

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES

**PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA APLICADA NO
PLANEJAMENTO DA ALOCAÇÃO DE VAGÕES DE
CARGA**

Marcello Calado Vieira de Melo

**Dissertação submetida ao Programa de
Mestrado em Engenharia de Transportes
(PETRAN), da Universidade Federal do
Ceará (UFC), como parte dos requisitos
para a obtenção do Título de Mestre em
Ciências (M. Sc.) em Engenharia de
Transportes.**

ORIENTADOR:
Prof. Dr. Júlio Francisco Barros Neto

CO-ORIENTADOR:
Prof. Dr. Ernesto Ferreira Nobre Júnior

Fortaleza
2008

FICHA CATALOGRÁFICA

MELO, MARCELLO CALADO VIEIRA DE

Programação Linear Inteira Aplicada no Planejamento da Alocação de Vagões de Carga. Fortaleza, 2008.

94 fls., Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

1. Pesquisa Operacional

3. Planejamento Ferroviário

2. Alocação de Vagões

4. Modelagem Matemática

CDD 388

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MELO, M. C. V. de (2008). Programação Linear Inteira Aplicada no Planejamento da Alocação de Vagões de Carga. Dissertação de Mestrado - Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 94 fls.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Marcello Calado Vieira de Melo

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Programação Linear Inteira Aplicada no Planejamento da Alocação de Vagões de Carga.

Mestre / 2008

É concedida à Universidade Federal do Ceará permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Marcello Calado Vieira de Melo

Rua José B. Moury Fernandes, N.º 315 - Barro

50.780-470 - Recife/PE - Brasil

PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA APLICADA NO PLANEJAMENTO DA
ALOCAÇÃO DE VAGÕES DE CARGA

Marcello Calado Vieira de Melo

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE MESTRADO EM
ENGENHARIA DE TRANSPORTES (PETRAN), DA UNIVERSIDADE FEDERAL
DO CEARÁ (UFC), COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M.Sc.) EM ENGENHARIA DE
TRANSPORTES

Aprovado por:

Prof. Júlio Francisco Barros Neto, Dr. Eng.
(Orientador - UFC)

Prof. Ernesto Ferreira Nobre Júnior, Dr. Eng.
(Co-Orientador - UFC)

Prof. Nadja Glheuca da Silva Dutra Montenegro, Dr. Eng.
(Examinador Interno - UFC)

Prof. Plácido Rogério Pinheiro, Dr. Eng.
(Examinador Externo - UNIFOR)

FORTALEZA, CE - BRASIL

Outubro - 2008

*Se na vida a riqueza é um bem desejável,
que riqueza é maior do que a sabedoria,
que tudo produz? E se é a inteligência
quem opera, quem mais do que ela é
artífice do que existe?*

(Sb 8, 5-6)

DEDICATÓRIA

*Aos meus queridos pais, Jackson e Socorro,
à minha amada esposa Erika e aos meus
filhos Maria Beatriz e João Marcello (In
memoriam).*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me concedido a dádiva da vida, a sabedoria e inteligência, dons necessários à condução deste trabalho.

Aos meus pais Jackson e Socorro, por terem me proporcionado o dom da vida e por ensinar-me a perseverar.

À minha esposa Erika Louise, por ser o meu porto seguro nos momentos de dificuldades e por participar dos momentos inesquecíveis do meu viver.

Aos meus filhos Maria Beatriz e João Marcello (*In memoriam*) por serem o motivo da minha alegria e pelas incontáveis vezes que não pude dedicar-lhes a atenção necessária.

Ao professor Dr. Júlio Francisco Barros Neto, com sua disponibilidade, capacidade, paciência e amizade, por todo o aprendizado a mim conferido.

Ao professor Dr. Ernesto Ferreira Nobre Júnior, pelo estímulo ao meu ingresso no mestrado, pelo apoio ao desenvolvimento desta dissertação, pelo incentivo e encorajamento necessários, não só à conclusão dos trabalhos, como também por ser a luz no meu caminho...

Aos amigos Mestres em Engenharia de Transportes, Antônio Wagner L. Jales, Carlos Robério de O. Barroso, Cristiane Baima de Abreu, Francisco Edinardo A. da Silva, Paulo César M. de Sousa e Thais Reis Paiva, pelo companheirismo e amizade.

À MRS Logística S.A., na pessoa do Sr. Carlos Eduardo Fontenelle Carneiro, pela atenção dispensada durante a elaboração desta dissertação.

Agradeço especialmente à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico - FUNCAP a concessão da bolsa de estudo.

Resumo da Dissertação submetida ao PETRAN / UFC como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências (MSc.) em Engenharia de Transportes.

PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA APLICADA NO PLANEJAMENTO DA
ALOCAÇÃO DE VAGÕES DE CARGA

Marcello Calado Vieira de Melo

Outubro/2008

Orientador: Júlio Francisco Barros Neto

Co-Orientador: Ernesto Ferreira Nobre Júnior

O atendimento da demanda de transporte de carga está relacionado ao processo de alocação do vagão, que por sua vez, está associado à maneira pela qual a decisão é tomada. A distribuição dos vagões aos terminais de carregamento depende do planejamento e da movimentação dos vagões vazios, sendo a viagem deste, a parcela de maior impacto financeiro sobre o sistema ferroviário. Desta forma, um mecanismo eficiente de distribuição de vagão é vital para as estradas de ferro, pois proporciona importantes ganhos operacionais e de custos. Assim, o propósito deste trabalho é analisar o problema relacionado à distribuição dos vagões de carga e desenvolver modelos em Programação Linear Inteira, que ofereçam ao analista a oportunidade de conhecer em detalhes, (em um nível tático e operacional), as dificuldades enfrentadas pela ferrovia, bem como avaliar a proposição de metas dos tempos de retenção em pátios, tempos de deslocamento, número de vagões retidos para manutenção, necessidade do aumento da frota e, até mesmo, a rentabilidade das demandas ou a viabilidade de execução do programa de transporte diante das premissas operacionais em vigor.

Palavras-Chaves: Estrada de Ferro; Alocação de Vagões; Planejamento Ferroviário; Modelagem Matemática; Pesquisa Operacional; Programação Linear Inteira.

Abstract of Thesis submitted to PETRAN/UFC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M. Sc.) in Transportation Engineering.

INTEGER LINEAR PROGRAMMING APPLIED FOR RAILROAD FREIGHT
WAGONS ALLOCATION PLANNING

Marcello Calado Vieira de Melo

October/2008

Advisor: Júlio Francisco Barros Neto

Co-Advisor: Ernesto Ferreira Nobre Júnior

Load transportation attendance for demand is related to the process of wagon allocation that in its turn, is associated with the way by which the decision is taken. The distribution of the wagons to the shipment terminals depends on the planning and movement of the empty wagons, being the trip of the empty wagon the parcel with bigger financial impact on the railroad system. In such a way, an efficient mechanism for wagon distribution is vital for the railroads, therefore providing important operational gains and cost savings. Thus, the purpose of this study is to analyze the problem related to the distribution of freight wagons and develop models in integer linear programming that will offer the analyst the opportunity to know in detail (in a tactical and operational level) the difficulties faced by the railroad, and to evaluate the setting of goals for retention times in rail yards, transit time, number of cars retained for maintenance, need to increase the fleet and even the profitability of the request or the feasibility for the implementation of the transport towards the operational assumptions in place.

Keywords: Railroad; Cars Allocation; Railroad Planning; Mathematical Modeling; Operational Research; Integer Linear Programming.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUÇÃO.....	1
1.1. CONTEXTO E JUSTIFICATIVA	1
1.2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA DE PESQUISA	3
1.3. OBJETIVOS	4
1.3.1. Objetivo Geral.....	4
1.3.2. Objetivos Específicos.....	4
1.4. ORGANIZAÇÃO DA ESTRUTURA DO TRABALHO	4
CAPÍTULO 2.....	6
O MODAL FERROVIÁRIO E O PLANEJAMENTO DA ALOCAÇÃO DOS VAGÕES DE CARGA.....	6
2.1. O MODAL FERROVIÁRIO.....	6
2.2. O PLANEJAMENTO DA ALOCAÇÃO DE VAGÕES DE CARGA	10
2.3. O HORIZONTE DE PLANEJAMENTO.....	10
2.4. O PLANEJAMENTO DO TRANSPORTE FERROVIÁRIO	12
2.5. A ALOCAÇÃO DE VAGÕES DE CARGAS.....	16
2.6. O EMPREGO DE PESQUISA OPERACIONAL NO PLANEJAMENTO FERROVIÁRIO.....	18
CAPÍTULO 3.....	25
MODELAGEM MATEMÁTICA.....	25
3.1. CARACTERIZAÇÃO DA MALHA FERROVIÁRIA.....	25
3.1.1. Pátios.....	25
3.2. CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL RODANTE DISPONÍVEL	27
3.2.1. Locomotivas.....	27
3.2.2. Vagões.....	27
3.3. CARACTERIZAÇÃO DA DEMANDA POR TRANSPORTE	27
3.4. MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DOS VAGÕES DE CARGA.....	29
3.5. VALIDAÇÃO DO MODELO PROPOSTO	34
CAPÍTULO 4.....	43
ANÁLISE DOS RESULTADOS	43
4.1. FROTA DE VAGÕES <i>HOPPER</i>	44
4.2. FROTA DE VAGÕES GÔNDOLA	49
4.3. FROTA DE VAGÕES-PLATAFORMA	55
4.4. FROTA DE VAGÕES FECHADO	59
4.5. PLANEJAMENTO PARA UM HORIZONTE DE PLANEJAMENTO DE 30 DIAS	66

