui uma extensão de escopo e evolução do trabalho de Campos, Pompermayer e Cruz (2008), cuja modelagem abordou a ferrovia descrita no capítulo três, porém havia assumido tempos de viagem fixos e havia ficado restrita ao tráfego entre os nós 1 e 4 da malha ferroviária (Figura 9). Além disto, a interação de trens nos pátios de formação não havia sido modelada.

No presente caso, os grupos de carga (conforme definido na seção 2.4.1) foram diferenciados basicamente pela origem. Variações nas qualidades físico-químicas do minério inerentes a cada nó de origem foram desprezadas, e considerou-se um único tipo de produto (minério). Todos os lotes de minério possuem o mesmo destino e podem ser recombinaados indistintamente entre si nos pátios de formação. Trens de lote único que trafegam diretamente dos pontos de carregamento até os clientes ao longo da ferrovia foram considerados de forma independente, apenas para quantificar o congestionamento do tráfego, pois não afetam as manobras dos fluxos em estudo e não participam dos itinerários de interesse.

A característica não multiproduto e a aplicação ao caso de uma malha ferroviária relativamente simples facilitou a modelagem, na medida em que reduziu o leque de combinações de produtos e serviços.

Por outro lado, as particularidades da ferrovia estudada exigiram um esforço adicional e adaptações na modelagem, cabendo aqui destacar a consideração dos diferentes tamanhos predeterminados de trens e seu efeito na modelagem dos tempos de manobra em pátio. Outras adequações necessárias referem-se à consideração de restrições específicas da ferrovia analisada (limitação de recursos e capacidade de tráfego).

Por se tratar de um modelo para planejamento tático, considerou-se o atendimento a uma demanda mensal de transporte. O modelo desenvolvido permite chegar a soluções minimizando recursos preestabelecidos. Tais recursos certamente não representam a totalidade dos custos de transporte envolvidos, mas são recursos fundamentais que a empresa terá interesse em minimizar, dependendo do cenário em análise.

Não se pretende aqui investigar nem abranger toda a estrutura de custos da ferrovia. Propõe-se uma função objetivo de minimização de custos que poderá considerar até dois tipos de recursos essenciais ao transporte: o material rodante, e o combustível. Tais recursos poderão ser considerados de forma separada ou conjunta. Considerados conjuntamente, os recursos precisam ser traduzidos numa mesma base (monetária) na função objetivo: o custo de capital do material rodante utilizado e o gasto com combustível.

Os componentes considerados para a função de minimização de custo são apresentados na Figura 10:

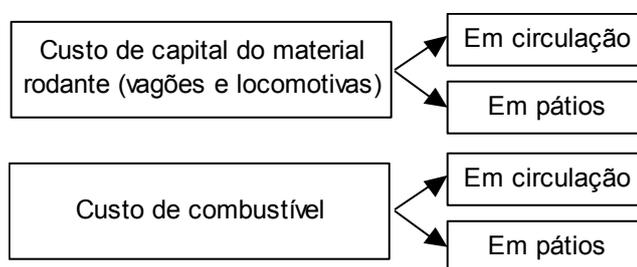


Figura 10: Custos considerados na função objetivo

4.1 SERVIÇOS E ITINERÁRIOS

O conceito de serviços e itinerários no contexto da aplicação ferroviária aqui proposta pode ser mais bem compreendido com auxílio da Figura 11, em que uma ferrovia está representada sob duas formas: uma rede física e uma rede de serviços. Os arcos na rede física representam as vias de circulação, ao passo que os arcos na rede de serviços representam diferentes tipos de serviços de transporte possíveis (opções de trens). Em ambos os grafos, nós representam pátios ferroviários.

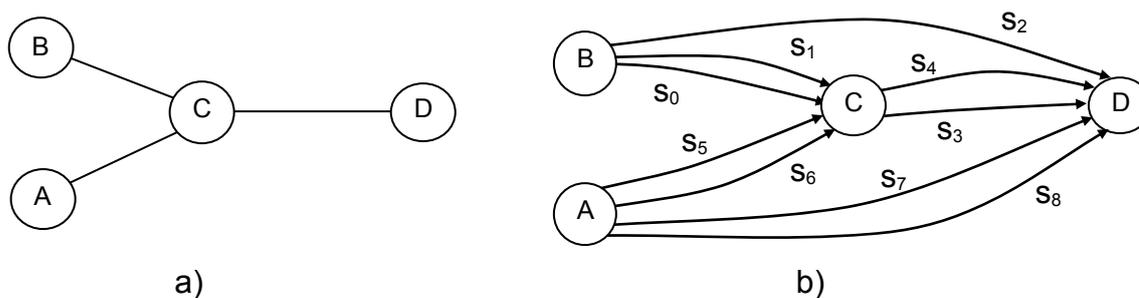


Figura 11: Exemplo de rede física (a) e a correspondente rede de serviços (b)

Os nós A e B representam pontos de origem das cargas, destinadas ao nó D. O nó C é um pátio intermediário onde ocorrem as manobras de recomposição dos trens. Sobre a rede física, há várias formas de operacionalizar o fluxo de cargas. Assim, o volume do grupo de carga cuja origem é B pode ser escoado até D através de cinco itinerários possíveis (sequências de serviços e operações): S0-S3, S0-S4, S1-S3, S1-S4 ou diretamente, através do serviço S2. Dentre os itinerários citados, há três serviços iniciais possíveis, partindo de B: S0, S1 ou S2. Nota-se também que um mesmo serviço pode atender a vários itinerários.

Neste trabalho, deseja-se estabelecer a frequência mensal dos diversos trens típicos praticados (aqui denominados serviços) e o volume de carga a ser escoado por cada itinerário, de forma a atender a uma demanda mensal de transporte ao menor custo.

Note-se que o destino de um serviço (trem típico) nem sempre é o destino da carga. Assim, o serviço S1 mostrado na Figura 11 tem como destino o nó C, mas sua carga está destinada ao nó D.

Nesta aplicação, é possível quantificar o volume escoado por cada itinerário oferecido a um grupo de carga, se for identificado o número de vezes que cada itinerário foi utilizado no período²¹. Tal relação direta decorre do fato de os trens possuírem quantidades conhecidas de lotes.

Portanto, sendo S o conjunto de serviços oferecidos, e L o conjunto de itinerários, deseja-se conhecer:

- y_s : vetor da frequência (trens/mês) de cada serviço $s \in S$; e
- z_l : vetor da frequência (utilizações/mês) de cada itinerário $l \in L$.

Com base na análise das operações descritas na seção 3.3.1, foi feito um mapeamento dos serviços e dos itinerários praticados na ferrovia para os fluxos de minério destinado ao complexo portuário. Foram identificados 46 serviços $s \in S$ e 69 itinerários $l \in L$ possíveis. O mapeamento completo dos serviços e itinerários está apresentado nos Apêndices A e B, respectivamente.

²¹ Cada trem partindo de um itinerário corresponde a uma utilização.

4.1.1 Caracterização dos Serviços ou Trens Típicos

O conceito de serviço adotado para aplicação na ferrovia analisada compreende uma série de características inerentes a cada trem típico, cujas diferentes combinações praticadas resultaram nas 46 possibilidades mapeadas. Assim, cada serviço ou trem típico foi caracterizado neste trabalho por:

- a) um nó de origem *do trem* (e não da carga);
- b) um nó de destino *do trem* (e não da carga);
- c) uma quantidade *fixa* de lotes da origem até o destino;
- d) um consumo de combustível típico; e
- e) uma rota na rede física (malha viária), unindo origem e destino *do trem*.

É importante ressaltar que, ao contrário da definição para serviços apresentada na seção 2.4.1, e da definição de serviços de trens adotada por Crainic Ferland e Rousseau (1984), a definição de serviço aqui utilizada refere-se apenas a serviços (trens típicos) cujo volume de carga se mantém inalterado ao longo do trajeto. A simples modificação na quantidade de vagões em um trem foi caracterizada no modelo desenvolvido como mudança para um novo serviço.

Baseando-se na malha ferroviária da Figura 9, as cinco características dos serviços operados a partir do nó 10 são apresentadas no Quadro 2 para fins de exemplificação. Assim, o serviço 15 percorre apenas o sub-trecho 8, ligando o nó 10 até o nó 9. O serviço 19 percorre uma rota mais longa na rede física, trafegando pelos sub-trechos 8, 9, 10, 12 e 13, de forma que a sequência de nós percorrida é 10-9-8-4-3-1.

Serviço s	Lotes por trem m _s	Nó de Origem do Serviço	Nó de Destino do Serviço	Consumo Relativo	Sub-trecho a															
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
					Nós	18	17	16	15	14	12	11	10	9	8	5	4	3	6	7
15	1	10	9	1.0		17	16	15	14	9	11	10	9	8	4	4	3	1	5	5
16	1	10	4	4.6									1	1	1					
17	2	10	9	2.0									1							
18	2	10	4	8.9									1	1	1					
19	2	10	1	49.2									1	1	1			1	1	

Quadro 2: Caracterização dos serviços originados no nó 10

Nota: consumo relativo = (consumo do trem) / (menor consumo apurado entre os serviços operados).

A partir das características conhecidas dos trens, a solução da frequência dos serviços permite quantificar o volume movimentado para cada grupo de carga, conforme mostrado na expressão (8):

$$h^p = \sum_{s \in S} o_s^p \cdot m_s \cdot y_s \quad (8)$$

em que:

h^p = total de lotes transportados para atendimento ao grupo de carga p [lotes/mês];

o_s^p = parâmetro binário {0,1} indicativo dos grupos de carga $p \in P$ de origem dos serviços $s \in S$ ($o_s^p = 1$ se o serviço s parte do nó de origem de p e $o_s^p = 0$ em caso contrário); e

m_s = número de lotes de material rodante contidos no serviço s .

Na expressão (8), o volume escoado por cada grupo de carga é quantificado a partir da frequência dos trens que partem do pátio de origem do grupo de carga.

4.1.2 Caracterização dos Itinerários

A importância dos itinerários decorre do fato de serem responsáveis pelo inter-relacionamento dos diversos serviços. Nesta aplicação, qualquer trem destinado a um nó que não seja destino da carga será necessariamente combinado a um ou mais trens, de forma que o trem resultante terá um total de lotes igual à soma dos lotes dos trens que o formaram. Neste caso, cada nova etapa de um dado itinerário representou a mudança para um trem típico necessariamente mais longo que seu antecessor. A mudança para um novo serviço acarreta tempos adicionais de retenção da carga nos pátios ferroviários. Tal característica foi modelada, o que assegurou que todos os trens destinados a um dado pátio intermediário de fato fossem penalizados com tempos de permanência nos pátios.

Cada um dos 69 itinerários mapeados foi caracterizado basicamente por uma sequência preestabelecida de serviços.

A rigor, as características abaixo também são inerentes a cada itinerário:

- a) o conjunto de pátios onde ocorrem as manobras; e
- b) o caminho percorrido na rede física, da origem até o destino *da carga*.

No entanto, as duas últimas características citadas já estão implícitas ao se conhecer a sequência de serviços que compõem o itinerário.

Como exemplo, no Quadro 3 são apresentados os sete itinerários possíveis para atender ao grupo de carga originado no nó 10. É possível escoar a carga até o terminal portuário (nó 1) utilizando-se de um, dois ou até três serviços no decorrer do trajeto. Inicia-se a viagem com trens curtos de um lote (serviços 15 e 16) ou com trens de dois lotes (serviços 17, 18 e 19). O itinerário 35 considera um trem direto da origem ao destino da carga. O itinerário 28 considera duas paradas subsequentes nos pátios 9 e 4, acrescentando em cada pátio novo lote proveniente de outro trem destinado ao pátio. Assim, o lote de carga originado em 10 chegará ao destino 1 em um trem com dois outros lotes adicionais capturados nos pátios intermediários.

Itinerário	Primeira Etapa				Segunda Etapa				Terceira Etapa			
	Serviço	Total de Lotes	Nó de Origem	Nó de Destino	Serviço	Total de Lotes	Nó de Origem	Nó de Destino	Serviço	Total de Lotes	Nó de Origem	Nó de Destino
28	15	1	10	9	39	2	9	4	46	3	4	1
29	15	1	10	9	40	2	9	1				
30	15	1	10	9	41	3	9	1				
31	16	1	10	4	45	2	4	1				
32	16	1	10	4	46	3	4	1				
33	17	2	10	9	41	3	9	1				
34	18	2	10	4	46	3	4	1				
35	19	2	10	1								

Quadro 3: Caracterização dos itinerários originados no nó 10

Uma vez que a todo itinerário $I \in L$ está associada uma sequência de serviços com quantidades conhecidas de lotes, a frequência z_I do uso de um itinerário dita o volume de carga (lotes de material rodante) por ele escoado. O serviço inicial de cada itinerário tem, portanto, papel determinante na apuração deste volume, conforme apresentado na expressão (9):

$$h_I = m_I \cdot z_I \quad (9)$$

em que:

h_I = total de lotes escoados pelo itinerário $I \in L$ [lotes]; e

m_I = número de lotes contidos no serviço inicial do itinerário $I \in L$ [lotes];

O volume movimentado para cada grupo de carga, obtido anteriormente pela expressão (8), também pode ser expresso a partir dos volumes escoados pelos itinerários:

$$h^p = \sum_{l \in L^p} h_l \quad (10)$$

em que:

L^p = conjunto de itinerários que atendem ao grupo de carga p .

4.2 CUSTO DE CAPITAL DO MATERIAL RODANTE

O custo de capital aqui considerado está relacionado ao custo de aquisição do material rodante e sua revenda após “ n ” anos de uso. Tal situação pode ser representada por uma série uniforme de pagamentos anuais, cujo valor periódico corresponde a um custo anual equivalente da locomotiva ou lote de vagões.

Hess et al. (1992) apresentam formulação para o cálculo do custo anual equivalente levando-se em conta: o preço do equipamento em valor presente, o valor de revenda ao fim do horizonte de tempo considerado, o número de períodos de capitalização e a taxa de juros. Demonstra-se (HESS et al., 1992, p. 108) que o custo anual equivalente pode ser calculado por:

$$ca = (N-V).FRC(i,n)+V.i \quad (11)$$

em que:

ca é o custo anual equivalente do equipamento [R\$/ano];

N é o preço do equipamento novo [R\$];

V é o valor de revenda do equipamento após “ n ” anos de uso [R\$];

i é a taxa de juros por período (ano) de capitalização;

n é o tempo de uso do equipamento, em número de períodos de capitalização; e

FRC é chamado “Fator de Recuperação de Capital”, calculado pela expressão (12):

$$FRC(i,n) = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (12)$$

O custo de capital incorrido durante a viagem de um trem típico qualquer refere-se ao uso dos vagões e locomotivas por algumas horas. Para o modelo aqui desenvolvido, foi utilizado o “custo horário equivalente”, obtido dividindo-se o valor da expressão (11) pelas 8760 horas do ano. Este custo será aqui chamado de custo

do “equipamento x hora” ou simplesmente “custo horário” do equipamento, lembrando que foi considerado apenas o fluxo de material rodante no sentido exportação, incluindo manobras nos pátios intermediários. Foram desconsiderados os tempos de carregamento nos pontos de origem e tempos de descarga no destino.

A partir da formulação acima e dos dados da ferrovia, foi possível chegar ao custo horário do lote (locomotiva +vagões)²².

A cada solução factível para serviços e itinerários corresponderá uma quantidade necessária de “equipamentos x hora” associada ao tempo de permanência em pátios e na circulação, traduzida em um custo de capital total ao longo do mês:

$$CC = CCc + CCp \quad (13)$$

em que:

CC = custo de capital total do material rodante [R\$/mês];

CCc = custo de capital do material rodante em circulação [R\$/mês];

CCp = custo de capital do material rodante nos pátios [R\$/mês];

Os custos de capital dos lotes de material rodante em circulação e nos pátios podem ser obtidos pelas expressões (14) e (15):

$$CCc = TC \cdot ch_{lote} \quad (14)$$

$$CCp = TP \cdot ch_{lote} \quad (15)$$

em que:

TC = tempo de lotes em circulação [lotes x h/mês];

TP = tempo de permanência dos lotes em pátios [lotes x h/mês]; e

ch_{lote} = custo horário do lote (locomotiva e vagões) [R\$/lote x h].