CAPÍTULO 5.....	76
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	76
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Comparativo internacional da matriz de transportes de cargas.	7
Figura 2.2: Custo ferroviário total em função da distância.	8
Figura 2.3: Processo de planejamento tático de uma ferrovia.	14
Figura 2.4: Processo de planejamento operacional de uma ferrovia.	15
Figura 3.1: Esquema simplificado do fluxo de cargas em uma ferrovia fictícia.	25
Figura 3.2: Atendimento da demanda por transporte (minério de ferro e <i>clínquer</i>).	35
Figura 3.3: Atendimento da demanda por transporte (gesso e calcário).	36
Figura 3.4: Quantidade de vagões alocados pelo Modelo para o transporte.	37
Figura 3.5: Quantidade de vagões alocados pelos Modelos Matemáticos.	37
Figura 3.6: Utilização da disponibilidade dos vagões x Modelos Matemáticos.	38
Figura 3.7: Utilização da disponibilidade dos vagões gerada pelo Modelo 2.	39
Figura 3.8: Utilização da disponibilidade dos vagões (planejamento de 15 dias).	39
Figura 4.1: Fluxo de carga atendido pela frota de vagões <i>hopper</i>	44
Figura 4.2: Plano do Modelo 1 para o vagão <i>hopper</i> - circuito do minério de ferro.	45
Figura 4.3: Plano do Modelo 2 para o vagão <i>hopper</i> - circuito do minério de ferro.	46
Figura 4.4: Plano do Modelo 3 para o vagão <i>hopper</i> - circuito do minério de ferro.	47
Figura 4.5: Plano do Modelo 4 para o vagão <i>hopper</i> - circuito do minério de ferro.	48
Figura 4.6: Plano do Modelo 5 para o vagão <i>hopper</i> - circuito do minério de ferro.	49
Figura 4.7: Fluxo de carga atendido pela frota de vagões gôndola.	50
Figura 4.9: Plano gerado pelos Modelos 2 e 3 para o vagão gôndola - circuito do <i>clínquer</i>	52
Figura 4.10: Plano do Modelo 4 para o vagão gôndola - circuito do <i>clínquer</i>	53
Figura 4.11: Plano do Modelo 5 para o vagão gôndola - circuito do <i>clínquer</i>	54
Figura 4.12: Fluxo de carga atendido pela frota de vagões plataforma.	55
Figura 4.13: Plano do Modelo 1 para o vagão-plataforma - circuito do gesso.	57
Figura 4.14: Plano gerado pelos Modelos 2 e 3 para o vagão-plataforma - circuito do gesso.	58
Figura 4.15: Plano gerado pelos Modelos 4 e 5 para o vagão-plataforma - circuito do gesso.	59
Figura 4.16: Fluxo de carga atendido pela frota de vagões fechado.	60
Figura 4.17: Plano do Modelo 1 para o vagão fechado - circuito do calcário.	61
Figura 4.18: Plano do Modelo 2 para o vagão fechado - circuito do calcário.	62
Figura 4.19: Plano do Modelo 3 para o vagão fechado - circuito do calcário.	63
Figura 4.20: Plano gerado pelo Modelo 4 para o vagão fechado - circuito do calcário.	64
Figura 4.21: Plano gerado pelo Modelo 5 para o vagão fechado - circuito do calcário.	65
Figura 4.22: Quantidade de vagões alocados pelo Modelo para o transporte.	67
Figura 4.23: Plano do Modelo 3 para o vagão <i>hopper</i> - circuito do minério de ferro.	70
Figura 4.24: Plano do Modelo 4 para o vagão fechado - circuito do calcário.	71
Figura 4.25: Utilização da disponibilidade dos vagões (planejamento de 30 dias).	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Tempo de percurso origem-destino (dias).....	26
Tabela 3.2: Capacidade de movimentação dos pátios.....	26
Tabela 3.3: Frota de vagões disponíveis considerada pelo Modelo.....	27
Tabela 3.4: Programação do transporte de carga considerada pelo Modelo.....	28
Tabela 3.5: Custos considerados no Modelo.....	29
Tabela 3.6: Resumo dos objetivos de cada Modelo.....	34
Tabela 3.7: Atendimento da demanda utilizando os Modelos propostos.....	41
Tabela 3.8: Resultado alcançado pelos Modelos.....	42
Tabela 4.1: Programação do transporte de carga considerada pelo Modelo.....	66
Tabela 4.2: Transporte de carga obtido pelos Modelos para um plano de 30 dias.....	68
Tabela 4.3: Atendimento da demanda utilizando os Modelos propostos.....	74
Tabela 4.4: Resultado alcançado pelos Modelos.....	75

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
ANTF	Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários
CFN	Companhia Ferroviária do Nordeste.
DNIT	Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes
RFFSA	Rede Ferroviária Federal S.A.
LQN	<i>Logistics Queueing Network</i>
MRS	MRS Logística S.A.
NSR	<i>Nederlandse Spoorwegen Reizigers</i>
PAT	Plano de Atividade do Trem
PNLT	Plano Nacional de Logística e Transportes
PO	Pesquisa Operacional
TBC	Tonelada Bruta Compensada
SOBRAPO	Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Este capítulo descreve todas as etapas desenvolvidas a partir do projeto de pesquisa, as quais serviram de base para a elaboração desta dissertação.

1.1. CONTEXTO E JUSTIFICATIVA

O surgimento da primeira estrada de ferro ocorreu na Inglaterra e estava relacionado à necessidade do transporte de carvão. Segundo GARRISON e LEVINSON (2006), o mercado de carvão estava aumentando e exigia um considerável e arriscado investimento para explorar e comercializar este mineral. Quem se dispôs a assumir o risco foi Edward Pease, que obteve em 1821, a autorização para construir a ferrovia *Stockton and Darlington Railway* no nordeste da Inglaterra. A abertura dessa ferrovia ocorreu em setembro de 1825, demonstrando que um projeto bem pensado poderia ser rentável e que as locomotivas eram eficientes substitutas aos cavalos, pois era possível mover vários carros simultaneamente. O sucesso logo foi imitado por outras nações.

Já o desenvolvimento das estradas de ferro nos Estados Unidos, segundo COOTNER (1963), ocorreu de forma épica no século XIX, envolvendo empreendimentos de larga escala que desempenharam um papel crítico, ativo e agressivo no desenvolvimento econômico daquele país. De acordo com GARRISON e LEVINSON (2006), as ferrovias americanas surgiram como alternativa às hidrovias principalmente durante o inverno, em função do congelamento dos canais e conforme MARTINS e CAIXETA FILHO (2001) destacam, estimularam inicialmente a ocupação agrícola, logo após a pecuária e finalmente, fomentaram o desenvolvimento das indústrias ligadas à agricultura do oeste norte-americano.

No Brasil, a primeira tentativa de construção ocorreu em 1835, quando o regente Diogo Antônio Feijó promulgou a Lei n.º 101, de 31 de outubro de 1835, concedendo

privilégios por 40 anos, a quem se propusesse construir estradas de ferro interligando o Rio de Janeiro, São Paulo, Minas Gerais, Rio Grande do Sul e Bahia (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT 2007). Em 1852, o Governo Imperial forneceu concessão para construção e exploração de uma linha férrea ao empreendedor Irineu Evangelista de Souza (futuro Barão de Mauá). A Estrada de Ferro Barão de Mauá foi inaugurada pelo Imperador do Brasil D. Pedro II, no dia 30 de abril de 1854. O primeiro trecho da ferrovia contava com 14,5 km de extensão e bitola de 1,68m, ligando o porto de Mauá, na baía de Guanabara, à estação de Frágoso, na raiz da serra da Estrela (Petrópolis) (BRINA, 1983).

O café, como um dos mais importantes produtos de exportação, foi determinante para o surgimento das ferrovias (ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE FERROVIÁRIO - ANTF, 2004). Segundo CASTRO e LAMY (1994) *apud* MARTINS e CAIXETA FILHO (2001), a partir de 1891 ocorreu nova expansão da malha, porém sem critérios de alcance econômico, pois o Estado havia se afastado da atividade ferroviária, moldando-se uma malha com marcantes heterogeneidades técnicas e de eficiência. Pode-se dizer que a história da ferrovia brasileira esteve ligada aos ciclos econômicos (do café, da borracha) que induziu a ligação do litoral às áreas mais remotas para facilitar o escoamento da produção (COSTA, 1966 *apud* MARTINS e CAIXETA FILHO, 2001).

Observa-se que o nível de desenvolvimento econômico das nações, desde a criação das ferrovias, está relacionado à densidade de sua malha ferroviária e nos dias de hoje, o transporte ferroviário de passageiro e de carga desempenha um importante papel na economia de muitos países (MARÓTI, 2006), pois segundo MARTINS e CAIXETA FILHO (2001), as estradas de ferro conferiram uma expansão importante da movimentação de cargas pesadas a grandes distâncias ao proporcionarem um transporte rápido, seguro e de custo acessível, capaz de suplantar barreiras naturais, antes não suportadas pela hidrovia.

Por vários anos, as ferrovias não enfrentaram muita competição no transporte de passageiro e de carga, porém, nas últimas décadas, boa parte da demanda por transporte

ferroviário foi perdida para o modal rodoviário (MARÓTI, 2006). As rodovias conferiram ganhos de flexibilidade no transporte entre as cidades, cabendo aos usuários o uso do meio ou seja, seus próprios veículos, enquanto as ferrovias além de manter seus ativos, devem arcar com os custos de manutenção da via (BORBA, 2001). Em suma, a ocorrência destes impactos negativos foi provocada pela falta da integração e complementaridade entre os modais de transportes no país, obrigando os gestores das estradas de ferro a buscarem um meio para atrair mais clientes, através da melhoria do nível de serviço e do corte dos custos por meio de operações mais eficazes, em virtude das melhorias nos processos de planejamento, vitais para o alcance das metas (MARÓTI, 2006).

1.2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA DE PESQUISA

MARÓTI (2006), relata que as estradas de ferro são fontes quase inesgotáveis de problemas de planejamento e até recentemente, todos os problemas eram tratados manualmente e muitos ainda são resolvidos sem nenhuma automação ou otimização. De uma maneira geral, as ferrovias brasileiras parecem estar inseridas neste contexto. Mesmo após a privatização da RFFSA – Rede Ferroviária Federal S.A., o setor vem utilizando as mesmas técnicas de planejamento da alocação de vagões de carga e muitas vezes é feita de maneira empírica. Devido a carência de uma ferramenta computacional de análise e suporte ao planejamento realizado, os responsáveis se deparam com dificuldades no processo de alocação destes recursos.

Em nosso país, apesar do importante papel que a ferrovia desempenha, ainda não desenvolveu todo o potencial que representa como meio de transporte econômico e integrador. Ao contrário de outros países, o transporte ferroviário no Brasil não completou seu ciclo (BORBA 2001). De acordo com BALLOU (2006), para que a economia se transforme é necessário que sua estrutura inteira mude e se torne parecida com a de países desenvolvidos e isto só é possível através da oferta de serviços de transportes relativamente baratos e de fácil acesso. Diante deste cenário, esta dissertação se propõe a desenvolver uma modelagem de programação matemática capaz de resolver problemas de alocação de vagões em múltiplos dias e promova a melhoria da eficiência

e do desempenho através da melhor utilização dos recursos disponíveis.

1.3.OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo Geral

Construir um modelo matemático objetivando apresentar solução para resolver o problema de planejamento tático da alocação de vagões de carga.

1.3.2. Objetivos Específicos

As metas principais desta pesquisa são:

- a) Caracterização dos problemas atuais de planejamento da alocação dos vagões;
- b) Levantamento do referencial teórico do problema de planejamento de alocação de vagões;
- c) Desenvolvimento de modelos matemáticos para o tratamento do problema de alocação de vagões.

Os modelos desta dissertação foram elaborados a partir da observação dos problemas de planejamento dos vagões vivenciados pela CFN – Companhia Ferroviária do Nordeste. Portanto, os métodos e resultados apresentados neste trabalho são derivados do experimento. No entanto, acredita-se que muitas das aproximações de solução apresentadas podem ser aplicadas a problemas de planejamento da alocação de vagões percebidos pelas ferrovias brasileiras.

1.4. ORGANIZAÇÃO DA ESTRUTURA DO TRABALHO

O Capítulo 1, relata a estrutura geral desta dissertação, descrevendo a importância e o motivo pela opção de estudo do tema proposto. No seu desenvolver, são

descritos os objetivos, geral e específico do trabalho, a identificação do problema de pesquisa e a descrição sucinta de cada capítulo que faz parte desta dissertação.

O Capítulo 2, contextualiza o modal ferroviário e o planejamento da alocação dos vagões de carga, apresentando os tipos de problemas presentes na distribuição de vagões e os fatores que afetam o desempenho. Este capítulo faz ainda, uma revisão bibliográfica sobre o emprego de pesquisa operacional no planejamento ferroviário e de técnicas de programação matemática.

O Capítulo 3, descreve através de uma situação empírica, a modelagem de programação matemática desenvolvida abordando suas definições e peculiaridades, bem como, analisa a complexidade do problema no modelo e verifica a qualidade das soluções fornecidas pela modelagem.

O Capítulo 4, descreve os resultados computacionais alcançados e a importância desses recursos para o planejamento ferroviário.

No Capítulo 5, são apresentadas algumas conclusões e são apontados os possíveis rumos a serem tomados por pesquisas futuras sobre o tema e as vantagens/desvantagens na implantação da modelagem.

CAPÍTULO 2

O MODAL FERROVIÁRIO E O PLANEJAMENTO DA ALOCAÇÃO DOS VAGÕES DE CARGA

2.1.O MODAL FERROVIÁRIO

Transportes, podem ser definidos como o movimento ou fluxo de bens desde o ponto de origem até o ponto de destino. BALLOU (2006), considera uma variedade de serviços de transportes que são ofertados através de cinco modais básicos: ferroviário, rodoviário, hidroviário, dutoviário e aeroviário. A decisão da escolha do modal deve considerar algumas características básicas tais como: custos, tempos de processo e sua variabilidade, perdas e avarias, a fim de proporcionar a melhor relação de benefício/custo.

Analisando a matriz de transportes mostrada na Figura 2.1, note-se que os serviços de transportes das nações desenvolvidas são complementares, pois explora o potencial oferecido por estes modais diante das limitações naturais presentes em seu território, como é o caso da Austrália, pobre em recursos hídricos navegáveis, apresentando um território extenso a ser dotado por uma infra-estrutura de transportes eficiente. No caso do Brasil, pode-se mencionar o contexto geográfico vivido pelo estado do Amazonas, onde o modal predominante é o hidroviário. Este é o modal mais adequado à realidade da região norte do país.

Considerando a dimensão continental do Brasil, a sua matriz de transportes apresenta significativa discrepância no uso dos modais. É evidente a predominância pelo modal rodoviário, responsável por 58% das movimentações de carga no país, ficando a ferrovia com 25% e as hidrovias com 17%. Esta realidade conduz a elevados custos logísticos que estão associados à dependência do país pelo modal rodoviário (PNLT, 2007).

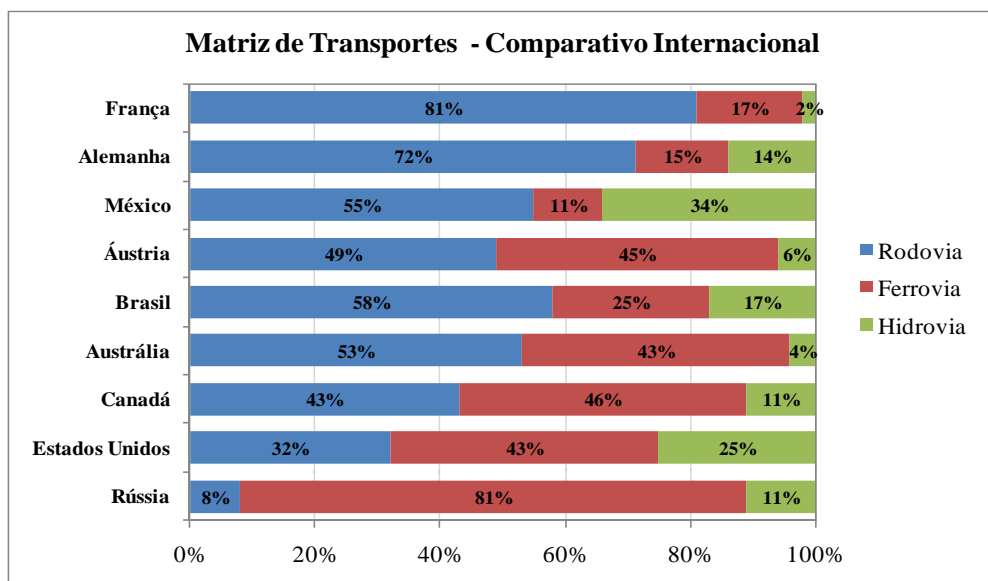


Figura 2.1: Comparativo internacional da matriz de transportes de cargas.

Fonte: Adaptado do PNLT (2007)

Assim, os custos assumem um papel decisivo na escolha do modal. Estima-se que os custos com transportes, respondam em média por 60% dos custos logísticos e que estes representam aproximadamente 19% da receita total das empresas (FLEURY, 2000). Por outro lado, BALLOU (2006), considera que os custos com transportes podem constituir de um a dois terços do total dos custos logísticos e a obtenção de reduções nestes, se traduz em alterações na margem de ganho das empresas, também beneficiando a sociedade na medida em que há ganho de eficiência do sistema de transporte.

Segundo ALVARENGA e NOVAES (2001), as operações ferroviárias se caracterizam por altos custos fixos (equipamentos, terminais, vias férreas) e baixos custos variáveis (volume transportado, distâncias, óleo diesel, baixo uso de mão de obra). A quantidade de carga útil transportada por trem, proporciona importante economia de escala devido à prática de custo unitário reduzido para maior volume de cargas. Maiores volumes tendem a diluir os custos fixos, reduzindo o custo unitário (BALLOU, 2006). O custo variável é reflexo da distância da origem ao destino e responde por 50 a 67% dos custos totais do serviço.

A Figura 2.2, ilustra a composição do custo ferroviário total em função da

distância que é obtida a partir da soma das parcelas do custo fixo com o custo variável (BALLOU, 2006). Os custos com mão-de-obra, por exemplo, são considerados como custos fixos, pois são independentes da distância de transporte e da quantidade de carga transportada enquanto que o consumo de combustíveis é considerado custo variável. Neste momento, é necessário alertar que, apesar da ilustração apresentar uma idéia de linearidade do custo variável, na prática este comportamento pode não vir a ocorrer.

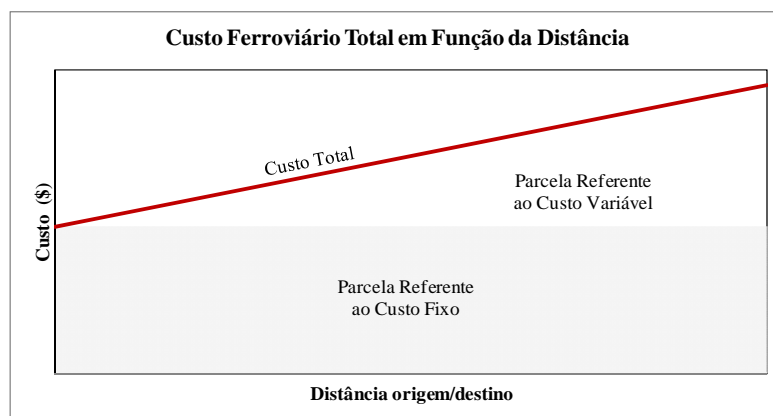


Figura 2.2: Custo ferroviário total em função da distância.

Fonte: Adaptado de BALLOU (2006)

Outro problema observado, associado a custos nas ferrovias, refere-se à alocação adequada de vagões, tendo em vista que alocações realizadas de maneira incorreta podem acarretar no aumento dos custos de operação. Percebe-se portanto, que o processo de planejamento da alocação dos vagões de carga torna-se um fator imprescindível para se garantir a competitividade e a confiabilidade do modal ferroviário, bem como a credibilidade junto ao cliente.

O erro na distribuição de um vagão se apresenta como um dos mais severos tipos de falhas de planejamento, em especial quando envolve cargas especiais. Os prejuízos, na prática, variam desde os mínimos custos diretos até valores substanciais como pagamento de possíveis indenizações ao cliente. Considera-se ainda, entre outros prejuízos, aqueles advindos dos atrasos nos negócios da ferrovia e clientes.