4.2.1 Custo de Capital do Material Rodante em Circulação

O custo de capital associado à circulação dos trens dependerá dos tempos de viagem, que por sua vez são influenciados por uma série de fatores, tais como:

²² Considerou-se $V = 0$, sendo n , a vida útil do equipamento. Adotou-se vida útil de 20 anos para locomotivas, 40 anos para vagões e taxa de juros de 15% ao ano, conforme Castro (2002, p. 271).

quantidade de trens em circulação, ocorrências de acidentes, intervenções de manutenção na via permanente ou sistema de sinalização, intempéries, defeitos, etc.

4.2.1.1 Estimativa do Tempo de Circulação

Dentre os fatores acima, será modelado o efeito congestionamento em função do número de trens em circulação. A decisão de incluir este fator na modelagem deve-se ao fato de que a solução do problema envolve a escolha de trens típicos curtos ou longos, o que afeta a quantidade de trens na rede para uma demanda fixa de transporte. Quanto aos demais fatores, não serão considerados, pois assumiu-se que independem ou são pouco afetados pelos trens típicos operados.

O efeito congestionamento em ferrovias pode ser verificado na Figura 12, onde o comportamento típico do tempo de viagem de trens normais (não incluídos trens de maior velocidade ou prioritários) cresce com a quantidade de trens em circulação.

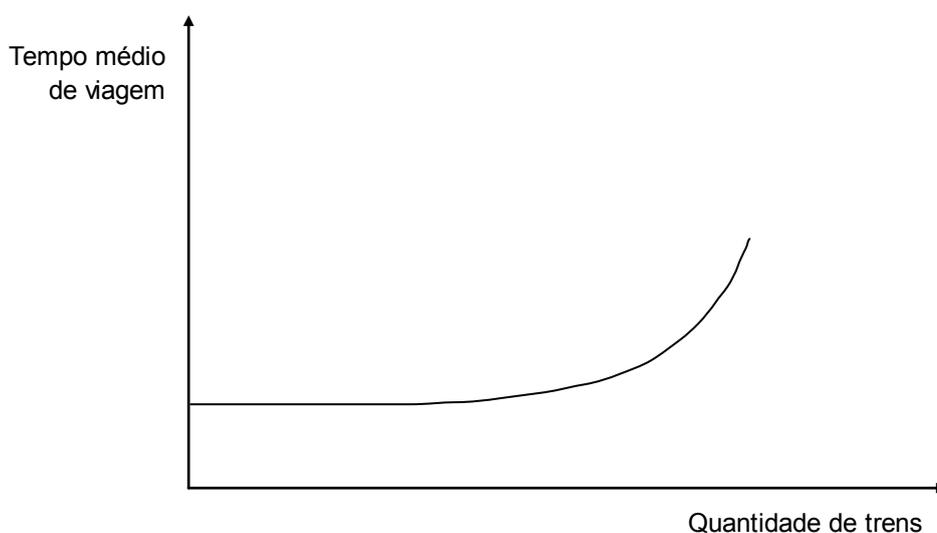


Figura 12: Efeito do congestionamento sobre o tempo de viagem dos trens

Fonte: Crainic, Ferland e Rousseau (1984, p. 175).

Nota: Adaptado pelo autor.

Algumas ferrovias já possuem tais curvas conhecidas e calibradas, o que não é o caso da ferrovia em estudo. Diante disto, foi feita extensa coleta e tratamento estatístico de dados da ferrovia estudada, com vistas à obtenção de curvas semelhantes ao menos nos principais trechos, por meio de regressão. Entretanto, a grande interferência de inúmeros fatores simultâneos nos tempos de viagem e a

forma como estavam disponíveis os dados do sistema de informações pesquisado impediram a obtenção de tais curvas.

Um exemplo simples ilustra a dificuldade descrita: no caso de algum acidente ou defeito que impeça ou reduza o tráfego de trens, o número de trens que trafegaram em determinado trecho poderá ser bastante reduzido, mas o tempo de viagem será alto devido ao congestionamento ocorrido. Portanto, fica difícil isolar o efeito congestionamento acarretado unicamente pela quantidade de trens em circulação.

Diante da dificuldade acima, a forma alternativa aqui proposta para consideração do congestionamento foi pela aplicação de modelos de filas ao menos nos trechos em via dupla a partir dos pátios intermediários. Isto correspondeu a 610 quilômetros de ferrovia divididos em cinco sub-trechos (arcos 5-4, 4-3, 3-1, 9-8 e 8-4 da Figura 9), ou seja, 76% da malha física utilizada pelos trens de minério. A inclusão dos arcos 4-3 e 3-1 garantiu que a modelagem do congestionamento afetasse 100% dos itinerários. O restante da ferrovia foi dividido em dez sub-trechos singelos, onde foram assumidos tempos fixos de viagem, com base em valores médios conhecidos (ano 2007).

Tem-se, portanto, um conjunto A de 15 sub-trechos $a \in A$, sendo cinco sub-trechos a_v com tempos variáveis e dez sub-trechos a_f com tempos fixos. O conjunto A de sub-trechos foi apresentado no Quadro 2 e consta no Apêndice A. O tempo de circulação em um sub-trecho a qualquer será denominado t_a .

Para os sub-trechos $a_f \in A$, tem-se:

$$t_a = T_{a_f} \quad (16)$$

em que:

T_{a_f} = tempo fixo de circulação para qualquer serviço s no sub-trecho a_f [h].

Nos sub-trechos a_v , o tempo de circulação é afetado pelo tráfego dos trens de minério somado ao dos outros trens (dedicados a serviços de manutenção, transporte de passageiros e carga geral). A quantidade mensal dos outros trens foi avaliada em cada sub-trecho a_v (de abr/2007 a set/2008) e obtiveram-se os valores típicos dos meses de safra (quando os trens de minério são mais afetados pelo transporte de grãos) e fora da safra. Com isto, pode-se calcular o tráfego total por:

$$\lambda_{a_v} = \frac{Q_o^{a_v} + Q_s^{a_v}}{720} \quad (17)$$

em que:

λ_{a_v} = fluxo total de trens no sentido exportação do sub-trecho a_v [trens/h];

$Q_o^{a_v}$ = valor constante igual ao total de outros trens no sentido exportação do sub-trecho a_v [trens/mês]; e

$Q_s^{a_v}$ = total de serviços (trens de minério) no sentido exportação do sub-trecho a_v [trens/mês], obtido por:

$$Q_s^{a_v} = \sum_{s \in S} w_s^a y_s \quad \text{para cada } a_v \in A \quad (18)$$

em que:

w_s^a = parâmetro binário {0,1} indicativo dos sub-trechos $a \in A$ percorridos por cada serviço $s \in S$ ($w_s^a=1$ se o serviço s passa pelo sub-trecho a e $w_s^a=0$ em caso contrário). Este parâmetro está apresentado no Quadro 2 para o serviço 10, e no Apêndice A para todos os serviços.

Cada sub-trecho a_v foi discretizado em elementos menores, com distâncias e tempos de trajeto conhecidos. Foram assumidas distâncias mínimas entre dois trens consecutivos, o que correspondeu a tempos mínimos de percurso exigidos entre trens. Tais distâncias e tempos foram obtidos a partir das distâncias e tempos médios de trajeto por cada seção de bloqueio específica, em condições normais de tráfego (*sem interferência de paralisações ou atrasos*).

O tempo mínimo necessário entre trens pode ser interpretado como o tempo de atendimento de um servidor, para aplicação de teoria das filas e obtenção de uma taxa de atendimento μ . Para obtenção do tempo total de permanência de um trem em um sub-trecho qualquer, utilizou-se o postulado básico segundo o qual “Em qualquer sistema estável, o fluxo de entrada se mantém nas diversas seções de sistema, desde que não haja junção ou desdobramento” (PRADO, 2004, p. 44).

Desta forma, o tempo de circulação foi obtido modelando-se cada sub-trecho a_v como um conjunto de sistemas M/M1 em série, todos sujeitos à mesma taxa de chegada λ_{a_v} [trens/h], em que o i -ésimo servidor possui uma taxa de atendimento

$\mu_i^{a_v}$ [trens/h] própria, em função de sua localização física em a_v . Assim, o tempo de permanência de um trem no i -ésimo sistema M/M/1 do sub-trecho a_v foi denominado $TS_i^{a_v}$ [h], e obtido por:

$$TS_i^{a_v} = \frac{1}{\mu_i^{a_v} - \lambda_{a_v}} \quad (19)$$

Na expressão acima, $\mu_i^{a_v}$ é uma constante conhecida na ferrovia, e λ_{a_v} é obtida pela expressão (17), sendo dependente da solução para a frequência dos trens.

A soma dos tempos de permanência em cada sistema M/M/1 resultou no tempo total de percurso do sub-trecho, já considerando a formação de filas. Esta abordagem está exemplificada para o sub-trecho 12 (do nó 4 ao nó 3), através da Figura 13:

	Servidor 1	Servidor 2	...	Servidor $i-1$	Servidor i
Taxa de atendimento	μ_1^{12}	μ_2^{12}	...	μ_{i-1}^{12}	μ_i^{12}
Taxa de chegada (constante ao longo do sub-trecho)	λ_{12}	λ_{12}	...	λ_{12}	λ_{12}
Tempo de permanência no i -ésimo sistema M/M/1	TS_1^{12}	TS_2^{12}	...	TS_{i-1}^{12}	TS_i^{12}
Tempo total do nó 4 ao nó 3	$t_{12} = TS_1^{12} + TS_2^{12} + \dots + TS_{i-1}^{12} + TS_i^{12}$				

Figura 13: Exemplo do sub-trecho 12 para modelagem do tempo de percurso por sistemas M/M/1 em série

Portanto, para $a_v \in A$, tem-se:

$$t_a = \sum_{i=1}^n TS_i^{a_v} \quad (20)$$

Cabe citar que mesmo tratando-se de via dupla, os trens estão sujeitos a atrasos por diversos fatores já comentados, sendo frequentemente obrigados a mudar de via, quando parte do trecho de via dupla passa a operar temporariamente como via singela. A adoção de um modelo M/M/1, conforme discutido no capítulo três, é conservadora, o que de certa forma acaba “representando” indiretamente tais atrasos adicionais não modelados de forma explícita.

A metodologia acima foi aplicada aos sub-trechos a_v e foram obtidos cinco gráficos representando t_a em função do fluxo total de trens ($Q_o^{a_v} + Q_s^{a_v}$). Para obtenção mais

simples e direta de t_a , os pontos foram ajustados por regressão, de forma a se obter expressões lineares ou quadráticas, conforme apresentado na Figura 14.

As curvas foram calibradas com base nos tempos médios históricos de cada sub-trecho e plotadas numa faixa de variação do fluxo total de trens em torno da média histórica observada.

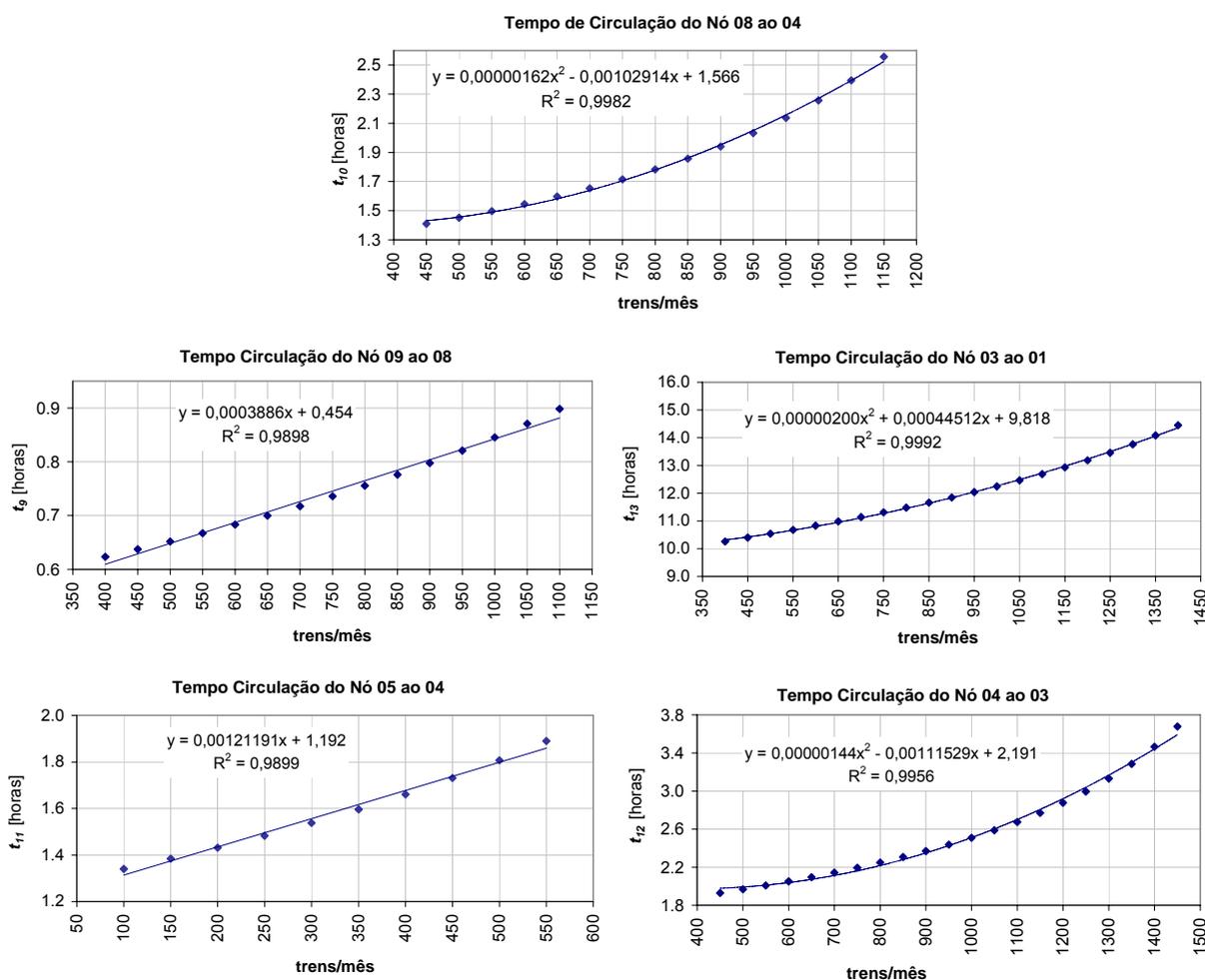


Figura 14: Curvas adotadas para tempo de circulação em função do tráfego

4.2.1.2 Cômputo do Custo de Capital na Circulação

Finalmente, pode-se agora calcular o tempo acumulado dos lotes de material rodante utilizados na circulação ao longo do mês:

$$TC = \sum_{a \in A} \sum_{s \in S} w_s^a \cdot m_s \cdot y_s \cdot t_a \quad (21)$$

O custo de capital mensal referente à circulação dos lotes é obtido através da expressão (14).

4.2.2 Custo de Capital nos Pátios

Por se tratar de um modelo integrado de planejamento no nível tático, não cabe aqui detalhar as operações em cada pátio. Para modelos específicos de tempos e congestionamentos em pátios, os trabalhos de Petersen (1977 a, b) e Turnquist e Daskin (1982) são as referências mais citadas.

Newman, Nozick e Yano (2002 p. 714) afirmam que em modelos integrados, operações detalhadas (blocagem ou tempos de trem) e restrições locais (capacidade de pátios, por exemplo) devem ser ignoradas ou modeladas de forma aproximada, abordagem que será adotada no presente trabalho.

O custo de capital nos pátios diz respeito ao tempo que o material rodante ali permanece (lotes x h). Na seção 2.6, foi apresentada a categorização típica dos tempos em pátio: tempo de acúmulo, tempo de classificação e tempo de conexão

O tempo de acúmulo será considerado e diz respeito ao tempo de espera por outros trens que terão seus lotes agregados aos lotes que aguardavam no pátio intermediário.