BALLOU (2006), relata que quando ocorrem atrasos na entrega ou quando as mercadorias sofrem avarias, normalmente implica em problemas para o cliente. Este

fato pode se traduzir em aumento de custos com armazenagem ou acúmulo de pedidos quando a reposição não é realizada conforme planejamento. Além disso, o processo de reparação dos danos pode ser oneroso e demorado. De qualquer forma, no que pese a relevância dos prejuízos considerados, mais significativas serão as implicações decorrentes do comprometimento da imagem da companhia perante os seus usuários.

Em vista disto, a tecnologia da informação tem sido introduzida no sistema logístico com o objetivo de otimizar o seu gerenciamento de forma eficiente e eficaz, minimizando os problemas logísticos, provocados pelo crescimento do mercado globalizado que vem aumentando a complexidade das operações logísticas ou elevando os respectivos custos. Em resposta a estes fatos, as corporações passaram a fazer uso de uma ciência voltada para a resolução de problemas reais, visando a tomada de decisão. Como define a Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional – SOBRAPO (2007), em seu sítio, esta ciência é conhecida por Pesquisa Operacional, ou simplesmente por PO, em que são aplicados conceitos e métodos de outras áreas científicas para concepção, planejamento ou operação de sistemas para atingir seus objetivos.

A Pesquisa Operacional surgiu durante a 2ª Guerra Mundial, com o objetivo de fornecer subsídios para tomada de decisão relacionada à utilização mais eficaz dos limitados recursos militares. Sua propagação se deve principalmente, ao cientista americano George B. Dantzig, que criou o Método Simplex em 1947 (LISBOA, 2008).

Através da PO são desenvolvidos modelos matemáticos, apoiados em dados e fatos, que permitem perceber os problemas em estudo e definir o método de solução (exato ou heurístico) que pode melhor resolver esses problemas.

Conforme é destacado por BARR *et al.* (1995) e MARÓTI (2006), o homem tem obtido ganhos de habilidade na resolução de grandes problemas ou problemas de elevada complexidade, graças ao uso da computação associada à modelagem matemática, que tem permitido auferir ganhos econômicos e operacionais significativos.

2.2.O PLANEJAMENTO DA ALOCAÇÃO DE VAGÕES DE CARGA

O processo de planejamento da alocação dos vagões de carga afeta de maneira significativa, o resultado econômico/operacional das empresas operadoras de ferrovia, pois descreve como os principais ativos serão posicionados e utilizados ao longo da malha.

Em certas circunstâncias, toda ferrovia poderá se deparar com a necessidade de movimentação de vagões vazios para atender a uma dada demanda. Na realidade, o desejo de todo operador ferroviário é o manuseio ininterrupto de vagões carregados, mas isto nem sempre é possível, pois, para cada tipo mercadoria, há um tipo de vagão conveniente para realizar o transporte. Por esta razão, apesar da disponibilidade de determinados tipos de vagões no terminal, poderá haver necessidade do deslocamento de outros tipos vazios para atender a demanda de uma dada carga. Neste momento, o leitor poderá questionar a razão para se evitar a movimentação destes ativos vazios. Na realidade, o reposicionamento dos ativos vazios implica exclusivamente em custos operacionais e não contribuem no faturamento da empresa durante o traslado.

O papel do planejador neste contexto, é definir a quantidade de vagões a serem alocados ao fluxo de transporte das mercadorias, de onde serão remanejados e quando estarão disponíveis para o carregamento, tendo como foco a minimização dos custos envolvidos ou a maximização dos lucros com a tomada de decisão.

2.3.O HORIZONTE DE PLANEJAMENTO

De acordo com CAMPOS (1996), pode-se resumir a definição de planejamento como sendo a definição das ações necessárias ao alcance de um objetivo específico.

MARÓTI (2006), afirma que a duração do horizonte de planejamento é o critério mais comum para classificar as etapas do processo do planejamento ferroviário. Baseado nisto, o planejamento é classificado em três níveis distintos: estratégico, tático e operacional.

- a) **O planejamento estratégico (longo prazo).** O planejamento estratégico está relacionado à tomada de decisão pela alta administração e à existência de riscos financeiros que podem afetar a empresa por um prazo relativamente longo, às vezes até décadas (MOREIRA, 1996). Entretanto, o horizonte do planejamento estratégico pode ser subdividido em longo, médio prazo ou anual e suas estratégias estão voltadas às mudanças estruturais no negócio para propiciar a competitividade nos próximos anos (CAMPOS, 1996). As decisões determinam as políticas de desenvolvimento e dão ampla forma às estratégias que operam o sistema. Estas, incluem o projeto da malha viária e de sua expansão, a localização das principais facilidades (por exemplo, terminais, destacamentos, oficinas etc.), a aquisição de recursos tais como locomotivas e vagões e as políticas de tarifação.
- b) **O planejamento tático (médio prazo).** As decisões táticas, têm influência de médio prazo, cerca de um mês a pouco mais de um ano. São decisões que habitualmente não envolvem grandes riscos financeiros como as decisões estratégicas. Tem por objetivo estabelecer a alocação e utilização eficiente dos recursos para se obter o melhor desempenho possível do sistema como um todo. Estas decisões dizem respeito ao atendimento do serviço ferroviário, e podem incluir assuntos relacionados à determinação de rotas e tipos de serviço a serem operados, serviços de programações, roteamento de tráfego e de veículos, e o reposicionamento da frota para o uso no planejamento seguinte.

Os problemas táticos, concentram-se na definição do conjunto de instruções que servirão para o planejamento mensal. Normalmente este planejamento é revisado periodicamente com base nas capacidades da malha, no tamanho da frota de vagões e locomotivas disponíveis, nas manobras dos vagões nos pátios, conforme as programações de manutenção e demais premissas operacionais.

Boa parte do planejamento tático está voltado à montagem do PAT – Plano de Atividade do Trem, em que é estabelecida a grade de horário dos trens e a respectiva programação das atividades do trem, definido os dias de operação, rotas, paradas, o horário de partida e chegada nos pátios e a capacidade dos trens a serem formados.

- c) **O planejamento operacional (curto prazo).** Habitualmente, este planejamento é executado pela liderança local, por chefes de pátios e pelos despachadores. As decisões operacionais podem afetar a execução e ajuste das programações de serviços, tripulação, atividades de manutenção, roteamento e despacho de veículos, e a alocação dinâmica de recursos escassos. Em relação aos níveis estratégico e tático, o risco financeiro do planejamento operacional é proporcionalmente menor. As deliberações normalmente são assumidas no nível de supervisão e geralmente chegam a durar até algumas semanas. São denominadas decisões do “dia-a-dia”, porém não significa que sejam de importância desprezível (MOREIRA, 1996).

2.4.O PLANEJAMENTO DO TRANSPORTE FERROVIÁRIO

O ideal para uma ferrovia, de acordo com BRINA (1983), seria a circulação dos vagões sempre lotados, de modo que ao serem descarregados em um pátio, fossem carregados no mesmo pátio com outra mercadoria. Não sendo isto possível, deve-se fazer com que os percursos de vagões vazios sejam os menores possíveis. No entanto, há situações em que determinados pátios são demandantes de vagões carregados, o que implica na saída de vagões vazios enquanto outros só realizam carregamentos, passando a demandar vagões vazios.

É fundamental que haja uma distribuição racional dos vagões, para que não faltem para o carregamento e circulem vazios o mínimo possível, bem como promovam o melhor aproveitamento do material rodante. Todavia, é imprescindível que o planejador receba diariamente informações detalhadas sobre a existência dos vagões nos pátios ou terminais, se estão carregados, vazios ou em processo de carga ou descarga, assim como as requisições de vagões pelos clientes, para se realizar o planejamento da alocação destes ativos. Os vagões em geral, estão sempre em utilização, mas no caso de sobras, estes são encaminhados a pontos estratégicos, para serem utilizados sempre que necessário (BRINA, 1983).

As maiorias das estradas de ferro realizam o seu planejamento de transporte com base nos volumes em toneladas, dos pedidos mensais de carga. O planejamento prevê o tipo de vagão a ser adotado no transporte do produto e elabora um levantamento preliminar da necessidade de ativos para o atendimento da demanda com base nos dias e horário das atividades desenvolvidas pelo cliente e no prazo para conclusão do transporte para se determinar qual o ciclo dos vagões deve ser cumprido. Se o quantitativo de ativos disponíveis for suficiente para atender a demanda, gera-se o planejamento mensal de transporte. Caso contrário, haverá necessidade de se fazer uma revisão das premissas operacionais envolvidas (vagões retidos nas oficinas para manutenção, tempos gastos em percurso, manobra, carga/descarga gastos etc.), buscando alternativas para disponibilizar o material rodante necessário ao cumprimento do programa. Desta forma, o plano mensal da alocação dos vagões de carga estabelece o número dos diferentes tipos de vagões que serão designados aos fluxos de mercadoria correspondente e menciona a previsão do início do transporte de acordo com a carga a ser transportada. A Figura 2.3 ilustra o processo de elaboração do planejamento tático de uma ferrovia (horizonte mensal), enquanto que na Figura 2.4, é detalhado o curso das ações relacionadas ao planejamento de curto prazo, ou seja, operacional (em dias de carregamento). A partir de então, é preparado o PAT – Plano de Atividade do Trem, que estabelece a formação dos trens, determinando o número e tipo de locomotivas necessárias, rotas, horários de partida e chegada, bem como os locais de paradas das composições para reabastecimento de combustível e troca da tripulação.

Contudo, os PATs estão sujeitos à modificações, pois numa estrada de ferro, é comum ocorrer imprevistos como a quebra de vagões, defeitos em locomotivas que provocam interrupções do tráfego ou das operações dos pátios e terminais. Estas ocorrências forçam ajustes no planejamento original de atendimento das demandas com base nos dados mais recentes.