No transporte de minério, os vagões não são classificados nos pátios intermediários, pois já estão agrupados em lotes com tamanho fixo predeterminado, todos com mesmo destino. No entanto, os lotes estão sujeitos a manobras de recomposição para formação de novos trens, cujos tempos serão considerados.

O tempo de conexão não é aplicável no presente caso, pois o tempo de permanência dos lotes num pátio intermediário não depende da partida de algum serviço específico, isto é: uma vez cumprido o tempo de acúmulo e do processo de formação, um novo trem já está formado e está em condições de partir (o tempo de acúmulo aqui já traduz a conexão com outros trens que chegam ao pátio).

Quanto ao pátio de destino da carga (complexo portuário), todos os lotes são descarregados e seus vagões são posteriormente classificados. Tais processos não serão modelados, pois são etapas fora do escopo aqui proposto, quando já se inicia o processo de distribuição dos vagões vazios para novos carregamentos. Entretanto, é preciso considerar uma situação que ocorre antes da descarga: ao chegarem ao complexo portuário, todos os trens sofrem manobras de desmembramento dos lotes cheios. São manobras preparatórias para a descarga, onde sabe-se que os trens

longos (3 lotes) gastam mais tempo que os demais trens (com dois lotes). Tal situação será modelada como uma “penalidade” imposta apenas ao trem longo, traduzida como um tempo fixo adicional de 20 minutos no processamento de cada lote.

O custo de capital do material rodante em pátios será obtido pela expressão (15), restando aqui obter TP .

O tempo de permanência do material rodante nos pátios será dado por:

$$TP = TP_{ac} + TP_{man} + TP_{des} \quad (22)$$

em que:

TP_{ac} = tempo de permanência em pátio na espera para acúmulo [lotes x h/mês];

TP_{man} = tempo de permanência em pátio devido à manobra de formação [lotes x h/mês]; e

TP_{des} = tempo adicional típico imposto aos trens longos, decorrente da manobra de desmembramento dos lotes ao chegarem no complexo portuário [lotes x h/mês].

4.2.2.1 Tempo de Espera para Acúmulo

O cômputo dos tempos de acúmulo será mais bem compreendido a partir da Figura 15, onde estão apresentadas as possibilidades para combinação dos serviços nos pátios intermediários e os tempos de espera para acúmulo de lotes, assumindo-se intervalos regulares entre trens.

Sendo J o conjunto de pátios intermediários, Δ_j será o intervalo médio entre chegadas de trens [h/trem] destinados a um pátio $j \in J$ qualquer, dado por:

$$\Delta_j = \frac{720}{Xe_j} \quad (23)$$

em que:

Xe_j = total de serviços entrando do pátio j ao longo do mês [trens/mês].

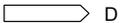
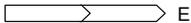
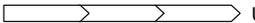
Caso	3º Trem Chegando	2º Trem Chegando	1º Trem Chegando	Trem Formado	Tempo Médio de Acúmulo por Lote
I		 B $t_{ac} = 0$	 B $t_{ac} = \frac{720}{Xe_j} \cdot 1$	 $t_{ac}^F = \frac{720}{Xe_j}$	$tm_{ac}^F = \frac{720}{Xe_j} \cdot \frac{1}{2}$
II		 D $t_{ac} = 0$	 E $t_{ac} = \frac{720}{Xe_j} \cdot 2$	 $t_{ac}^{U''} = \frac{720}{Xe_j} \cdot 2$	$tm_{ac}^{U''} = \frac{720}{Xe_j} \cdot \frac{2}{3}$
III		 E $t_{ac} = 0$	 D $t_{ac} = \frac{720}{Xe_j} \cdot 1$	 $t_{ac}^{U'''} = \frac{720}{Xe_j}$	$tm_{ac}^{U'''} = \frac{720}{Xe_j} \cdot \frac{1}{3}$
IV	 C $t_{ac} = 0$	 C $t_{ac} = \frac{720}{Xe_j} \cdot 1$	 C $t_{ac} = \frac{720}{Xe_j} \cdot 1 + \frac{720}{Xe_j} \cdot 1$	 $t_{ac}^V = \frac{720}{Xe_j} \cdot 3$	$tm_{ac}^V = \frac{720}{Xe_j}$

Figura 15: Possibilidades de formação e tempos de acúmulo (lotes x hora)

Os serviços mostrados na Figura 15 estão agrupados conforme descrição a seguir :

- B : Trens com um lote que dão origem a trens com dois lotes;
- C : Trens com um lote que dão origem a trens com três lotes em três parcelas;
- D : Trens com um lote que dão origem a trens com três lotes em duas parcelas;
- E : Trens com dois lotes que dão origem a trens com três lotes em duas parcelas;
- F : Trens com dois lotes partindo do pátio;
- U : Trens com três lotes formados a partir de dois trens;
- V : Trens com três lotes formados a partir de três trens; e
- G : Conjunto dos trens com três lotes formados no pátio.

Na Figura 16, estão representados os fluxos de entrada e as três categorias de serviços formados num pátio j qualquer:

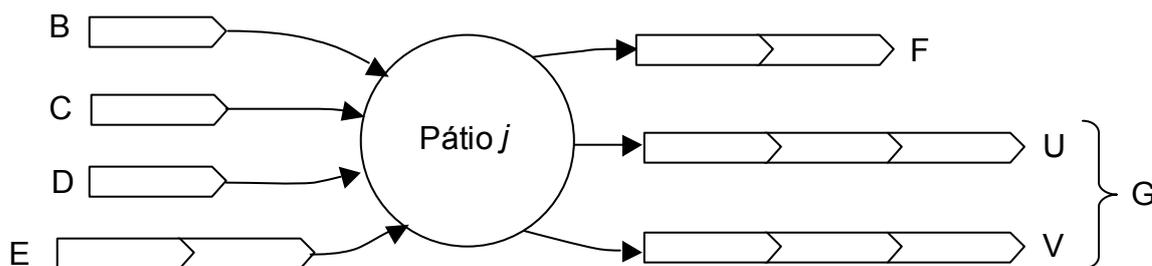


Figura 16 : Categorização dos serviços que entram e saem dos pátios de formação

Se a solução encontrada indica um determinado número de trens tipo F partindo do pátio, sabe-se imediatamente pela Figura 15 que cada trem consumiu $720/Xe_j$ lotes x hora por acúmulo.

A quantidade de lotes x hora consumida no pátio para formação de trens longos com três lotes depende do número de ocorrências dos casos II, III e IV, pois cada caso leva a um tempo de acúmulo específico.

Na formação do trem longo tipo U, o tempo de acúmulo depende apenas de qual serviço chegou primeiro (D ou E) ao pátio. Como se trata de um planejamento no nível tático, não é possível distinguir a ocorrência dos casos II e III, e assumiu-se 50% das formações como sendo do caso II e 50% do caso III. Assim, considerou-se que o tempo médio de acúmulo por lote para qualquer serviço no grupo U será:

$$tm_{ac}^U = 0,5.tm_{ac}^{U''} + 0,5.tm_{ac}^{U'''} = \frac{720}{2.Xe_j} \quad (24)$$

A solução y_s indica o total de trens longos saindo de cada pátio de formação, mas não distingue explicitamente o total de trens formados em cada categoria U e V. É possível, no entanto, conforme será demonstrado, fazer esta distinção, a partir dos trens que entram e saem do pátio. Pede-se achar os fluxos de saída [trens/mês] de trens longos U e V, respectivamente denominadas Xs_j^U e Xs_j^V .

Sabe-se que para cada serviço U formado foi necessário um serviço E correspondente, entrando no pátio. Todo trem com dois lotes que entra em um pátio necessariamente irá formar um trem longo na categoria U. A solução encontrada y_s fornece diretamente para cada pátio o fluxo mensal de serviços E. Portanto, sendo conhecido Xe_j^E , tem-se que:

$$Xs_j^U = Xe_j^E \text{ para cada pátio } j \in J \quad (25)$$

O total de trens longos saindo de cada pátio de formação, Xs_j^G , é um valor conhecido. Como $Xs_j^U + Xs_j^V = Xs_j^G$, tem-se a partir da expressão (25):

$$Xs_j^V = Xs_j^G - Xe_j^E \text{ para cada pátio } j \in J \quad (26)$$

Finalmente, é possível calcular o tempo total de espera por acúmulo no conjunto de pátios intermediários, levando-se em conta as categorias U, V e F:

$$TP_{ac} = \sum_{j \in J} TP_{ac_j} = \sum_{j \in J} \left(3 \cdot \frac{720}{2 \cdot Xe_j} \cdot Xs_j^U + 3 \cdot \frac{720}{Xe_j} \cdot Xs_j^V + \frac{720}{Xe_j} \cdot Xs_j^F \right) \quad (27)$$

em que:

$$TP_{ac_j} = 0 \text{ se } Xe_j = 0$$

4.2.2.2 Tempo Devido às Manobras de Formação

Além do tempo de espera por acúmulo de lotes nos pátios intermediários, é preciso levar em consideração o tempo que o material rodante gasta nas manobras de formação de trens. O tempo de manobra correspondente ao tempo de acoplamento entre partes de um trem qualquer dura aproximadamente 45 minutos. Isto corresponde a uma taxa de atendimento $\mu_{acop} = 1,33$ acoplamentos/hora.

Assim como as vias de circulação, pátios intermediários também estão sujeitos à ocorrências de filas, dependendo da capacidade de processamento de cada pátio e da demanda por manobras. Devido a este aspecto, modelos de filas serão úteis para levar em consideração o efeito congestionamento que pode haver nos pátios.

Crainic, Ferland e Rousseau (1984) utilizaram o modelo M/M/1 para modelagem dos tempos de classificação em todos os pátios, ao passo que aqui o modelo M/M/1 será usado para modelar o processo de formação. No entanto, alternativamente, podem ser aplicados outros modelos como M/M/2 ou M/M/3, conforme o pátio considerado.

Como apresentado na Figura 15, as últimas parcelas de cada trem possuem tempo nulo de espera para acúmulo; no entanto, será necessário ainda um tempo adicional de permanência no sistema (pátio) para conclusão da manobra de acoplamento (fila e atendimento). Tal tempo adicional será imposto ao trem como um todo.

O total de acoplamentos das últimas parcelas dos trens será igual ao número de trens formados no pátio (saindo). Portanto, para fins de aplicação de modelos de filas, considerou-se a taxa de chegada como sendo:

$$\lambda_{últ_j} = \frac{Xs_j}{720} \quad (28)$$

em que:

$\lambda_{últ_j}$ = taxa de chegada das últimas parcelas dos trens formados em j [trens/h]; e

Xs_j = total de trens saindo do pátio j (formados em j) ao longo do mês [trens/mês].

Também verifica-se na Figura 15, que os trens das categorias F e U exigem um único acoplamento, ao passo que a categoria V exige dois acoplamentos. A taxa de chegada na expressão (28) considera apenas a última parcela acoplada a cada trem, pois assumiu-se que no caso da categoria V, o primeiro acoplamento ocorreu no “tempo morto” de acúmulo (enquanto se esperava a chegada do último lote). Esta consideração é aceitável, desde que Xe_j gere um intervalo entre chegadas maior que o tempo de manobra (45 minutos).

Partindo-se de $\mu_{acop} = 1,33$ e da expressão (28), chega-se ao tempo de permanência do trem completo no pátio, obtido como o tempo em um sistema M/M/1:

$$t_j = \frac{1}{\mu_{acop} - \lambda_{últ_j}} \quad (29)$$

em que:

t_j = tempo de permanência do trem a ser formado no pátio j devido à manobra.

Finalmente, de forma semelhante à expressão (21) para o tempo de material rodante na circulação, chega-se ao tempo de permanência em pátio devido às manobras, através da expressão (30):

$$TP_{man} = \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} o_s^j \cdot m_s \cdot y_s \cdot t_j \quad (30)$$

em que:

o_s^j = parâmetro binário $\{0,1\}$ indicativo dos pátios intermediários $j \in J$ de origem dos serviços $s \in S$ ($o_s^j = 1$ se o serviço s origina-se em j e $o_s^j = 0$ em caso contrário).

Há somente três pátios intermediários e oito opções de serviços que exigem manobra de formação, conforme pode ser visto no Apêndice A. Os valores de o_s^j ., estão representados no Quadro 4.

Parâmetro	O_s^j	Pátio Intermediário j		
		4	5	9
Serviço S	39	0	0	1
	40	0	0	1
	41	0	0	1
	42	0	1	0
	43	0	1	0
	44	0	1	0
	45	1	0	0
	46	1	0	0

Quadro 4: Parâmetro indicativo dos serviços s originados nos pátios de formação j

4.2.2.3 Tempo Total nos Pátios Intermediários

Na medida em que aumenta o número de trens formados em um pátio, o intervalo entre chegadas diminui, levando à redução do tempo de acúmulo (lotes x hora) gasto por cada trem formado. Por outro lado, o tempo gasto com as manobras cresce com o número de trens formados. Este comportamento pode ser visto no Gráfico 1, onde TP_{ac} foi calculado na hipótese de se formar unicamente trens com dois lotes (caso I mostrado na Figura 15) e TP_{man} foi calculado pela expressão (30), aplicando-se modelo de filas M/M/1. Verifica-se que existe uma proporção adequada entre TP_{ac} e TP_{man} que permite minimizar o tempo total TP no pátio.

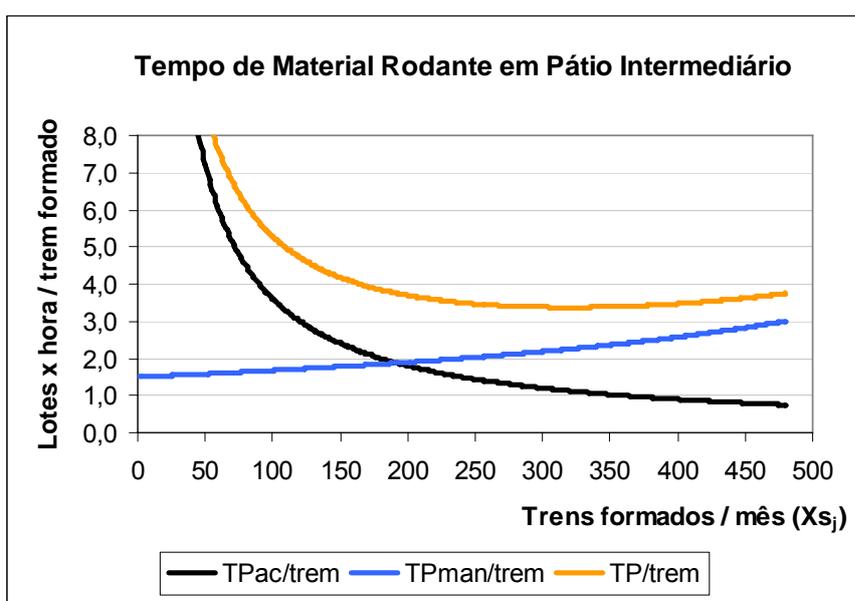


Gráfico 1: Compensação entre tempo de acúmulo e tempo de manobra em pátio de formação

4.2.2.4 Tempo Adicional para Desmembramento de Trens Longos no Porto

Por fim, o tempo adicional gasto pelos trens longos para desmembramento ao chegarem no porto é de aproximadamente 20 minutos por lote (0,33 h/lote), de forma que o tempo total para tais manobras ao longo do mês pode ser traduzido pela expressão (31):

$$TP_{des} = 0,33 \cdot \sum_{s \in S^{m_s=3}} y_s \cdot m_s \quad (31)$$

em que:

$S^{m_s=3}$ = conjunto de serviços contendo três lotes.

4.3 CUSTO DE COMBUSTÍVEL

O custo mensal com combustível foi estimado para os trens em circulação e para as manobras nos pátios, conforme a expressão (32):

$$CD = CDc + CDp \quad (32)$$

em que:

CD = custo total relativo ao consumo de óleo diesel [R\$/mês];

CDc = custo relativo ao consumo de diesel em circulação [R\$/mês]; e

CDp = custo relativo ao consumo de diesel nos pátios [R\$/mês].

O consumo de combustível depende de vários fatores, como por exemplo: o padrão de operação, características técnicas das locomotivas, adoção de tração distribuída ou não, relação entre o peso do trem e potência das locomotivas, topografia do trecho percorrido, dentre outros.

As ferrovias controlam o consumo de combustível com o auxílio de indicadores de eficiência energética, que traduzem o consumo requerido para efetuar um volume de transporte. A quantificação do transporte pode levar em conta a distância percorrida ou não. Pode ainda levar em consideração o peso bruto do material rodante (tara do vagão somada ao peso útil da carga transportada) ou apenas o peso útil da carga.

Passaglia (2008) cita indicadores como (litros)/TKB²³ e (litros)/km, mostrando que este último “[...] pode levar a conclusões enganosas, pois mascara o componente perfil do terreno, que é preponderante para o consumo.”

O consumo de combustível foi estimado a partir do indicador (litros)/kTKB, o qual será aqui denominado consumo específico, indicando o consumo em litros para cada 1.000 TKBs transportados. Trata-se de um indicador *relativo* de consumo: o mesmo consumo específico aplicado a dois trens com pesos brutos distintos percorrendo o mesmo trecho resultará em diferentes consumos de combustível para cada trem.

4.3.1 Custo de Combustível em Circulação

A ferrovia pesquisada possui em seu banco de dados o consumo específico típico dos trens de minério conforme o trecho percorrido. Tal informação permite calcular para cada serviço um consumo de combustível esperado em circulação. Entretanto, os dados disponíveis não distinguem os consumos específicos nos trens convencionais dos consumos no caso de tração distribuída. Tal diferença, e não o valor absoluto do consumo específico em si, é o que realmente importa na avaliação das alternativas em estudo. Assumiu-se que os consumos específicos disponíveis referem-se a trens convencionais e que no caso de tração distribuída, o consumo é 5% menor, com base na faixa de ganhos citada por Boneti (2007) para trens com tração distribuída (4% a 6%).

Trens com um lote possuem uma única locomotiva; logo, são trens convencionais. Trens com dois lotes podem operar da forma convencional ou com tração distribuída. Trens com três lotes sempre operam com tração distribuída. Assumiu-se que 50% dos trens com dois lotes são convencionais e 50% utilizam tração distribuída (tal proporção pode ser alterada e depende principalmente de decisão gerencial).

Para estimar o consumo em circulação, foram assumidos três patamares possíveis de consumo específico, dependendo do número de lotes no trem, conforme o Quadro 5. São apresentadas as diferenças relativas entre consumos específicos, tendo como referência o consumo específico dos trens convencionais (ce_{conv}).

²³ TKB: toneladas quilômetro brutas. Indicador do trabalho efetuado pela ferrovia, resultado da multiplicação do peso bruto transportado pela distância percorrida.

Grupo de Trens	Consumo Específico
Trens com 1 lote	ce_{conv}
Trens com 2 lotes tração convencional	ce_{conv}
Trens com 2 lotes tração distribuída	$0,950.ce_{conv}$
Trens com 2 lotes (assumido no modelo)	$0,975.ce_{conv}$
Trens com 3 lotes	$0,950.ce_{conv}$

Quadro 5: Premissas adotadas para consumo específico de trens no mesmo trecho

As considerações do Quadro 5 e os dados de consumo específico disponíveis permitiram chegar ao consumo absoluto (litros de combustível) de cada serviço, calculado pela multiplicação do consumo específico [litros/kTKB] pelo indicador kTKB do serviço. Este cálculo está exemplificado na Figura 17 para um trem convencional de 16.000 toneladas brutas percorrendo um sub-trecho qualquer com diferentes características topográficas.

Dado:
Trem com tração convencional 16.000 tb



					Total
A	Distância	dado	40 km	20 km	60 km
B	Consumo Específico	dado	1,00 litros / kTKB	3,00 litros / kTKB	1,67 litros / kTKB
C	kTKB percorrido	= 16.000 x A / 1000	640 kTKB	320 kTKB	960 kTKB
D	Consumo Absoluto	= B x C	640 litros	960 litros	1600 litros

Figura 17: Exemplo de cálculo do consumo de combustível na circulação

Assim, a expressão (33) permite estimar o custo total com combustível dos trens em circulação:

$$CDc = cd \cdot \sum_{s \in S} k_s \cdot y_s \quad (33)$$

em que:

cd = custo unitário do óleo diesel [R\$/litro]; e

k_s = consumo de combustível no serviço s [litros].

4.3.2 Custo de Combustível nos Pátios

O consumo de combustível nos pátios foi estimado a partir do consumo médio típico de combustível associado a cada manobra de acoplamento e pela estimativa do número total de acoplamentos ocorridos.

O total de acoplamentos ocorridos em um pátio j será denotado por Q_{acop_j} e depende do número de trens formados nas categorias U, V e F, conforme apresentado na Figura 15, sendo que apenas a categoria V exige dois acoplamentos. Porém, Q_{acop_j} pode ser obtido de forma mais simples pela diferença do número de trens que entraram e saíram do pátio:

$$Q_{acop_j} = X_{e_j} - X_{s_j} \quad (34)$$

E finalmente chega-se ao custo do consumo de diesel no pátio:

$$CDp = cd \cdot k_{acop} \cdot \sum_{j \in J} Q_{acop_j} \quad (35)$$

em que:

k_{acop} = consumo de combustível associado a cada acoplamento [litros/acoplamento].

4.4 FUNÇÃO OBJETIVO

A partir da formulação de custos apresentada nas seções 4.2 e 4.3, chega-se ao custo total CT a ser considerado na função objetivo, expresso em função da frequência dos trens y_s , conforme demonstrado a seguir:

$$CT = CC + CD \quad (36)$$

$$CT = CCc + CCp + CDc + CDp \quad (37)$$

$$CT = ch_{lote} \cdot TC + ch_{lote} \cdot TP + CDc + CDp \quad (38)$$

$$CT = ch_{lote} \cdot TC + ch_{lote} \cdot (TP_{ac} + TP_{man} + TP_{des}) + CDc + CDp \quad (39)$$

A formulação expandida leva à função objetivo representada na expressão (40):

$$\begin{aligned}
\text{Minimizar } CT = & \underbrace{ch_{lote} \cdot \sum_{a \in A} \sum_{s \in S} w_s^a \cdot m_s \cdot y_s \cdot t_a}_{\text{(custo de capital na circulação)}} + \\
& \underbrace{ch_{lote} \cdot \sum_{j \in J} \left(3 \cdot \frac{720}{2 \cdot Xe_j} \cdot Xs_j^U + 3 \cdot \frac{720}{Xe_j} \cdot Xs_j^V + \frac{720}{Xe_j} \cdot Xs_j^F \right)}_{\text{(custo de capital nos pátios intermediários devido ao tempo para acúmulo)}} + \\
& \underbrace{ch_{lote} \cdot \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} o_s^j \cdot m_s \cdot y_s \cdot t_j}_{\text{(custo de capital nos pátios intermediários devido ao tempo das manobras)}} + \\
& \underbrace{ch_{lote} \cdot 0,33 \cdot \sum_{s \in S^{m_s=3}} y_s \cdot m_s}_{\text{(custo de capital adicional por desmembramento de trens longos no porto)}} + \\
& \underbrace{cd \cdot \sum_{s \in S} k_s \cdot y_s}_{\text{(custo de combustível na circulação)}} + \underbrace{cd \cdot k_{acop} \cdot \sum_{j \in J} (Xe_j - Xs_j)}_{\text{(custo de combustível nos pátios)}}
\end{aligned} \tag{40}$$

4.5 RESTRIÇÕES

Para minimizar a função objetivo, é preciso ainda assegurar o atendimento a um conjunto de restrições, conforme discutido a seguir.

4.5.1 Atendimento da Demanda

O atendimento da demanda para cada um dos 11 pontos de carregamento ou grupos de carga p é a restrição básica que gera o fluxo de trens. Assim, o transporte h^p traduzido pelas expressões (8) ou (10) está sujeito à restrição abaixo:

$$h^p = d^p \text{ para cada } p \in P \tag{41}$$

em que:

d^p = demanda de transporte para o grupo de carga p [lotes/mês].

4.5.2 Consistência entre Serviços e Itinerários

Para preservar o balanço de massa dos lotes nos nós de baldeação (pátios intermediários com fluxo resultante nulo), é preciso uma restrição que garanta a consistência entre o número de trens gerados e a quantidade de vezes que cada itinerário foi utilizado. Tal situação fica mais clara com o exemplo da Figura 18:

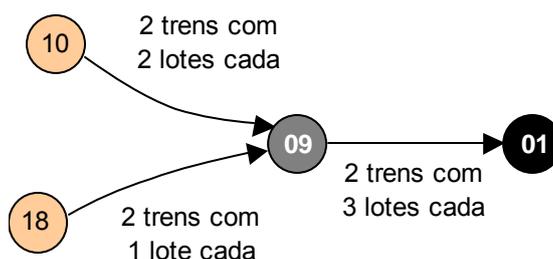


Figura 18: Consistência entre serviços e itinerários para balanço de massa em nó de baldeação

O grupo de carga originado em 10 utiliza duas vezes itinerário onde o primeiro serviço contém dois lotes e o segundo serviço contém três lotes. O grupo de carga originado em 18 utiliza duas vezes itinerário com um lote no primeiro serviço e três lotes no segundo serviço. A formação de dois trens (e não quatro) com três lotes partindo do pátio 9 garante fluxo resultante nulo no pátio intermediário (seis lotes entrando e seis saindo).

Portanto, é preciso assegurar que os trens formados em pátios intermediários sejam gerados na quantidade adequada, obtida pela soma dos lotes movimentados em todos os itinerários atendidos por determinado trem típico, dividida pelo total de lotes contidos no trem típico em questão. Tal restrição é traduzida pela expressão (42):

$$y_s = \frac{\sum_{l \in L} w_l^s \cdot m_l \cdot z_l}{m_s} \quad \text{para cada } s \in S \quad (42)$$

em que:

w_l^s = parâmetro binário $\{0,1\}$ indicativo dos serviços $s \in S$ utilizados pelo itinerário $l \in L$ ($w_l^s = 1$ se o serviço s é utilizado pelo itinerário l e $w_l^s = 0$, caso contrário).

No exemplo acima, os trens de três lotes formados no nó 09 atendem a dois itinerários, de forma que $y_s = \frac{1.2.2 + 1.1.2}{3} =$ dois trens com três lotes.

Note-se que a expressão (42) é genérica e aplica-se também aos trens que partem dos pontos de carregamento. Neste caso, o serviço inicial do itinerário é o próprio trem cuja frequência está sendo considerada e portanto, $m_l = m_s$.

É importante notar pela expressão (42) que o vetor da frequência de trens pode ser obtido a partir do vetor de itinerários, ou seja: $y_s = f(z_l)$. Isto só é possível nesta aplicação porque os trens possuem quantidades preestabelecidas de vagões.

4.5.3 Restrição a Desmembramentos nos Pátios Intermediários

A restrição anterior garante o balanço de massa nos nós de baldeação, mas não impede o desmembramento de trens para manobras subsequentes de formação no mesmo pátio. Tal situação não ocorre na prática e exige uma restrição que a impeça de ocorrer. Esta situação indesejável está ilustrada na Figura 19, onde o balanço de massa está preservado no nó 09, porém uma diferença sutil em relação à figura anterior indica que apenas trens com dois lotes chegam ao pátio intermediário, exigindo o desmembramento de pelo menos um dos trens para partida dos trens com três lotes.

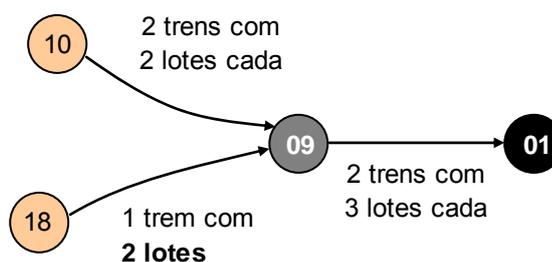


Figura 19: Exemplo de solução a ser evitada, por estar associada a desmembramento dos trens

O desmembramento indesejado de trens com dois lotes como mostrado acima viola a expressão (25), que associa um trem longo formado para cada trem com dois lotes destinados ao pátio (casos II e III ilustrados na Figura 15). Como trens longos também podem ser formados a partir de três trens com um lote (caso IV da Figura

15), o total de trens longos formados em um pátio qualquer (Xs_j^G), está sujeito à seguinte restrição:

$$Xs_j^G \geq Xe_j^F \text{ para cada pátio } j \in J \quad (43)$$

A expressão acima impede a situação ilustrada na Figura 19.

4.5.4 Impedimentos na Programação de Trens com Dois Lotes nos Pontos de Carregamento

Mesmo que um ponto de carregamento esteja apto a carregar trens com dois lotes, pode ser impossível programar 100% dos trens com dois lotes, devido a necessidades específicas de curto prazo nos programas de carregamento. Portanto, utiliza-se a expressão (44) para traduzir tal restrição prática:

$$\sum_{s \in S^{m_s=2}} o_s^p \cdot y_s \leq Rs_{m_s=2}^p \text{ para cada } p \in P \quad (44)$$

em que:

$S^{m_s=2}$ = conjunto de serviços contendo dois lotes; e

$Rs_{m_s=2}^p$ = limite superior imposto para a frequência de serviços com dois lotes partindo da origem do grupo de carga p [trens/mês].

4.5.5 Limitações na Capacidade de Tráfego – Trechos Singelos

Uma vez que para os trechos singelos a_f não foi feita estimativa do efeito congestionamento sobre os tempos de viagem, a restrição ao fluxo de trens foi feita pela adoção de valores máximos admissíveis para o fluxo dos serviços (minério) no sentido exportação. O fluxo dos serviços é calculado pela expressão (45):

$$Q_s^{a_f} = \sum_{s \in S} w_s^a y_s \text{ para cada } a_f \in A \quad (45)$$

em que:

$Q_s^{a_f}$ = total de serviços (trens de minério) no sentido exportação do sub-trecho a_f [trens/mês].

De forma análoga ao procedimento para os trechos a_v , cada sub-trecho a_f também está sujeito ao tráfego de outros trens. A capacidade de tráfego total para cada sub-trecho a_f é conhecida para a ferrovia em estudo, a partir da formulação descrita por Brina (1988b, p. 196).

Valores máximos admissíveis para $Q_s^{a_f}$ foram impostos levando-se em conta a concorrência com os fluxos de outros trens (em ambos os sentidos) e com os trens de minério no sentido importação²⁴. Portanto:

$$Q_s^{a_f} \leq R s^{a_f} \text{ para cada } a_f \in A \quad (46)$$

em que:

$R s^{a_f}$ = limite superior admissível²⁵ para $Q_s^{a_f}$, ou capacidade disponível [trens/mês].

4.5.6 Limitações na Capacidade dos Pátios Intermediários

Era preciso garantir que a quantidade de manobras associada à solução gerada fosse atendida pelos pátios intermediários sem maiores problemas. A adoção de limites máximos admissíveis para a quantidade de vagões processados nos pátios intermediários é também uma restrição adotada por Keaton (1989) e Marín e Salmerón (1996).

A informação disponível referente a limites na capacidade de processamento dos pátios de formação diz respeito ao número máximo de trens com dois ou três lotes possíveis de serem formados em cada pátio. A partir deste limite, é possível obter a capacidade de escoamento de lotes supondo apenas trens curtos ou apenas trens longos:

$R m_{m_s=2}^j$ = limite admissível para a saída de lotes do pátio j supondo apenas formação de trens com dois lotes [lotes/mês]; e

$R m_{m_s=3}^j$ = limite admissível para a saída de lotes do pátio j supondo apenas formação de trens com três lotes [lotes/mês];

²⁴ Assumiu-se que para um trecho a_f qualquer, a frequência dos serviços de minério é a mesma em ambos os sentidos de tráfego, ou seja, para cada trem no sentido exportação existe outro trem no sentido importação.

²⁵ No período de safra a concorrência com outros trens aumenta, reduzindo $R s^{a_f}$.