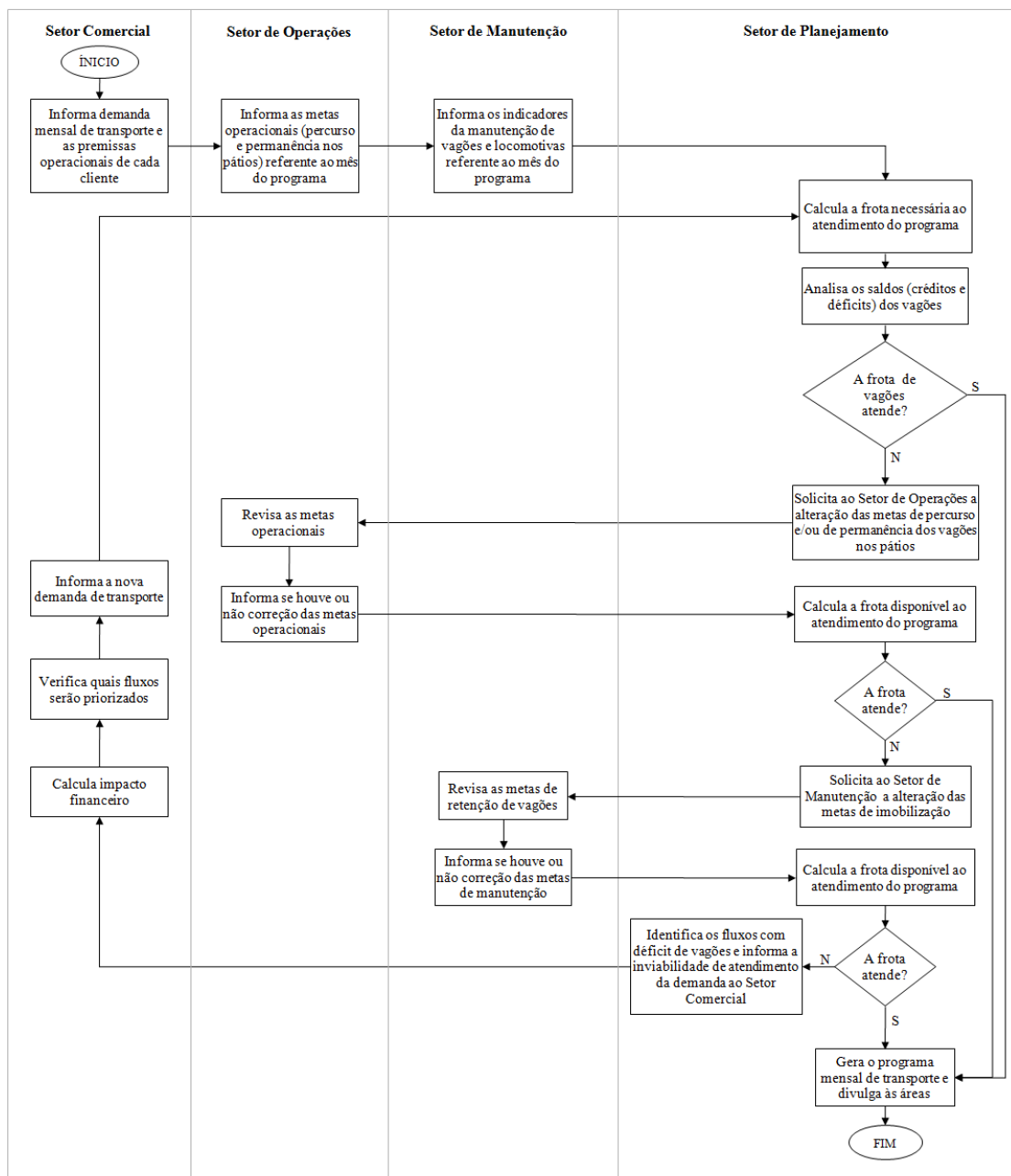


Figura 2.3: Processo de planejamento tático de uma ferrovia.

Fonte: Autor

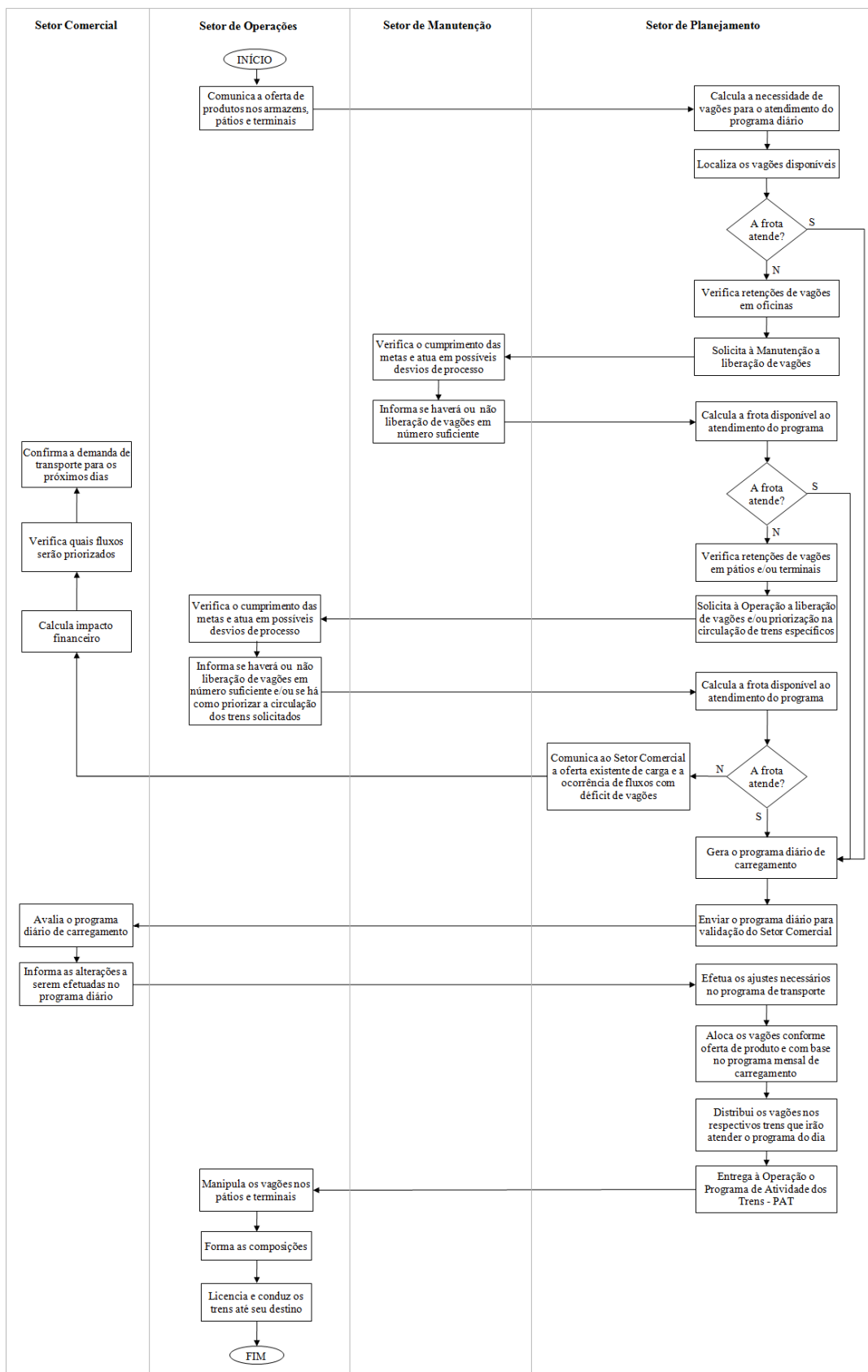


Figura 2.4: Processo de planejamento operacional de uma ferrovia.

Fonte: Autor

Uma vez conhecida a grade de horário dos trens, as demandas do dia e a posição dos vagões na ferrovia, o planejamento operacional (curto prazo), em atendimento às demandas, estabelece todas as operações de anexação-desanexação de vagões em trens e determina em quais pátios haverá o carregamento ou a descarga.

Estes planos são difíceis de analisar ou aperfeiçoar e qualquer mudança na rota dos vagões pode implicar em poucas a incontáveis alterações na programação original. Portanto, este tipo de planejamento é bastante influenciado pelo nível de habilidade e cuidado dispensado pelo planejador, tornando-se difícil, se não impossível, realizar qualquer análise ou otimização em tempo suficientemente curto.

2.5. A ALOCAÇÃO DE VAGÕES DE CARGAS

Os produtores de bens necessitam do serviço de transporte para movimentação das matérias-primas, dos produtos intermediários e para distribuição do produto final. É desta maneira que a demanda por transportes, proveniente da interação entre produtores e consumidores e das distâncias que usualmente os separam, está intimamente relacionada ao processo de alocação de vagões. Logo, é a partir da demanda que é definida a tonelagem do produto a ser transportada de uma origem para um destino (CRAINIC, 2003).

A demanda por transporte de uma carga pode ser expedida direta ou indiretamente de acordo com cada par origem/destino. Quando a demanda é expressiva, atrasos na entrega são minimizados através da adoção de trens expressos, como alternativa ao envio dos vagões em trens que cumprirão uma seqüência de viagens. No entanto, quando a demanda não justifica a expedição de trens expressos, os atrasos podem ser inevitáveis. Há situações em que os vagões de carga têm de esperar o acúmulo de carga até que haja tonelagem suficiente no terminal de origem que justifique a formação de um trem.

Uma alocação bem planejada pode ser capaz de equilibrar as cargas de trabalho

entre os pátios, pois os ajustes realizados no planejamento podem criar capacidade sistêmica através de mudanças no processo de demanda dos pátios que operam próximos ao seu limite da capacidade de movimentação de vagões, para pátios com capacidade ociosa.

Os custos operacionais são proporcionais ao número de vagões movimentados e estão diretamente relacionados às distâncias de transporte. Outros custos, como os de manuseio do vagão, frequentemente dependem do número de blocos de vagões que são controlados pelos pátios.