Apurou-se que a capacidade de processamento de lotes em trens curtos é 10% a 15% maior que a de lotes nos trens longos, conforme o pátio considerado. Para fins de simplificação, assumiu-se que todos os pátios estão sujeitos ao limite mais baixo (mais conservador). Assim:

$$M_j = \sum_{s \in S} o_s^j \cdot m_s \cdot y_s \leq Rm_{m_s=3}^j \text{ para cada pátio } j \in J \quad (47)$$

em que:

M_j = quantidade de lotes contidos em todos os trens formados no pátio j [lotes/mês].

4.5.7 Limitação de Frota

A cada solução factível para serviços e itinerários haverá uma correspondente frota necessária, que precisa ser confrontada com a frota disponível. Considera-se aqui a parcela da frota alocada no fluxo de exportação, quando é possível assumir sempre uma locomotiva atrelada a cada lote de vagões.

O atendimento à demanda de transporte exigirá uma frota cujo tamanho necessário dependerá da quantidade e duração das viagens, bem como das operações em pátios.

Koo, Lee e Jang (2004) desenvolveram um estudo para o porto de Busan na Coreia, onde foi proposto um método iterativo para dimensionar a frota mínima necessária de veículos para transporte de contêineres, além de estabelecer o roteamento de cada veículo no horizonte de planejamento de um turno de oito horas. Embora tenha sido um estudo voltado para o ambiente portuário, a formulação matemática para a solução inicial do dimensionamento de frota pode ser aplicada no presente trabalho. A frota necessária é obtida pela somatória de todos os tempos de utilização dos veículos dividida pelo intervalo de tempo em que a frota foi usada.

Tal princípio também é utilizado por Brina (1988b, p. 174), ressaltando-se que na prática é preciso considerar um quantitativo adicional de veículos referente à indisponibilidade por manutenção.

Com base no exposto e considerando-se apenas os tempos do material rodante na circulação e nos pátios, tem-se:

$$Frota_{req} = \frac{TC + TP}{720} \leq Frota_{disp} \quad (48)$$

em que:

$Frota_{req}$ = frota requerida pela solução gerada [locomotivas ou lotes de vagões]; e

$Frota_{disp}$ = frota disponível [locomotivas ou lotes de vagões].

4.5.8 Restrições Elementares

É preciso também impor restrições de não negatividade e garantia de número inteiro de trens e itinerários:

$$y_s \geq 0 \text{ e inteiro para todo } s \in S \quad (49)$$

$$z_l \geq 0 \text{ e inteiro para todo } l \in L \quad (50)$$

4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Embora a função objetivo tenha sido expressa em termos da frequência dos trens y_s , isto é, $CT = f(y_s)$, foi verificado na expressão (42) que $y_s = f(z_l)$. Portanto, tem-se que a variável de decisão do problema limita-se ao vetor z_l , indicando que trata-se de um problema de programação não linear com 69 variáveis inteiras, sujeito às restrições apresentadas anteriormente.

A seguir, no capítulo cinco, será mostrada a estratégia adotada para a solução do problema e a discussão dos resultados encontrados.

5 SOLUÇÃO, RESULTADOS E DISCUSSÃO

O problema formulado no capítulo quatro possui formulação inteira e não linear com 69 variáveis de decisão, em que o volume de carga escoado por cada itinerário está diretamente associado ao fluxo de trens com quantidades preestabelecidas de lotes, tornando mais simples a solução do problema, se comparado ao caso de Crainic, Ferland e Rousseau (1984). Assim, a função custo, a frequência de trens e o fluxo escoado em cada grupo de carga são conhecidos a partir do número de vezes que cada itinerário é utilizado (z_i), e a solução não exigiu o processo iterativo proposto por Crainic e Rousseau (1986), descrito na seção 2.4.1. Todas as não linearidades do problema formulado referem-se a expressões de tempos em vias de circulação ou em pátios. Se a função objetivo considerar apenas o custo de combustível e se for desprezada a restrição de frota, têm-se um problema de programação linear inteira (PPLI), o que o torna mais fácil de ser resolvido.

5.1 OPÇÕES PARA SOLUÇÃO

Para a solução do problema foram consideradas três abordagens possíveis:

- a) implementação de uma heurística específica para a aplicação feita;
- b) aplicação do algoritmo proposto por Crainic e Rousseau (1986); e
- c) uso de um aplicativo computacional disponível no mercado.

A primeira alternativa foi descartada por implicar em maior tempo de desenvolvimento e grau de incerteza de sucesso, diante do prazo disponível.

A segunda alternativa exigiria a adaptação e implementação de um algoritmo originalmente concebido para solucionar problema muito mais abrangente (multiproduto) e com características diferentes do transporte de minério considerado (cabendo citar, por exemplo, premissas relativas a tamanhos preestabelecidos dos trens e modelagem dos tempos em pátio). Implicaria também em maior tempo de desenvolvimento.

Dado o tamanho relativamente pequeno da rede de transporte avaliada e considerando-se o avanço ocorrido nos últimos anos no desenvolvimento de aplicativos computacionais, optou-se pela terceira alternativa.

5.2 OPÇÃO ESCOLHIDA E ESTRATÉGIA ADOTADA

Foram pesquisados aplicativos computacionais disponíveis no mercado para solucionar o problema formulado²⁶. Era preciso garantir que a opção escolhida fosse robusta o suficiente para lidar com elevado número de variáveis inteiras e permitisse avaliar até que ponto uma solução encontrada era suficientemente próxima do ótimo global, no caso de um modelo não convexo.

O *software* LINGO²⁷ era uma das opções disponíveis, sendo bastante utilizado tanto em ambiente acadêmico quanto pela indústria, permitindo modelar PPI não lineares (PPNLI). Verificou-se ainda que havia a alternativa de utilizar os mesmos *solvers* do LINGO através do *software* *What's Best!*[®], adaptado para uso em ambiente de planilha eletrônica (neste caso, como suplemento do Excel). Neste caso, a facilidade para modelagem e estruturação dos dados de entrada e saída tornam a interface com o usuário bastante amigável, reduzindo o tempo de implementação.

LINGO e *What's Best!*[®] dispõem de um *solver* capaz de encontrar o ótimo global em problemas não convexos, sem interromper a busca após chegar ao primeiro ótimo local. A abordagem empregada é a conversão do problema não linear/não convexo em diversos sub-problemas lineares/convexos, aliada ao método *branch-and-bound*, o qual “[...] rapidamente chega a boas soluções, e, se permitido tempo suficiente, garante matematicamente o ótimo global [...]” (GAU; SCHRAGE, 2003, p. 147).

Marín e Salmerón (1996) confirmam que o método *branch-and-bound* gera solução exata para problema da mesma natureza, em malhas ferroviárias de menor porte.

Pelo exposto, optou-se pelo *software* *What's Best!*[®] v.10, cuja licença com plenos recursos foi cedida pela LINDO SYSTEMS, Inc para esta pesquisa (Figura 20).

²⁶ Uma comparação de alternativas de aplicativos, suas limitações e funcionalidades está disponível em: <<http://www.aimms.com/operations-research/mathematical-modeling-tools>>. Acesso em: 15 nov. 2008.

²⁷ Fornecido pela LINDO SYSTEMS, Inc.

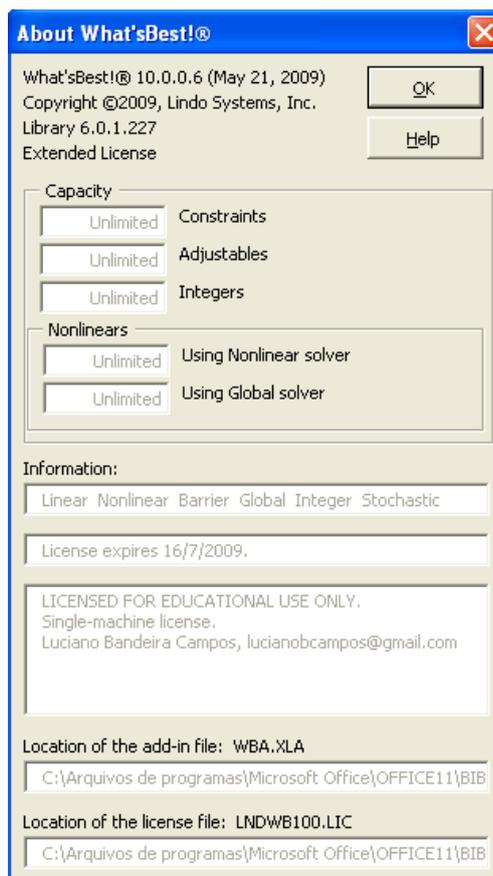


Figura 20: Aplicativo computacional escolhido para solução do modelo

O aplicativo computacional *What's Best!*[®] possui quatro classes de *solvers* disponíveis: para PPLs, PPNLs, PPIs e por último o *global solver*, indicado para PPNLs não convexos. O *global solver* é um recurso opcional que necessita ser habilitado pelo usuário, caso desejado. Para qualquer dos *solvers* utilizado, o usuário pode acompanhar a evolução e os resultados do processo de busca, o qual pode ser interrompido a qualquer instante (LINDO SYSTEMS INC, 2007).

No caso de a função objetivo conter apenas a parcela relativa ao custo de combustível (PPLI), verificou-se que o *What's Best!*[®] recorreu ao método *branch-and-bound*, sem necessidade do *global solver*, com tempo de solução muito curto.

Quando incluídas não linearidades na função objetivo e restrições, o *global solver* permitiu identificar ótimos locais encontrados no decorrer do processo de solução e observou-se aumento significativo no tempo de solução (a ser detalhado adiante).

Segundo Ragsdale (2007), muitos aplicativos computacionais não permitem identificar o limite teórico ótimo da função objetivo em PPNLs, o que dificulta julgar a qualidade da solução encontrada (possível ótimo local).

What's Best![®] por sua vez, disponibiliza e modifica o valor do limite teórico ótimo, na medida em que o processo de busca avança, conforme apresentado na Figura 21.

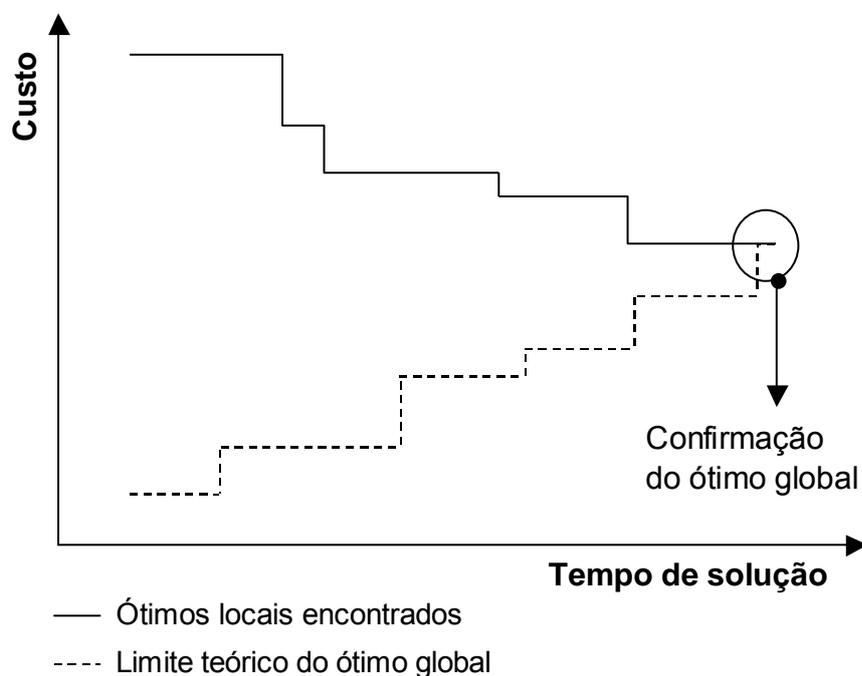


Figura 21: Processo de busca do ótimo global pelo aplicativo *What's Best!*[®]

Verifica-se pela Figura 21 que o limite teórico ótimo é refinado e melhora ao longo do tempo, aproximando-se dos melhores valores até então já obtidos para a função objetivo. Este processo de convergência tem duração variável e pode durar de horas a dias, até a confirmação do ótimo global, dependendo do problema considerado.

O valor obtido para a função objetivo foi considerado ótimo global quando sua diferença em relação ao limite teórico foi menor ou igual a 1×10^{-6} . Esta é a tolerância padrão utilizada pelo *global solver* para confirmação da condição ótima. Durante o processo de busca para melhorar os resultados já obtidos, só são consideradas as soluções candidatas tal que: $(CT_{melhor} - CT_{candidato}) > 1 \times 10^{-6}$, onde CT_{melhor} é o menor custo já encontrado e $CT_{candidato}$ é o custo da nova solução candidata.

Nos testes, verificou-se que vários fatores afetam o tempo de convergência, podendo-se citar, por exemplo, a solução inicial adotada e a imposição de restrições específicas. A restrição de valor inteiro para as variáveis de decisão (PPNLI ao invés de PPNL) contribui sensivelmente para aumentar o tempo de convergência.

Por tal razão, a estratégia usada na solução do PPNLI foi inicialmente solucionar a versão relaxada (PPNL), e o ótimo global encontrado para o PPNL foi usado como limite de referência para o problema em sua versão inteira. Isto pode ser feito, pois o valor da função objetivo numa formulação inteira nunca poderá ser melhor que o produzido pelo ótimo global na versão relaxada (LINDO SYSTEMS INC, 2007, p. 56). Encontrado o ótimo global para o PPNL, resolveu-se o PPNLI e interrompeu-se o processo de busca tão logo um ótimo local suficientemente próximo do global relaxado fosse encontrado, conforme será mostrado adiante.

Toda a entrada e saída de dados foi feita por planilhas eletrônicas, utilizando-se funções com sintaxe própria do *What's Best!*[®] para inclusão de restrições. A sintaxe é semelhante à utilizada em Excel, onde são estabelecidos vínculos entre as células.

Para solução do problema, utilizou-se um computador com processador de 2,66 GHz e 504 MB de memória RAM.

5.3 CENÁRIOS ANALISADOS

Dentre as conjunturas possíveis de serem analisadas, optou-se por considerar um mês típico de transporte ocorrido em 2007 (movimentação média mensal de minério ao longo do ano), quando o ritmo de transporte ainda era intenso, numa condição anterior à crise econômica mundial deflagrada em 2008. Considerou-se um mês típico de safra, quando aumenta a incidência dos trens dedicados ao transporte de grãos, contribuindo para aumentar o congestionamento na malha ferroviária.

Uma demanda mensal totalizando 1.358 lotes de minério destinados ao complexo portuário foi distribuída entre os 11 pontos de origem, proporcionalmente ao volume de produção destes diversos pontos de carregamento.

Para a demanda acima e demais restrições da seção 4.5, foram consideradas três abordagens para a função objetivo:

- 1) custo de combustível;
- 2) custo de frota (custo de capital);
- 3) custo de combustível + custo de capital.

Qualquer que seja a abordagem considerada, nota-se que o custo poderá variar entre um valor mínimo desejado (piso), e um valor máximo (teto)²⁸. O piso pode ser interpretado como um custo “fixo” indispensável, isto é, por melhor que seja o planejamento, o atendimento da demanda exigirá consumo de tempo, frota e combustível. O teto pode ser interpretado como resultante do pior planejamento em termos de custo. Tal situação está representada na Figura 22.

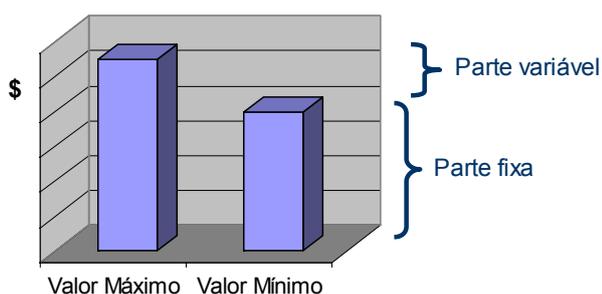


Figura 22: Variação possível no valor da função objetivo para uma dada abordagem escolhida

Vale ressaltar que esta distinção entre custo fixo e variável aqui discutida visa apenas facilitar a interpretação dos resultados, e não deve ser confundida com definições clássicas de custos fixos e variáveis em Contabilidade Gerencial. Aqui, mesmo na parte fixa existe custo com combustível, por exemplo, que em Contabilidade Gerencial seria normalmente classificado como custo variável.

5.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A diferença entre o teto e o piso corresponde à parcela variável do custo, em que a qualidade do planejamento poderá ser percebida. A análise dos resultados focou, portanto, a parcela variável, a qual, por menor que seja em termos percentuais, representa valor considerável em termos financeiros, pois a parcela “fixa” (piso) é bastante representativa em termos absolutos para qualquer abordagem.

Até o momento foi mencionada a variação do custo em cada abordagem isoladamente. Porém, a comparação dos resultados entre abordagens poderá ser proveitosa. Note-se que, independentemente da abordagem adotada, é possível calcular para qualquer solução os três custos citados. As proporções entre os custos

²⁸ O teto foi obtido tratando-se a função objetivo como sendo de maximização do custo no atendimento à demanda citada.

obtidos para as três abordagens estão apresentadas de forma adimensional na Tabela 1, permitindo uma comparação. Como era esperado, o menor custo total foi alcançado pela abordagem 3, e foi associado ao valor 100, tomado como referência.

Tabela 1: Resultados comparativos dos custos

FUNÇÃO OBJETIVO → CUSTO ↓	Abordagem 1		Abordagem 2		Abordagem 3	
	CUSTO DE COMBUSTÍVEL		CUSTO DE FROTA		CUSTO DE COMBUSTÍVEL + FROTA	
	TETO	PISO	TETO	PISO	TETO	PISO
Custo de Combustível	49,59	48,24	49,53	48,37	49,53	48,31
Custo de Capital (frota)	54,71	52,80	56,58	51,64	56,58	51,69
Custo Combustível + Frota	104,30	101,05	106,11	100,01	106,11	100,00
Parcela Variável (Teto - Piso)	1,35		4,94		6,11	
Variação Percentual Teto/Piso	2,8%		9,6%		6,1%	

A seguir, serão definidos dois indicadores que permitem uma melhor análise dos resultados entre abordagens. Tomando como exemplo o custo de combustível, considere-se a Figura 23 para ilustrar o conceito proposto.

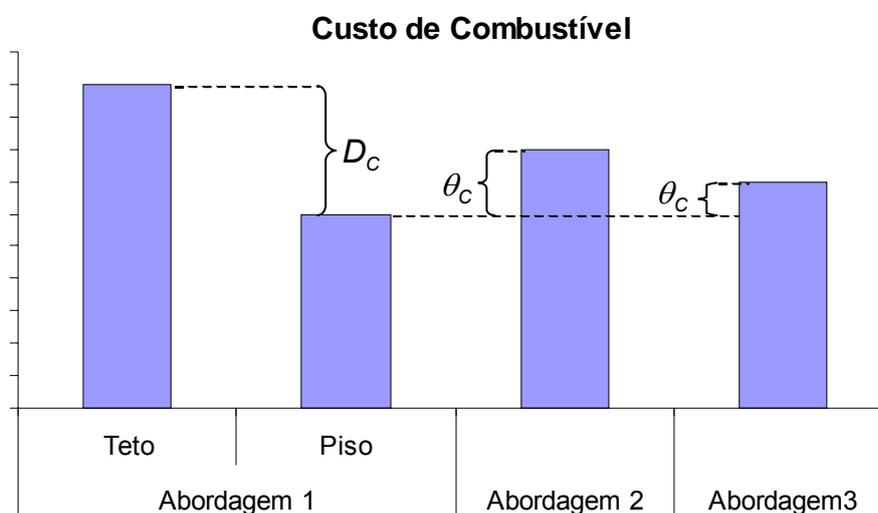


Figura 23: Exemplo da variação do custo de combustível entre diferentes abordagens para a função objetivo

D_c = variação máxima possível no custo de combustível; e

θ_c = diferença entre o custo de combustível em uma abordagem qualquer e o valor mínimo possível alcançado na abordagem 1.

De forma análoga, pode-se definir parâmetros para as demais abordagens de custo:

D_F = variação máxima possível no custo de frota (custo de capital);

θ_F = diferença entre o custo de capital em uma abordagem qualquer e o valor mínimo possível alcançado na abordagem 2;

D_{C+F} = variação máxima possível no custo de combustível + frota; e

θ_{C+F} = diferença entre o custo de combustível + frota em uma abordagem qualquer e o valor mínimo possível alcançado na abordagem 3.

A aplicação dos indicadores definidos acima aos resultados da Tabela 1, leva à Tabela 2, permitindo uma comparação da parcela variável utilizada em termos percentuais.

Tabela 2: Comparação da parcela variável do custo entre as abordagens

Quantificação da Parcela Variável do Custo Acima do Piso		Abordagem 1	Abordagem 2	Abordagem 3
		MINIMIZAR COMBUSTÍVEL	MINIMIZAR FROTA	MINIMIZAR COMBUSTÍVEL + FROTA
Custo de Combustível	θ_C/D_C	0.0%	9.6%	5.0%
Custo de Capital (Frota)	θ_F/D_F	23.5%	0.0%	1.0%
Custo Combustível + Frota	θ_{C+F}/D_{C+F}	17.1%	0.2%	0.0%

Nota-se que a solução encontrada para minimizar o consumo de combustível está associada a um custo de capital que consumiu 23,5% da variação máxima possível na frota necessária.

A abordagem 2, por sua vez, minimizou a frota necessária, mas o custo de combustível associado à solução encontrada consumiu 9,6% da parcela variável. Em termos de custo total (combustível e frota), a abordagem 2, apesar de buscar a minimização de frota, gerou solução cujo custo total foi equivalente ao da abordagem 3 pois consumiu apenas 0,2% da parte variável.

Finalmente, a abordagem 3 levou a uma solução atraente, pois resultou em custo de capital praticamente idêntico ao obtido na abordagem 2 (consumindo apenas 1% da

parcela variável) e o custo de combustível ficou também próximo ao piso, consumindo 5% da parcela variável.

Na Tabela 3 são apresentados os tempos de solução nas versões inteira e relaxada do problema, bem como a diferença em relação ao limite teórico do ótimo global.

Tabela 3: Tempo de solução e diferença em relação ao limite teórico ótimo

Tempo de Solução e Diferença em Relação ao Limite Teórico	Abordagem 1	Abordagem 2	Abordagem 3
	MINIMIZAR COMBUSTÍVEL	MINIMIZAR FROTA	MINIMIZAR COMBUSTÍVEL + FROTA
Formulação PPLI (sem restrição de frota)	00:00:01	-	-
Diferença	0,0000%	-	-
Formulação PPNLI (com restrição de frota)	00:04:37	-	-
Diferença	0,0000%	-	-
Formulação PPNL (relaxado, mas com restrição de frota)	-	01:26:19	01:24:55
Diferença	-	0,0000%	0.0003% (*)
Formulação PPNLI (com restrição de frota)	-	00:05:27	00:08:29
Diferença em relação ao limite teórico relaxado	-	0.0000% (*)	0.0004% (*)

Nota: (*) Solução interrompida antes da comprovação do ótimo global.

A abordagem 1 formulada como PPLI levou ao ótimo global muito rapidamente (1 segundo). Nesta condição, a função objetivo é linear e a restrição de frota disponível foi ignorada por possuir não linearidades (o cálculo da frota necessária é dependente do tempo).

Considerando a restrição de frota na abordagem 1, o problema passa a ser PPNLI, porém a função objetivo continua linear. O tempo de solução para o ótimo global nesta condição subiu para 4 minutos e 37 segundos.

A formulação PPNL (relaxada) para a abordagem 2 levou ao ótimo global em menos de 1,5 horas. Já na abordagem 3, a solução foi interrompida com cerca de 1 hora e 25 minutos, quando o ótimo local encontrado já estava comprovadamente com diferença de 0,0003% em relação ao limite teórico alcançado.

As abordagens 2 e 3 com formulação inteira (PPNLI) levariam mais tempo para confirmação do ótimo global, mas o mecanismo de busca em poucos minutos levou a valores próximos do limite teórico encontrado na versão relaxada, o que permitiu interromper a busca. A estratégia discutida na seção 5.2 comprovou, portanto, que o método *branch-and-bound* de fato converge rapidamente para boas soluções.

A seguir, será discutido o significado prático e operacional das soluções encontradas para cada abordagem, em que a demanda de 1.358 lotes destinados ao complexo portuário está distribuída entre os 11 pontos de carregamento (nós de oferta). As soluções para as diversas abordagens estão apresentadas no Apêndice C, incluindo o detalhamento dos itinerários utilizados.

No grafo da Figura 24, está representada a solução obtida para a rede de serviços, com o objetivo de minimizar o custo de combustível. A frequência sugerida para os trens a serem operados está indicada nos arcos.

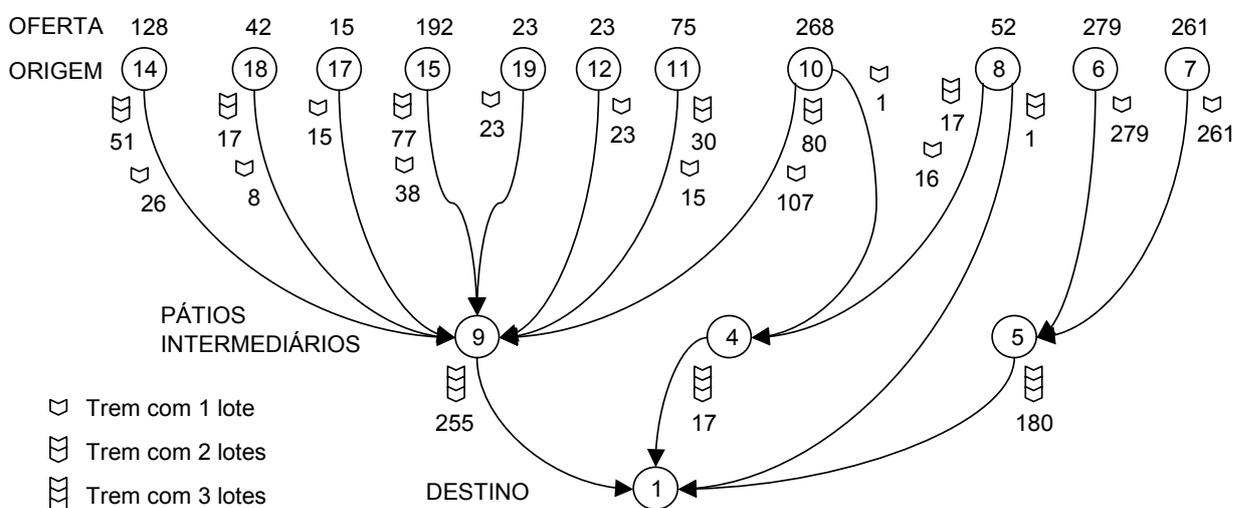


Figura 24: Solução para a rede de serviços minimizando o gasto de combustível (abordagem 1)

Nota-se claramente o envio quase exclusivo de trens longos ao porto (trens com três lotes em tração distribuída), com a incidência de manobras de formação em todos os pátios intermediários. Tal padrão de solução é explicado pela reconhecida eficiência energética desta classe de trens. Houve um único trem direto ao porto, partindo do nó 8 e 452 trens longos.

Na abordagem 2, objetivando-se minimizar a frota necessária, verifica-se pela Figura 25, que o envio de trens longos ao porto caiu de 452 trens para 382 trens (15% de redução) e deixou-se de utilizar o nó 4 para manobras de formação. A incidência de trens diretos até o porto cresceu de um para 106 trens (partindo dos nós 14, 10 e 8).

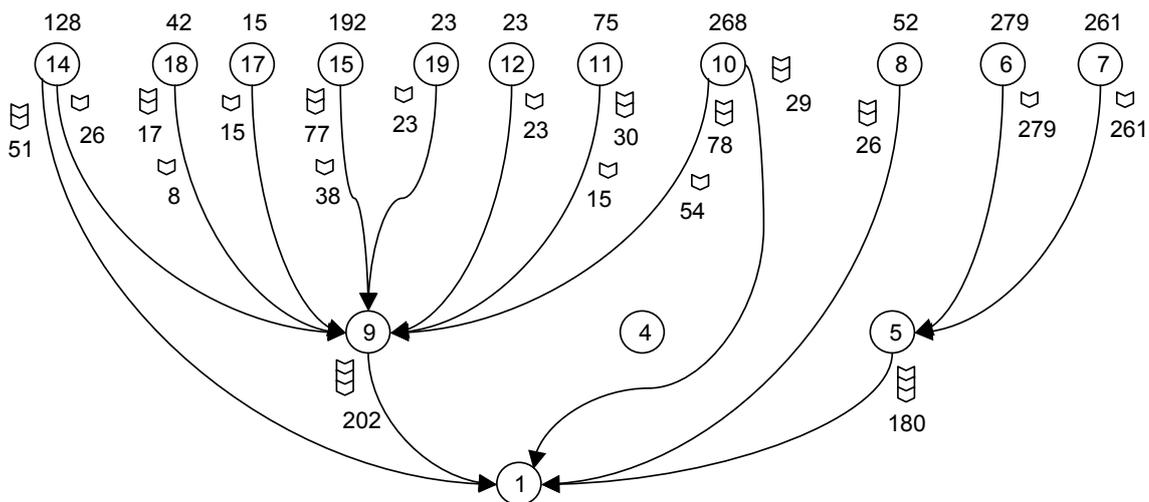


Figura 25: Solução para a rede de serviços minimizando a frota necessária (abordagem 2)

A abordagem 3 (minimizar custo de combustível + frota) resultou em 414 trens longos e 58 trens diretos, uma quantidade intermediária de trens, se comparada à obtida nas soluções anteriores. Novamente nota-se que o nó 4 deixou de ser usado, conforme pode ser verificado na Figura 26.

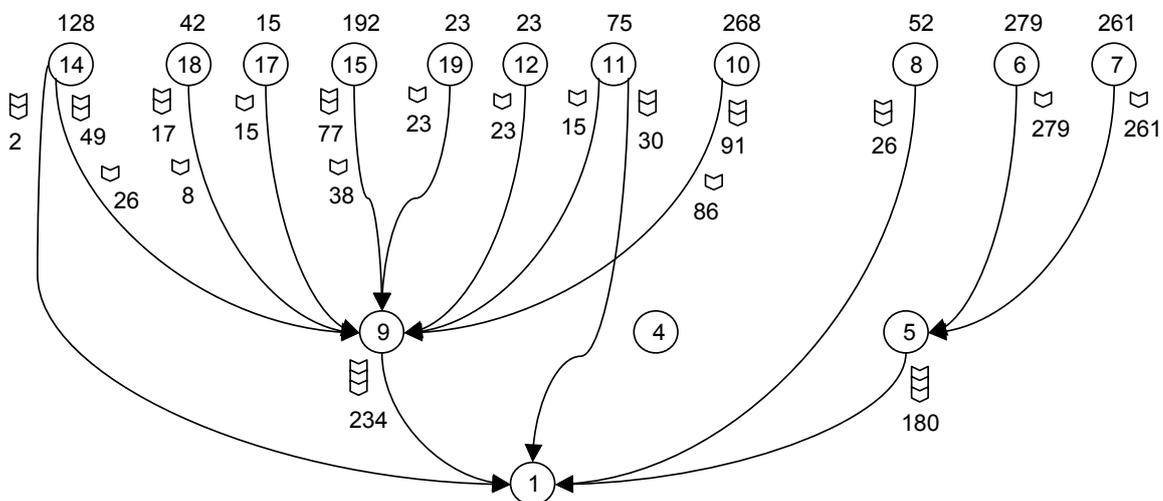


Figura 26: Solução para a rede de serviços na abordagem 3

A distribuição percentual do tempo de permanência do material rodante na circulação e nos pátios em cada abordagem está apresentada no Gráfico 2. Ao contrário do que é normalmente encontrado na literatura, a participação verificada do tempo em circulação foi bastante superior à do tempo em pátios pelas seguintes razões: primeiramente, o transporte do minério é feito por uma frota exclusiva em trens padronizados com tamanhos preestabelecidos, o que agiliza as operações nos

pátios e terminais, se comparado aos trens de carga geral. No percurso dos pontos de carregamento até o terminal exportador, os blocos de vagões já estão formados, e não há operações de classificação para formação dos blocos com vagões carregados. Além disto, não foram incluídas na formulação as parcelas de tempo gastas pelo material rodante nos terminais de carregamento. No terminal portuário, foi considerada apenas a penalidade de tempo adicional imposta ao desmembramento dos trens longos.