Segundo JOBORN *et al.* (2004), a formação de um bloco de vagão, ou blocagem, consiste na junção de um ou mais vagões mantidos e movimentados juntos por um ou mais trens de uma origem comum (ou ponto de recepção) para um destino comum (ou ponto de classificação). A classificação por sua vez, consiste na separação dos vagões contidos em um grupo de vagões (bloco) ou na junção de vagões para formação de um novo bloco para compor um trem. Esclarece também, que o custo operacional unitário tende a decrescer quando se trabalha com blocos maiores, pois normalmente simplificam as manobras e podem evitar o processo de classificação dos vagões em pátios intermediários. Desse modo, a estrutura de custo apresenta um comportamento de economia de escala. Para maiores detalhes sobre a abordagem a problemas de blocagem e manuseio de vagões em pátios, sugere-se a leitura dos trabalhos de JOBORN *et al.* (2004), RAMOS (2003) e FUKASAWA (2002).

Desta forma, um planejamento eficiente está relacionado à minimização dos custos de deslocamento dos vagões em atendimento à demanda por transporte. Normalmente as ferrovias, para se beneficiarem das economias de escala, frequentemente formam trens através de agrupamentos de vagões com várias cargas e com diferentes origens e destinos. Deste modo, deve-se contemplar o tipo adequado de vagão para o transporte e a sua respectiva disponibilidade, bem como conciliar os fluxos das mercadorias embarcadas. No entanto, estes fluxos podem impor freqüentes desequilíbrios espaciais na oferta e demanda por vagões vazios. Quando isto ocorre, não resta alternativa senão deslocar os vagões vazios de áreas onde há excesso para as áreas com *déficit*, no intuito de compensar este desequilíbrio (JOBORN *et al.* 2004). Portanto,

o processo de alocação está voltado ao atendimento das exigências impostas pelo modelo operacional com base nas diferentes necessidades dos clientes.

2.6. O EMPREGO DE PESQUISA OPERACIONAL NO PLANEJAMENTO FERROVIÁRIO

Nas últimas décadas, a distribuição do material rodante tem sido objeto de estudo de vários pesquisadores, com intuito de desenvolver modelagens matemáticas que confirmem um salto na qualidade operacional dos serviços ofertados pelas empresas operadoras de ferrovia. Neste tópico, são comentadas as propostas, soluções, abordagens e técnicas disponíveis na literatura.

No tocante ao método matemático de solução, BARR *et al.* (1995) descrevem que a solução exata está associada a problemas pelo qual um resultado ótimo ou exato é calculado através de otimização ou algoritmo exato. O método heurístico (também chamado de algoritmo de aproximação, um procedimento inexato ou simplesmente heurístico), é definido por um conjunto de passos para rápida identificação de uma solução de alta qualidade para um determinado problema. Esta é a principal razão que os métodos heurísticos são frequentemente escolhidos para identificar com boa aproximação, soluções em menor tempo do que é requerido por um algoritmo exato.

Vários estudos foram realizados sobre os problemas vividos pelos operadores ferroviários e posteriormente serviram de inspiração e ponto de partida de pesquisas para outros modais. DEJAX e CRAINIC (1987) reuniram e revisaram em um único trabalho, os modelos de gerenciamento e fluxo da frota de vagões vazios, apontaram tendências e fizeram sugestões de pesquisa neste campo. Encararam ainda, o deslocamento de vagões vazios como um problema exclusivo de custo, pois nesta situação os vagões não geram receita e é por esta razão que o planejamento da distribuição de vagões consiste na redução do tráfego destes ativos na condição de vazio, ou pelo menos, deve procurar melhorar a eficiência das operações com vagões carregados. A maioria dos modelos apresentados considerou como premissa frotas homogênea e demanda conhecida. Porém, os autores concluíram que deveriam ser

desenvolvidos modelos mais realísticos, abordando os tempos de trânsito gasto entre terminais e em situações de intercâmbio ferroviário. Isto implicaria na não-linearidade das funções objetivas, mas em contrapartida, induziria a necessidade de se explorar e desenvolver algoritmos mais eficientes. Para situações de intercâmbio, sugeriram que futuras pesquisas poderiam lançar mão das teorias de jogos.

CORDEAU *et al.* (1998) fazem uma revisão da maioria dos modelos propostos durante a década de 80, onde tratam da distribuição de vagões vazios, rotas e programação de trens (tanto de carga como de passageiro). O estudo faz uma abordagem aos três níveis de planejamento, sendo a atenção concentrada em problemas globais de gerenciamento dos trens. Os autores consideram que o reposicionamento dos vagões vazios de carga pode contribuir para a oferta de um melhor serviço aos clientes, reduzindo o tempo médio de espera por vagões e diminuindo o capital associado a investimentos para aquisição de equipamentos. Em todas as empresas ferroviárias, há uma grande preocupação pela busca da maximização da utilização dos equipamentos ferroviários em virtudes dos investimentos elevados associados a esses recursos. A gestão dos vagões de carga consiste em distribuir dinamicamente os vagões vazios na malha, a fim de melhorar o tempo de resposta da ferrovia às solicitações de vagões e na minimização dos custos associados à sua circulação.

Ainda em CORDEAU *et al.* (1998), são discutidos os modelos que lidam com programação de trens baseada em horários de partida. O trabalho também apresenta problemas de programação tanto no transporte de carga quanto de passageiros, ainda que em formas ligeiramente diferentes. Menciona que no caso do transporte de cargas, algumas vezes os trens podem operar sem uma programação de horário, estando a partida associada ao acúmulo da tonelagem de carga suficiente para formação de um trem completo. Embora esta prática ainda seja muito comum na América do Norte (assim como no Brasil), raramente é visto na Europa, onde trens de carga normalmente funcionam de acordo com horários programados como fazem no caso do transporte de passageiros. Quando os trens de carga não operam de acordo com uma programação, são atribuídas prováveis faixas de horários associados aos respectivos trens.

A maioria dos modelos de distribuição de vagões não leva em conta,

explicitamente, as economias de escala. Mas assumem, implicitamente, que o planejamento no nível tático pode conferir vantagens ao se trabalhar em larga escala. Isto significa que o programa de transporte é feito de forma a se obter o menor custo, atendendo cada movimento entre origem-destino.

Porém, a maioria dos modelos de distribuição de vagões de carga não realiza, explicitamente, a alocação dos mesmos em trens. Por exemplo, POWELL e CARVALHO (1998a e 1998b) propõem um modelo que atenda as exigências dos terminais a partir da definição da quantidade de vagões a serem enviados de um terminal para outro, partindo do pressuposto de que a frota permanece homogênea ao longo do tempo e que a demanda é conhecida. Na realidade, exploram o gerenciamento dinâmico de frotas, através da adoção de um modelo heurístico denominado *LQN - Logistics Queueing Network*. Anteriormente, a aproximação típica dos problemas de gerenciamento de frotas eram formulações de rede dinâmicas que usavam vários tipos de arco. O estudo tem início com uma formulação de programação linear clássica e em seguida, é reformulado para um programa dinâmico. O algoritmo *LQN* realiza uma relaxação linear da formulação dinâmica de programação e também faz uma nova derivação de gradientes e algoritmos para atualização das variáveis de controle. Por fim, a formulação substitui um único e grande problema de otimização por uma série de problemas pequenos e o resultado é utilizado na obtenção da solução geral.

A capacidade de transporte dos trens é uma das principais preocupações em muitas ferrovias, sendo o planejamento da utilização da capacidade, sem dúvida, um ponto de grande importância. HOLMBERG *et al.* (1998) apresentam uma descrição mais detalhada das possibilidades de transporte em um sistema ferroviário. A principal contribuição deste modelo está relacionada à alocação dos vagões conforme a capacidade dos trens, de acordo com os horários de partida e chegada e à criação de programações com vários dias de antecedência, mas não considera os impactos de larga escala, associados ao processo de consolidação/ordenação na distribuição dos vagões. O modelo proposto tem por objetivo atender a demanda por transporte, minimizando os custos, através da definição da quantidade de vagões vazios a serem movimentados entre os terminais. Considerando-se conhecida a oferta/demanda dos vários tipos de vagões, nos vários dias de tempo e caso a demanda não possa ser atendida, é admitido

que a mesma possa ser adiada para o próximo dia.

HAGHANI (1989) formula um modelo que combina simultaneamente o planejamento tático de formação de trens e distribuição dos vagões vazios de carga. Os fluxos dos vagões vazios são previstos no planejamento tático, em que são consideradas as influências causadas pela escolha da rota do trem e pelas decisões de formação. Neste modelo, a malha ferroviária é representada através de uma malha espaço-tempo, onde os nós representam os pátios em diferentes pontos ao longo do tempo e os arcos simbolizam as distâncias físicas e as atividades destes pátios. Cada pátio é representado por dois nós em cada dia do horizonte de planejamento. O primeiro nó determina o tráfego de saída e o segundo, o tráfego de entrada. É assumido pelo modelo que os tempos de viagens são fixos e que a demanda por vagões vazios que não for atendida num dado dia, poderá ser transferida para o dia seguinte, não implicando para o sistema em perda de demanda.

FUKASAWA (2002) desenvolveu dois modelos de programação inteira, fazendo uso algoritmos de pré-processamento e decomposição para conferir ganho de velocidade ao processo de solução de problemas globais de planejamento de atendimento à demanda e de fluxo de vagões numa ferrovia de carga. Estes problemas foram denominados Problema de Planejamento de Atendimento (PPA) e Problema de Fluxo de Vagões (PFV). O Problema de Planejamento de Atendimento (PPA), define as metas de atendimento para um período de um mês (problema de nível tático) considerando as capacidades da malha, o tamanho da frota de vagões, blocagem, classes de vagões e a disponibilidade de vagões vazios. Para esse problema, foi desenvolvido um modelo monoperiódico baseado no modelo de multifluxos, com algumas alterações para considerar a montagem de blocos e de classes de vagões. O modelo determina a quantidade de cada demanda por vagões a ser atendida, definindo qual caminho de cada vagão e o fluxo de vagões vazios possível ao atendimento. Já o Problema de Fluxo de Vagões (PFV), de nível operacional, determina a rota completa de cada vagão na malha ferroviária e a seqüência de carga/descarga, em um horizonte de planejamento semanal (vários dias). É assumido que a grade de trens e a capacidade das composições já estão definidas. O objetivo, neste caso, é escolher quanto e como atender cada demanda, com ou sem atraso, de modo a maximizar o lucro total.

O trabalho desenvolvido por JOBORN *et al.* (2004), que trata o problema da distribuição de vagões vazios em ferrovias com grade de horários para partida dos trens de carga, serviu de inspiração e apontou caminhos para o desenvolvimento do modelo proposto por esta dissertação.

Ao contrário da abordagem desenvolvida por esta dissertação, o modelo proposto por JOBORN *et al.* (2004) considera, no processo de alocação, os vagões de maneira individual. Este fato conduz a tempos elevados para busca da solução e normalmente, requer heurística para proporcionar rapidez na resolução.

Por outro lado, JOBORN *et al.* (2004) conduziram estudos relacionados a problemas de natureza operacional, em que é considerada a capacidade de cada trem e o custo de distribuição de grupos de vagões para se obter economia de escala. A função objetivo do modelo proposto procura determinar o menor custo relacionado aos movimentos O-D (origem-destino) da frota de vagões vazios em um dado horizonte de planejamento. Neste modelo, é considerada a possibilidade de se utilizar vários trens para o atendimento de uma demanda de transporte entre uma origem/destino e, caso necessário, os vagões podem ser movimentados por um mesmo trem entre inúmeros pares O-D. Supõe-se que a oferta e demanda por cada tipo de vagão e em cada terminal seja conhecida e cada demanda só poderá ser atendida por um tipo específico de vagão. A formulação não admite adiar o atendimento da demanda, porém, permite variar dia-a-dia a oferta, a demanda, o número de trens e as respectivas capacidades de transporte. Isto exige do modelo uma representação em função do tempo.

MARÓTI (2006) trata a questão do planejamento da circulação dos vagões de passageiros sob vários horizontes de planejamento, levando em conta a programação das manutenções preventivas dos vagões e o dimensionamento de equipagens necessárias. O modelo considera a qualidade do serviço ofertado através da disponibilidade/utilização de assentos de acordo com a demanda de passageiros e, caso necessário, pode sugerir o acréscimo de vagões às composições nos horários de pico ou a retirada de vagões durante horários de baixa demanda. Além disto, define as estações em que as manobras de acoplamento/desacoplamento serão realizadas, bem como locais

estratégicos para o estacionamento destes vagões durante os dias de baixa demanda. Enfim, propôs uma programação eficiente do material rodante capaz de contribuir para a redução dos custos operacionais envolvidos e que permitisse melhorar a pontualidade dos trens de passageiros da ferrovia holandesa *NSR – Nederlandse Spoorwegen Reizigers* estudada.

O modelo de ALFIERI *et al.* (2006), ao invés de lidar com vagões unitários, procurou determinar o número de composições necessárias, em uma ferrovia de linha singela, para satisfazer a demanda de passageiros. As restrições contidas no modelo se referem às manobras dos trens, que diferem em relação aos vagões, por ocorrerem em tempos menores e devido a flexibilidade de manobra do trem quando comparado com a manipulação de vagões unitários. O modelo considera, além do horizonte tático, o problema de otimização operacional da circulação de um determinado número de trens em um conjunto de linhas regulares, assumindo cíclica a programação dos horários de partida dos trens. O objetivo é buscar o equilíbrio entre objetivos contraditórios de minimização: escassez de assentos (serviço), número de trens em operação ou quilometragem percorrida pelos vagões (eficiência) e o número de manobras realizadas (método robusto). Cabe ressaltar a importância das manobras para o modelo, pois são fontes potenciais de interrupção do tráfego e ao evitá-las é possível favorecer a pontualidade dos trens. Por fim, o modelo aproximado é então testado em problemas reais através de estudos de caso na ferrovia holandesa *NSR - Nederlandse Spoorwegen Reizigers*.

O modelo formulado por MARÓTI (2006) utiliza programação linear e faz uso de várias técnicas para conferir ganho de velocidade ao processo de solução. Além disto, propõe um algoritmo heurístico para determinação de rotas e avalia seu comportamento em estudos de casos. Já ALFIERI *et al.* (2006) descrevem um modelo de programação inteira para determinar, para um único dia, a circulação dos vários tipos de vagões a serem alocados a uma única linha de transporte regular de passageiros, levando em consideração a demanda de vagões nas composições. Assim como é feito por POWELL e CARVALHO (1998a e 1998b), a metodologia de solução está voltada à decomposição do problema em subproblemas para obtenção da solução geral.

O modelo proposto por HAGHANI (1989) possui restrições lineares e função objetivo não-linear. Esta formulação resultou em um modelo de programação linear inteira para a determinação dos custos e atrasos, exceto para a classificação que usa funções convexas de interrupção. A estrutura do problema induziu a decomposição heurística do problema em subproblemas, pois são resolvidos mais facilmente. Combinando as soluções dos subproblemas obtém-se a solução geral do problema.

DEJAX e CRAINIC (1987), CORDEAU *et al.* (1998), e HOLMBERG *et al.* (1998), não apresentam as respectivas formulações matemáticas e limitam-se a descrever textualmente as principais características contidas nos modelos analisados.

O estado da arte que fora apresentado está relacionado às inúmeras pesquisas desenvolvidas por autores estrangeiros, dentre as quais algumas foram aplicadas com sucesso na solução de problemas reais para aumentar a eficiência e o aproveitamento dos recursos. No entanto, no Brasil, ainda é limitado o número de pesquisas sobre a aplicação da otimização para solução de problemas reais.

CAPÍTULO 3

MODELAGEM MATEMÁTICA

3.1. CARACTERIZAÇÃO DA MALHA FERROVIÁRIA

O modelo matemático proposto foi desenvolvido a partir de dados empíricos e problemas vivenciados pela Companhia Ferroviária do Nordeste - CFN, que permitiu perceber os problemas em estudo e definir o melhor método de solução. A Figura 3.1 ilustra os fluxos de cargas entre os diversos terminais, de uma ferrovia fictícia, que auxiliou no processo de elaboração da programação linear. Este esquema seguiu a lógica de que cada terminal recebesse dois fluxos distintos e efetuasse carregamento de um único produto, sendo a única exceção relativa ao pátio *D*, que foi adotado como pátio descarga cujo propósito foi o de validar o planejamento elaborado pela modelagem concebida.

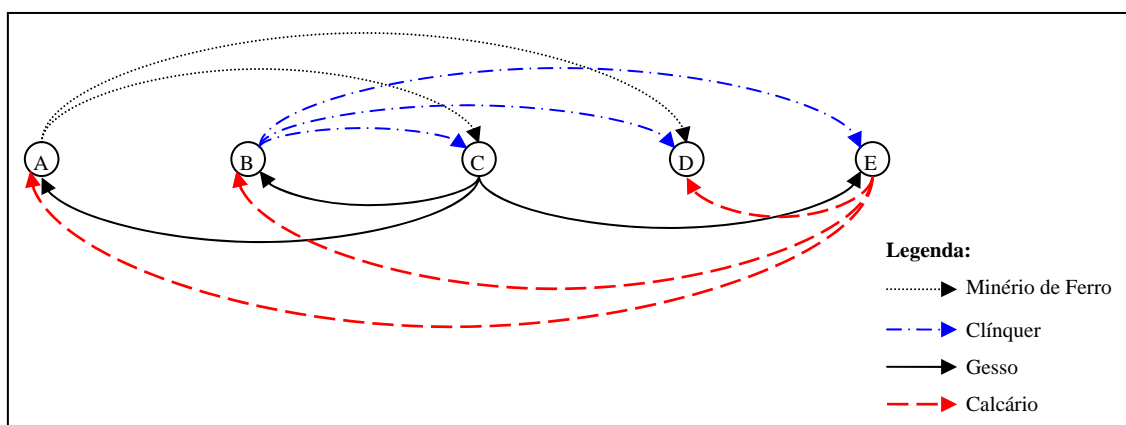


Figura 3.1: Esquema simplificado do fluxo de cargas em uma ferrovia fictícia.

3.1.1. Pátios

O planejamento ferroviário, visando o pleno atendimento da demanda por transporte de carga, contempla o posicionamento e o estado (vazio ou carregado) da frota de vagões e de posse destas informações analisa a melhor alternativa de

deslocamento do ativo necessário ao transporte. É evidente que a decisão do deslocamento está relacionada ao fator custo e ao tempo de percurso gasto entre origem-destino para mobilizar os recursos necessários ao atendimento do programa de transporte. Na Tabela 3.1 encontra-se os tempos de percursos utilizados no desenvolvimento da modelagem. Para fins de simplificação no processo de análise dos resultados, foi informado para o modelo que no instante inicial todos os vagões encontravam-se estacionados, disponíveis e vazios no pátio *E*.

Tabela 3.1: Tempo de percurso origem-destino (dias).

	A	B	C	D	E
A	0	1	2	3	4
B	1	0	1	2	3
C	2	1	0	1	2
D	3	2	1	0	1
E	4	3	2	1	0

A programação linear também considera a capacidade de movimentação de vagões em cada pátio. Estas premissas operacionais encontram-se apresentadas nas Tabelas 3.2. Além disto, adotou-se como premissa que toda partida só ocorrerá em um mínimo de 24h após a chegada dos vagões no terminal de destino. Este tempo foi assumido como tempo de permanência nos terminais para fins de operações de carga/descarga.

Tabela 3.2: Capacidade de movimentação dos pátios.

Pátios	Capac. Mov. (#vgs)
A	128
B	107
C	1.322
D	810
E	932

3.2. CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL RODANTE DISPONÍVEL

3.2.1. Locomotivas

O foco deste trabalho foi estudar o problema de planejamento da alocação de vagões de carga, portanto, os métodos e resultados apresentados neste trabalho são específicos do material rodante do caso em questão.

3.2.2. Vagões

Uma vez conhecida a demanda de transporte e os tipos de vagões a serem utilizados, faz-se necessário que o modelo matemático descrito a seguir no item 3.4, considere as capacidades de transporte de cada tipo de vagão e a respectiva disponibilidade da frota para proceder as devidas alocações de carga. Na Tabela 3.3, são apresentados os tipos, capacidades e frota dos vagões utilizados na modelagem.

Tabela 3.3: Frota de vagões disponíveis considerada pelo Modelo.