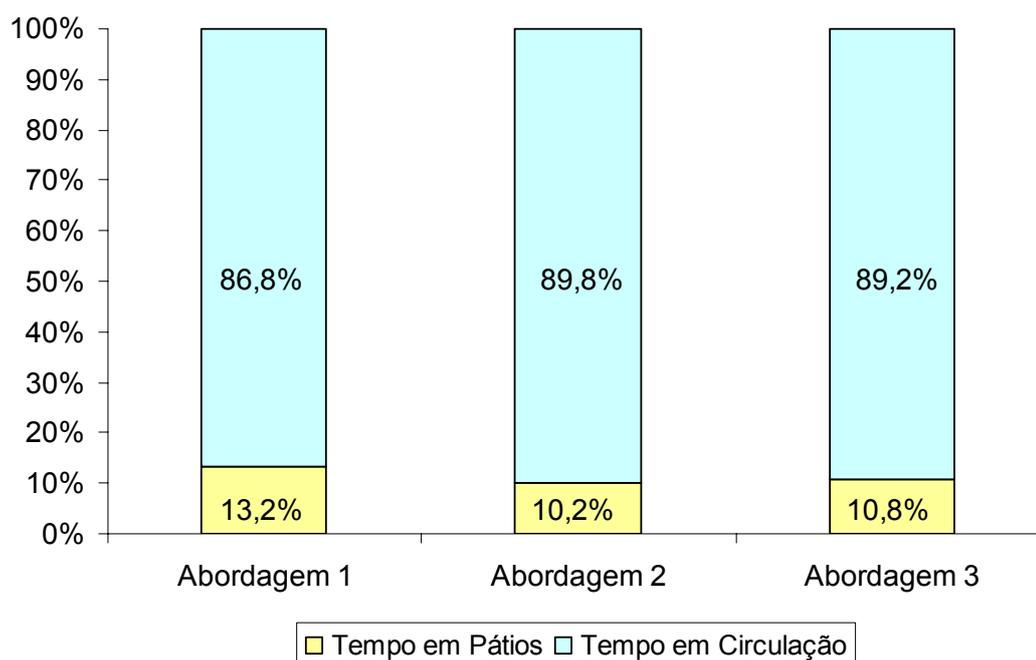


Gráfico 2: Distribuição percentual do tempo gasto pelo material rodante na circulação e nos pátios

Na Tabela 4 são mostrados os tempos de permanência da frota obtidos para cada cenário e a variação verificada em relação à abordagem 1.

Tabela 4: Tempo de permanência da frota em pátios e na circulação.

	Abordagem 1	Abordagem 2	Abordagem 3
Tempo em Pátios [lotes x h]	3.571	2.716	2.869
Diferença em relação à Abordagem 1	-	-23,9%	-19,7%
Tempo em Circulação [lotes x h]	23.531	23.790	23.662
Diferença em relação à Abordagem 1	-	1,1%	0,6%
Tempo Total [lotes x h]	27.102	26.506	26.531
Diferença em relação à Abordagem 1	-	-2,2%	-2,1%

Nota-se que a abordagem 1 resultou no maior tempo de permanência dos lotes em pátios e no menor tempo em circulação. Comparadas à abordagem 1, as abordagens 2 e 3 apresentaram redução de pouco mais de 2% no tempo total de uso dos lotes (pátios + circulação), a partir de uma maior redução nos tempos em pátio mas um pequeno aumento nos tempos de circulação. Tal ganho de tempo equivale a uma redução de 70 vagões na frota necessária pela abordagem 1.

Vale notar que no caso de a função objetivo considerar o custo de capital, a restrição de frota disponível tende a ser uma restrição fraca, pois a solução tenderá naturalmente a reduzir a frota requerida. Por outro lado, ao se considerar apenas o custo de combustível (abordagem 1), a restrição de frota poderá ser mais influente.

Por fim, com o intuito de avaliar o impacto da modelagem do congestionamento na circulação de trens sobre a solução encontrada, a abordagem 2 foi resolvida fixando-se os tempos de viagem fora dos pátios (o congestionamento na circulação foi desprezado). Com tal premissa, a minimização da frota necessária focou a redução do tempo de permanência em pátios, obtendo-se a solução mostrada na Figura 27.

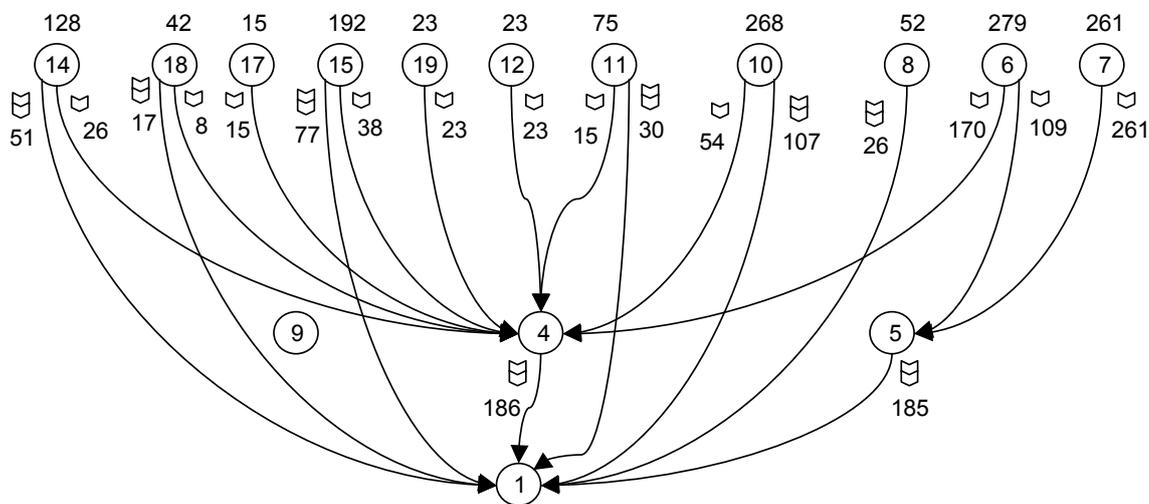


Figura 27: Solução minimizando a frota necessária (abordagem 2), desprezando-se o congestionamento na circulação

O padrão da solução gerada mudou, eliminando-se completamente os trens longos, e priorizando-se os trens com dois lotes, os quais proporcionam maior agilidade no desmembramento após chegada ao porto. Tais trens podem ser formados nos pátios intermediários com menor tempo de acúmulo em relação aos trens longos, ou podem ser trens diretos do ponto de carregamento até o porto. Neste cenário, o

número de trens diretos com dois lotes triplicou (de 106 para 308), reduzindo sensivelmente o tempo de permanência nos pátios, conforme apresentado no Gráfico 3.

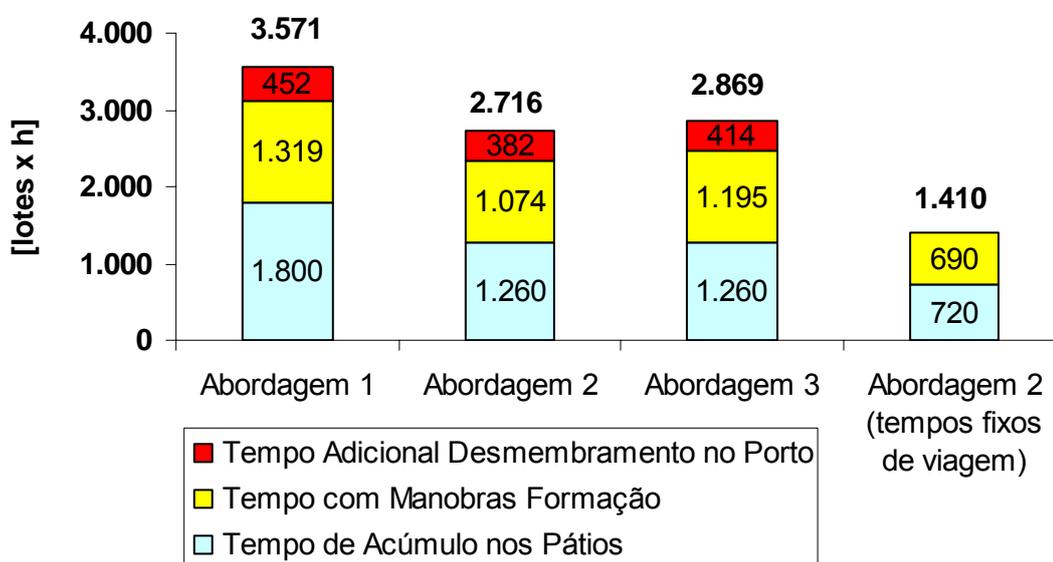


Gráfico 3: Tempos de permanência dos lotes em pátio, para os diversos cenários avaliados

Comparando-se os tempos de permanência em pátio para os diversos cenários, verificou-se que a abordagem 1 foi a única que utilizou todos os pátios intermediários para formação de trens. Para este caso, a baixa incidência de trens utilizando o pátio intermediário 4 (Figura 24) indica que os trens ali originados precisaram aguardar mais tempo para acúmulo dos lotes, contribuindo para elevar esta parcela dos tempos em pátio. Entretanto, tal fato não influenciou a solução obtida, visto que a função objetivo da abordagem 1 focou apenas o custo de combustível.

A comparação de dados reais com os resultados encontrados pelo modelo não foi feita, pois só se justificaria caso a função objetivo considerada refletisse as mesmas diretrizes gerenciais da ferrovia avaliada, em cenário semelhante ao que foi testado (condição que não pôde ser garantida). Também não havia até a conclusão deste trabalho, uma ferramenta de apoio à decisão cujos resultados pudessem ser confrontados com os obtidos pelo modelo aqui desenvolvido. Este foi justamente um dos fatores que motivaram a proposta do presente trabalho. O que se tem notado na prática (sistema real) é uma tendência à maior predominância de trens longos em situações com enfoque na economia de combustível aliada a cenários de baixa

demanda. Em contrapartida, cenários de alta demanda geralmente têm levado ao decréscimo dos trens longos operados.

Como observação final, verificou-se que dadas as inúmeras combinações possíveis para as variáveis de decisão, pode-se encontrar para cada abordagem analisada, outras soluções alternativas que apresentem custos semelhantes ou idênticos. Isto foi verificado no processo de busca das soluções, quando foram encontradas respostas distintas com ligeiras variações nas variáveis de decisão, conduzindo a valores parecidos na função objetivo. Tais respostas guardavam um mesmo padrão geral, no que se refere aos tipos de serviços escolhidos e quantidade de manobras nos pátios.

Soluções alternativas podem ser obtidas a partir de diferentes soluções iniciais ou também pela introdução de restrições adicionais, como por exemplo:

- fixando-se a frequência de alguns serviços específicos;
- estabelecendo-se limites superiores ou inferiores para a frequência de alguns serviços; e
- alterando-se os limites para manobras de formação nos pátios intermediários.

Tais avaliações contribuem para uma melhor compreensão do comportamento do sistema analisado e para o planejamento das operações.

6 CONCLUSÃO

Esta dissertação propôs o desenvolvimento de um modelo integrado de apoio ao planejamento tático da rede de serviços (trens) utilizada no transporte ferroviário de cargas, aplicado a conhecida ferrovia brasileira. Nesta ferrovia, foi estudado o fluxo de trens carregados com minério de ferro entre 11 pontos de origem, três pátios intermediários e um único terminal exportador, utilizando-se simultaneamente configurações de trens com diferentes quantidades preestabelecidas de vagões e locomotivas.

O problema estudado consiste em planejar a rede de serviços (trens), com vistas ao atendimento de uma demanda mensal de transporte ao menor custo e atendendo a diversas restrições. Como resultado, o modelo propõe para cada ponto de origem de carga a sequência de trens e operações até o destino, bem como o volume de carga a ser escoado por cada sequência. Tal resultado permite ainda determinar a frequência mensal sugerida para cada trem típico a ser operado.

A modelagem do problema gerou uma formulação não linear inteira e produziu diferentes soluções, conforme a abordagem escolhida para a função objetivo de minimização do custo. Verificou-se ainda que em pouco tempo o aplicativo computacional escolhido obteve o valor ótimo global ou convergiu para valores muito próximos do ótimo global. As não linearidades do modelo resultam do cálculo da frota necessária nas vias de circulação e pátios de manobra, onde a interação entre trens e o efeito congestionamento foram modelados.

O modelo desenvolvido foi resultado do aprimoramento e ampliação do escopo de um modelo preliminar (Campos; Pompermayer; Cruz, 2008) que originalmente havia ficado restrito ao trecho principal da ferrovia estudada e não havia considerado a interação entre trens. Com a modelagem destas interações, o modelo tornou-se mais adequado para análises de compensação entre soluções alternativas, levando-se em conta os tempos de permanência do material rodante em pátios e nas vias de circulação. Como exemplo, o modelo pôde apontar soluções que, embora tenham aumentado o número de trens e congestionamentos na circulação, ao mesmo tempo reduziram os tempos de permanência dos vagões nos pátios de manobra, resultando em ganhos numa área que compensaram as perdas em outra.

Sendo assim, o objetivo geral e específicos desta dissertação foram alcançados com o modelo matemático de otimização desenvolvido para apoio ao planejamento tático do transporte ferroviário de carga, com visão integrada das operações em vias de circulação e nos pátios de formação dos trens.

O modelo considerou aspectos específicos da ferrovia estudada, mas a abordagem geral não se restringe à ferrovia em questão. Conceitos genéricos como o itinerário das cargas, a possibilidade de congestionamentos e tempos adicionais de processo decorrentes da interação entre trens são uma realidade em qualquer ferrovia.

Há dois tipos de melhorias possíveis de serem incorporadas ao modelo: adaptações para planejamento do transporte de cargas sob um aspecto mais abrangente e melhorias específicas para a aplicação feita.

No primeiro grupo, podem-se citar adequações típicas para trens de carga geral, normalmente sujeitos a uma grade de horários menos flexível que os trens de minério estudados, além de possuir maior diversidade de cargas (multiproduto) e destinos, o que exigiria modelar o tempo de conexão nos pátios intermediários. Nesta condição, ao contrário da aplicação feita, nem sempre haveria compatibilidade entre vagões de trens distintos num pátio intermediário, dependendo dos destinos das cargas e dos pátios de manobra subsequentes. A literatura pesquisada contempla a modelagem destas condições mais genéricas.

Como melhoria específica possível para a aplicação feita, vale citar ajustes nas curvas utilizadas para previsão do efeito congestionamento nos tempos de viagem, decorrente do maior número de trens em circulação. A modelagem por teoria das filas (modelos M/M/1) resultou em tempos de viagem sensíveis a variações nas quantidades de trens consideradas. Caso os tempos de viagem tivessem se mostrado menos sensíveis às variações no fluxo de tráfego, as soluções encontradas para minimização da frota necessária tenderiam a reduzir a participação dos trens longos. Tal situação ficou evidenciada nos resultados onde o congestionamento em vias de circulação foi desprezado. Como alternativa, as curvas para previsão dos tempos de viagem poderiam ser obtidas com auxílio de modelos de simulação específicos para análise do tráfego na ferrovia estudada.

O modelo considerou apenas o transporte no sentido exportação, isto é, trens carregados com minério de ferro em direção ao terminal exportador. Uma ampliação

do modelo para considerar o retorno dos vagões vazios ao interior é também uma melhoria potencial. Entretanto, vale ressaltar que esta melhoria não é simplesmente um espelhamento da modelagem de exportação. Os custos operacionais são distintos e a modelagem das manobras nos pátios intermediários seria bem diferente, pois a necessidade de acúmulo de lotes para se conseguir formar um trem mais longo, só ocorreria ao se iniciar a viagem no terminal portuário. Nos pátios intermediários, a manobra de desmembramento do trem em lotes menores pode ser iniciada logo que o trem chega ao pátio, independente de tempo para a chegada do próximo trem.

Outras condições implementáveis no modelo para a ferrovia estudada, são:

- a consideração de congestionamento nas vias singelas;
- a consideração da influência do congestionamento sobre o consumo de combustível;
- novas abordagens para a função objetivo, como por exemplo, adaptações para quantificar e minimizar o número de maquinistas necessários; e
- a permissão de desmembramentos de trens com dois lotes nos pátios intermediários, com vistas à formação de trens longos. Isto exigiria eliminar a restrição descrita no item 4.5.3 e adequar a formulação para considerar a operação de desmembramento.

Embora a decisão de se operar trens longos já esteja associada a uma penalidade em termos de tempo adicional no porto, a adoção explícita de limites máximos para tais trens pode ser interessante. As operações no complexo portuário serão mais eficientes quando os minérios de diferentes lotes do trem serão destinados para uma mesma pilha de estocagem ou usem equipamentos comuns, pois o tempo de *setup* no sistema de descarga dos vagões será menor. Tais condições favoráveis são mais fáceis de se conseguir quando não se impõe elevado número de trens longos, tornando mais viável combinar em um trem lotes com minérios de diferentes origens, cujas características físico-químicas sejam compatíveis sob o ponto de vista do porto.

Num contexto de logística, não se pode esperar que a solução ótima para a ferrovia seja necessariamente ótima para toda a cadeia de suprimentos, principalmente para

as interfaces imediatas à ferrovia (neste caso, as minas e o terminal portuário). Entretanto, face à complexidade do sistema, é conveniente analisá-lo por partes.

Finalmente, o que se pretendeu nesta pesquisa foi desenvolver um modelo para auxiliar a tomada de decisão ferroviária, de forma a gerar um “ótimo” dentro de limites aceitáveis tanto para a ferrovia quanto para as zonas de interface. Portanto, as “soluções ótimas” obtidas são um indicativo de rumos a seguir, sem dispensar uma análise crítica pela equipe de planejamento quanto aos aspectos e dificuldades de implementação.

7 REFERÊNCIAS

- ANDERSON, D. R.; SWEENEY, D. J.; WILLIAMS, T. A. **An introduction to management science**: quantitative approaches to decision making. 11. ed. [S.l.]: Thomson South-Western, 2005.
- AHUJA, R. K.; MAGNANTI, T. L.; ORLIN, J. B. **Network flows**: theory, algorithms and applications. Prentice Hall, 1993.
- ASSAD, A. A. Models for rail transportation. **Transportation Research A: Policy and Practice**, [s.l.]: v. 14A, p.205-220, 1980a.
- ASSAD, A. A. Modelling of rail networks: toward a routing/makeup model. **Transportation Research B: Methodological**, [s.l.]: v. 14B, p. 101-114, 1980b.
- BALLOU, R. H. **Gerenciamento da cadeia de suprimentos/logística empresarial**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- BONETI, H. J. Tração distribuída: solução em ferrovias “heavy haul”. **Revista Ferroviária**, Rio de Janeiro, ano 68, p. 68-70, out. 2007.
- BORBA, J. L. **Módulo material de tração**: Pós-Graduação em Engenharia Ferroviária. PUC-MG. Belo Horizonte: [s.n.], 2001. 220 p.
- BRINA, H. L. **Estradas de Ferro**. 2. ed. Belo Horizonte: Ed. UFMG, 1988a. v. 1. 259 p. ISBN 85-7041-048-4.
- BRINA, H. L. **Estradas de Ferro**. 2. ed. Belo Horizonte: Ed. UFMG, 1988b. v. 2. 216 p. ISBN 85-7041-049-2.
- CAMPOS, L. B.; POMPERMAYER, F. M.; CRUZ, M. M. C. Modelo de otimização aplicado ao planejamento do transporte ferroviário de carga. In: CONGRESSO PAN-AMERICANO DE ENGENHARIA DE TRÂNSITO E TRANSPORTE, 15, 2008, Cartagena de Indias. **Anais...** Cartagena de Indias: PANAM, 2008. ISBN 978-958-8252-82-7. Disponível em: <<http://www.uninorte.edu.co/panam2008/CDPANAM/index.htm>>. Acesso em: 5 abr. 2009. Documento L_037.
- CASTRO, N. Estrutura, desempenho e perspectivas do transporte ferroviário de carga. **Pesquisa e Planejamento Econômico**, [s.l.]: v. 32, n. 2, p. 251-283, 2002.
- CRAINIC, T. G. Long-haul freight transportation. In: HALL, R.W. (Ed.). **Handbook of transportation science**. 2. ed. [S.l.]: Kluwer Academic Publishers, 2003. cap. 13, p. 451-516.
- CRAINIC, T. G.; FERLAND J. A.; ROUSSEAU, J. M. A tactical planning model for rail freight transportation. **Transportation Science**, [s.l.]: v. 18, n. 2, p.165-184, 1984.
- CRAINIC, T. G.; ROUSSEAU, J. M. Multicommodity, multimode freight transportation: a general modeling and algorithmic framework for the service network design problem. **Transportation Research B: Methodology**, [s.l.]: v. 20B, p.225-242, 1986.
- EXCEL.EXE: Microsoft Office Excel application file. Versão 2003. [S.l.]: Microsoft, 2003.

- GAU, C.-Y.; SCHRAGE, L. E. Implementation and testing of a branch-and-bound based method for deterministic global optimization: operations research applications. In: FLOUDAS, C. A.; PARDALOS, P. M. (Ed.) **Frontiers in global optimization**. [S.l.]: Kluwer Academic Publishers, 2003. p. 145-164.
- GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. **Otimização combinatória e programação linear**: modelos e algoritmos. 2. tiragem. Rio de Janeiro: Campus 2000.
- HAGHANI, A. E. Formulation and solution of combined train routing and makeup, and empty car distribution model. **Transportation Research – B: Methodological**, [s.l.]: v. 23B, p. 433-452, 1989.
- HESS, G. et al. **Engenharia econômica**. 21. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1992. 165 p.
- HILLIER, F. S.; LIEBERMAN G. J. **Introdução à pesquisa operacional**. 3. ed. Rio de Janeiro: Campus / São Paulo: Universidade de São Paulo, 1988.
- JHA, K. C.; AHUJA, R. K.; ŞAHIN, G. New approaches for solving the block-to-train assignment problem. **Networks**, [s.l.]: v. 51, n. 1, p. 48-62, 2008.
- KEATON, M. H. Designing optimal railroad operating plans: lagrangian relaxation and heuristic approaches. **Transportation Research – B: Methodological**, [s.l.]: v. 23B, n. 6, p. 415-431, 1989.
- KOO, P. H.; LEE, W. S.; JANG, D. W. Fleet sizing and vehicle routing for container transportation in a static environment. **OR Spectrum**, [s.l.]: v. 26, p. 193-209, 2004.
- LINDO SYSTEMS INC. **Optimization modeling with lingo**. 6th ed. Chicago, 2006.
- LINDO SYSTEMS INC. **What's Best!® version 9.0**: user's manual. Chicago, 2007.
- LINDO SYSTEMS INC. **What's Best!®**. Versão 10.0.0.6. [S.l.]: 2009.
- MARÍN, A.; SALMERÓN, J. Tactical design of rail freight networks. Part I: exact and heuristic methods. **European Journal of Operational Research**, [s.l.]: v. 90, p. 26-44, 1996.
- MAGALHÃES, P. C. B. **Módulo VII - Fundamentos de logística empresarial: ênfase na atividade transporte**. Pós-Graduação em Engenharia Ferroviária. PUC-MG. Belo Horizonte: [s.n.], 2001. 203 p.
- MAGNANTI, T. L.; GOLDEN, B. L. **Transportation planning**: network models and their implementation. Massachusetts Institute of Technology. Cambridge: 1978. 59 p.
- NEWMAN, A. M.; NOZICK, L. K.; YANO, C. A. Optimization in the rail industry. In: PARDALOS, P. M.; RESENDE, M. G. C. (Ed.). **Handbook of applied optimization**. New York: Oxford, 2002. cap. 18 (Application Areas), p. 704-719.
- NÓBREGA, M. A. **Modelagem matemática de um sistema de produção e transporte de minério de ferro**. 1996. Dissertação (Mestrado em Matemática Aplicada) – Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1996.
- PASSAGLIA, E. Transporte ferroviário de cargas. In: Vários autores. **Qualidade e produtividade nos transportes**. São Paulo: Cengage Learning, 2008. cap. 4, p. 135-156.
- PETERSEN, E. R. Railyard modelling – part I: prediction of putthrough time. **Transportation Science**, [s.l.]: v. 11, p. 37-49, 1977a.

PETERSEN, E. R. Railyard modelling – part II: the effect of yard facilities on congestion. **Transportation Science**, [s.l.]: v. 11, p. 50-59, 1977b.

PILLO G.; PALAGI, L. Introduction. In: PARDALOS, P. M.; RESENDE, M. G. C. (Ed.). **Handbook of applied optimization**. New York: Oxford, 2002. cap. 5 (Nonlinear Programming), p. 263-268.

POWELL, W. B. Transportation and logistics. In: PARDALOS, P. M.; RESENDE, M. G. C. (Ed.). **Handbook of applied optimization**. New York: Oxford, 2002. cap. 18 (Application Areas), p. 679-689.

PRADO, D. **Teoria das filas e da simulação**. 2. ed. Belo Horizonte: Desenvolvimento Gerencial, 2004. v. 2. (Série Pesquisa Operacional).

RAGSDALE, C. T. **Spreadsheet modeling & decision analysis: a practical introduction to management science**. 5th ed. [S.l.]: Thomsom South-Western, 2007.

TURNQUIST, M. A.; DASKIN, M. S. Queuing models of classification and connection delay em railyards. **Transportation Science**, [s.l.]: v. 16, p. 207-230, 1982.

WINSTON, W. L. **Operations research: applications and algorithms**. 4th ed. [S.l.]: Thomsom Brooks/Cole, 2004.

APÊNDICE C – Soluções Encontradas

Abordagem 1 MINIMIZAR COMBUSTÍVEL							Abordagem 2 com congestionamento MINIMIZAR FROTA						
	Itinerário ou serviço	Número de Lotes	Origem	Destino	Número de vezes usado	Total Lotes		Itinerário ou serviço	Número de Lotes	Origem	Destino	Número de vezes usado	Total Lotes
Itinerários	3	1	6	1	279	279	Itinerários	3	1	6	1	279	279
	8	1	7	1	261	261		8	1	7	1	261	261
	12	1	8	1	16	16		14	2	8	1	26	52
	13	2	8	1	17	34		17	1	12	1	23	23
	14	2	8	1	1	2		22	1	11	1	15	15
	17	1	12	1	23	23		25	2	11	1	30	60
	22	1	11	1	15	15		30	1	10	1	54	54
	25	2	11	1	30	60		33	2	10	1	78	156
	30	1	10	1	107	107		35	2	10	1	29	58
	32	1	10	1	1	1		38	1	18	1	8	8
	33	2	10	1	80	160		41	2	18	1	17	34
	38	1	18	1	8	8		46	1	17	1	15	15
	41	2	18	1	17	34		51	1	19	1	23	23
	46	1	17	1	15	15		56	1	15	1	38	38
	51	1	19	1	23	23		59	2	15	1	77	154
	56	1	15	1	38	38		64	1	14	1	26	26
	59	2	15	1	77	154		69	2	14	1	51	102
	64	1	14	1	26	26		1	1	6	5	279	279
67	2	14	1	51	102	3	1	7	5	261	261		
Serviços	1	1	6	5	279	279	7	2	8	1	26	52	
	3	1	7	5	261	261	8	1	12	9	23	23	
	5	1	8	4	16	16	10	1	11	9	15	15	
	6	2	8	4	17	34	12	2	11	9	30	60	
	7	2	8	1	1	2	15	1	10	9	54	54	
	8	1	12	9	23	23	17	2	10	9	78	156	
	10	1	11	9	15	15	19	2	10	1	29	58	
	12	2	11	9	30	60	20	1	18	9	8	8	
	15	1	10	9	107	107	22	2	18	9	17	34	
	16	1	10	4	1	1	25	1	17	9	15	15	
	17	2	10	9	80	160	27	1	19	9	23	23	
	20	1	18	9	8	8	29	1	15	9	38	38	
	22	2	18	9	17	34	31	2	15	9	77	154	
	25	1	17	9	15	15	34	1	14	9	26	26	
	27	1	19	9	23	23	38	2	14	1	51	102	
	29	1	15	9	38	38	41	3	9	1	202	606	
	31	2	15	9	77	154	44	3	5	1	180	540	
	34	1	14	9	26	26							
36	2	14	9	51	102								
41	3	9	1	255	765								
44	3	5	1	180	540								
46	3	4	1	17	51								

Nota: o número de lotes indicado para cada itinerário corresponde ao total de lotes contidos no trem típico inicial utilizado pelo itinerário.

APÊNDICE C – Soluções Encontradas

Abordagem 2 - congestionamento desprezado MINIMIZAR FROTA						Abordagem 3 MINIMIZAR COMBUSTÍVEL + FROTA							
	Itinerário ou serviço	Número de Lotes	Origem	Destino	Número de vezes usado	Total Lotes		Itinerário ou serviço	Número de Lotes	Origem	Destino	Número de vezes usado	Total Lotes
Itinerários	2	1	6	1	109	109	Itinerários	3	1	6	1	279	279
	4	1	6	1	170	170		8	1	7	1	261	261
	7	1	7	1	261	261		14	2	8	1	26	52
	14	2	8	1	26	52		17	1	12	1	23	23
	18	1	12	1	23	23		22	1	11	1	15	15
	23	1	11	1	15	15		27	2	11	1	30	60
	27	2	11	1	30	60		30	1	10	1	86	86
	31	1	10	1	54	54		33	2	10	1	91	182
	35	2	10	1	107	214		38	1	18	1	8	8
	39	1	18	1	8	8		41	2	18	1	17	34
	43	2	18	1	17	34		46	1	17	1	15	15
	47	1	17	1	15	15		51	1	19	1	23	23
	52	1	19	1	23	23		56	1	15	1	38	38
	57	1	15	1	38	38		59	2	15	1	77	154
	61	2	15	1	77	154		64	1	14	1	26	26
	65	1	14	1	26	26		67	2	14	1	49	98
69	2	14	1	51	102	69	2	14	1	2	4		
Serviços	1	1	6	5	109	109	Serviços	1	1	6	5	279	279
	2	1	6	4	170	170		3	1	7	5	261	261
	3	1	7	5	261	261		7	2	8	1	26	52
	7	2	8	1	26	52		8	1	12	9	23	23
	9	1	12	4	23	23		10	1	11	9	15	15
	11	1	11	4	15	15		14	2	11	1	30	60
	14	2	11	1	30	60		15	1	10	9	86	86
	16	1	10	4	54	54		17	2	10	9	91	182
	19	2	10	1	107	214		20	1	18	9	8	8
	21	1	18	4	8	8		22	2	18	9	17	34
	24	2	18	1	17	34		25	1	17	9	15	15
	26	1	17	4	15	15		27	1	19	9	23	23
	28	1	19	4	23	23		29	1	15	9	38	38
	30	1	15	4	38	38		31	2	15	9	77	154
	33	2	15	1	77	154		34	1	14	9	26	26
	35	1	14	4	26	26		36	2	14	9	49	98
38	2	14	1	51	102	38	2	14	1	2	4		
43	2	5	1	185	370	41	3	9	1	234	702		
45	2	4	1	186	372	44	3	5	1	180	540		

Nota: o número de lotes indicado para cada itinerário corresponde ao total de lotes contidos no trem típico inicial utilizado pelo itinerário.