Tipo	Capac. (t)	Frota
<i>hopper</i>	50	384
gôndola	45	54
plataforma	50	203
fechado	47	379

3.3. CARACTERIZAÇÃO DA DEMANDA POR TRANSPORTE

Por fim, resta caracterizar a demanda de carga (em toneladas) a ser movimentada entre as origens-destinos, especificando os vagões adotados para o transporte, bem como o início e fim do transporte. É sabido que há cargas que só podem ser transportadas por um tipo específico de vagão (a exemplo de granéis líquidos que são transportados em vagões tanque), porém esta preocupação não foi rigorosamente levada em conta por ser facilmente resolvida através dos dados fornecidos ao modelo quando

da definição do vagão adotado para o transporte da carga. É oportuno mencionar que os dados fornecidos ao modelo, referentes às demandas e ao frete, são valores hipotéticos e foram definidos a partir de programas de transporte elaborados pela CFN – Companhia Ferroviária do Nordeste, não implicando, todavia, em prejuízo à análise do modelo proposto.

Os horizontes de planejamento estudados foram 15 e 30 dias, pois são razoáveis sob o ponto de vista de um planejamento operacional e tático, ou seja, de curto e médio prazo. A Tabela 3.4 apresenta a programação do transporte fornecida ao modelo para a elaboração da alocação dos vagões e o frete considerado pelas funções objetivo que ponderam o aspecto econômico. Além do frete, as funções objetivo (3.1d) e (3.1e), que serão descritas no item 3.4 a seguir, observam os custos operacionais dos vagões bem como os respectivos custos de paralisação de um ativo específico, conforme é apresentado na Tabela 3.5.

Tabela 3.4: Programação do transporte de carga considerada pelo Modelo.

Produto	Vagão Adotado	Origem	Destino	Volume (t)	Data Início	Data Fim	Frete (R\$/t)
Minério de Ferro	<i>hopper</i>	A	C	10.150	4	14	22,41
Minério de Ferro	<i>hopper</i>	A	D	9.050	6	11	23,71
Clínquer	<i>gôndola</i>	B	C	800	8	14	47,21
Clínquer	<i>gôndola</i>	B	D	550	5	12	48,14
Clínquer	<i>gôndola</i>	B	E	1.000	12	13	54,06
Gesso	<i>plataforma</i>	C	A	3.650	10	14	48,14
Gesso	<i>plataforma</i>	C	B	2.900	12	15	46,49
Gesso	<i>plataforma</i>	C	E	1.500	14	14	43,96
Calcário	<i>fechado</i>	E	A	7.350	9	12	85,34
Calcário	<i>fechado</i>	E	B	3.000	10	13	74,66
Calcário	<i>fechado</i>	E	D	1.250	14	15	59,04

Cabe esclarecer que não foi possível obter os valores reais dos custos de operação e paralisação, pois são considerados confidenciais. Por esta razão, os custos de operação por tonelada transportada, foram definidos a partir de uma estimativa em

relação ao frete praticado, pois é calculado com base no peso embarcado. Já o custo de paralisação foi assumido como sendo 10% maior que o custo de operação, uma vez que este percentual representa o custo de imobilização da frota de vagões, sendo considerado adequado por se tratar de um custo unitário (por vagão).

Tabela 3.5: Custos considerados no Modelo.

Tipo	Custo Op./t	Custo Paralis./vg
<i>hopper</i>	23,06	25,37
gôndola	29,88	32,87
plataforma	27,72	30,49
fechado	43,81	48,19

3.4. MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DOS VAGÕES DE CARGA

Os dados de entrada utilizados na modelagem são apresentados a seguir:

1. Pátios/terminais e suas respectivas capacidades de movimentação;
2. Frota de vagões com as capacidades individuais de transportes;
3. O tempo de percurso gasto entre a origem-destino;
4. Programa de atendimento da demanda: relação dos fluxos de mercadorias (origem-destino) com o volume total a ser transportado; tipo de vagão adotado para o transporte; data do início e fim do carregamento e o frete praticado;
5. Custos operacionais dos vagões;
6. Custo de paralisação do ativo.

De posse destes dados, é calculada a oferta/demanda por tipo de vagão e determinada as respectivas quantidades para cada dia planejado. Todo deslocamento é minuciosamente determinado de forma a atender a função objetivo que pode ser: a minimização dos vagões retidos nos pátios/terminais (estudos revelam que o tempo de retenção destes vagões nos pátios representa cerca de 50% do tempo total de trânsito), a

minimização do número de viagens dos vagões (vazios e carregados, ou, apenas dos vagões vazios); a maximização do lucro ou a minimização dos custos (de retenção/operação dos vagões nos pátios/terminais). Estas alternativas serão objeto de análise deste estudo e influirão na formulação matemática que considera e define os seguintes parâmetros e variáveis de decisão, descritos a seguir.

Parâmetros (dados de entrada):

- k : define o tipo do vagão alocado;
- p : estabelece o produto a ser transportado, caso o vagão esteja vazio, recebe valor nulo;
- $T_{o(i),d(j)}$: determina o tempo de percurso gasto pelos vagões que foram enviados pelo terminal i com destino a j ;
- C_i : define a capacidade de operação do pátio i em termos de capacidade de estacionamento de vagões;
- Q_k : estabelece a capacidade de transporte de um dado tipo de vagão k em toneladas;
- V_k : determina a frota de um dado tipo de vagão k ;
- D_d : caracteriza a demanda de produto, em toneladas, a ser transportada;
- Cop_k : corresponde ao custo operacional de um dado tipo de vagão k ;
- $CParalis_k$: corresponde ao custo de se manter parado um dado tipo de vagão k ;
- $frete_p$: corresponde ao frete, por tonelada, cobrado pelo transporte de uma dada carga p para um determinado destino;
- $t_zero_i^k$: dado de entrada fornecido ao modelo como subsídio para início dos cálculos (sendo o primeiro dia designado ao fornecimento destes dados). Trata-se de uma informação relacionada à localização e quantidade de vagões, por tipo, em cada pátio ou terminal da malha ferroviária.

Variáveis de decisão (saída do modelo):

- $S_{o(i),d(j),t}^{k,p}$: define a quantidade de vagões que sairão da origem i para o destino j no tempo t , relacionando o tipo do vagão (k) e o produto (p) a ser transportado;
- $E_{d(j),o(i),t}^{k,p}$: define a quantidade de vagões que chegarão no destino j , provenientes do pátio de origem i , no tempo t , observando o tipo do vagão (k) e o produto (p) transportado;
- $X_{i,t}^k$: representa o total de vagões parados sem programação no terminal i , no dia t ;
- $folga_p$: é uma variável de folga e corresponde ao volume excedente de carga transportada pelo planejamento realizado pelo modelo.

Conforme mencionado anteriormente, a modelagem considerou cinco variantes, em termos de função objetivo, denominados: Modelo 1; Modelo 2; Modelo 3; Modelo 4 e Modelo 5, respectivamente. A primeira variante, apresentada em (3.1a), busca a minimização do quantitativo de vagões ociosos retidos em cada terminal. A função descrita em (3.1b), busca minimizar o total de vagões em circulação, como forma de otimizar a utilização da frota existente. Enquanto em (3.1c) a função objetiva minimizar o total de vagões vazios em circulação, lembrando que viagens de vagões neste estado, não contribuem para geração direta da receita. Já na função (3.1d), o objetivo é maximizar o lucro, enquanto em (3.1e) pondera a minimização dos custos operacionais. Cada função objetivo, em separado, foi restringida em função das equações e inequações relacionadas de (3.2) a (3.12). A única exceção está associada ao conjunto de inequações definidas em (3.7a) que foram utilizadas para restringir cada uma das funções objetivos (3.1a), (3.1b) ou (3.1c), enquanto as equações presentes em (3.7b) foram empregadas para restringir as funções (3.1d) ou (3.1e).

$$f(X) = \min \sum_i \sum_t \sum_k X_{i,t}^k \quad (4.1a)$$

$$f(X) = \min \sum_i \sum_j \sum_t \sum_k \sum_p S_{o(i),d(j),t}^{k,p} \quad (4.1b)$$

$$f(X) = \min \sum_i \sum_j \sum_t \sum_p S_{o(i),d(j),t}^{vazio,p} \quad (4.1c)$$

$$f(X) = \text{máx} \sum_i \sum_j \sum_t \sum_k \sum_p S_{o(i),d(j),t}^{k,p} \cdot Q_k \cdot \text{frete}_p - \left[\left(\sum_p \text{folga}_p \cdot \text{frete}_p \right) + \left(\sum_i \sum_j \sum_t \sum_k \sum_p S_{o(i),d(j),t}^{k,p} \cdot \text{Cop}_p \right) + \left(\sum_i \sum_t \sum_k X_{i,t}^k \cdot \text{Cparaliz}_k \right) \right] \quad (4.1d)$$

$$f(X) = \text{min} \sum_i \sum_j \sum_t \sum_k \sum_p S_{o(i),d(j),t}^{k,p} \cdot \text{Cop}_k + \sum_i \sum_t \sum_k X_{i,t}^k \cdot \text{Cparaliz}_k + \sum_p \text{folga}_p \cdot 1,1 \cdot \text{frete}_p \quad (4.1e)$$

$$X_{i,t}^k = X_{i,t-1}^k + \sum_{o(j)} \sum_P E_{d(j),o(i),t}^{k,p} - \sum_{d(j)} \sum_P S_{o(i),d(j),t}^{k,p} \quad \forall i, t, k, p \quad (4.2)$$

$$S_{o(i),d(j),t}^{k,p} = E_{d(j),o(i),t+T_{o(i),d(j)}}^{k,p} \quad \forall i, j, t, k, p \quad (4.3)$$

$$\sum_{d(j)} \sum_P S_{o(i),d(j),t}^{k,p} \leq X_{i,t-1}^k \quad \forall i, t, k \quad (4.4)$$

$$\sum_k X_{i,t}^k \leq C_i \quad \forall i, t \quad (4.5)$$

$$\sum_i X_{i,t}^k \leq V_k \quad \forall t, k \quad (4.6)$$

$$\sum_i \sum_j \sum_t \sum_k \sum_p S_{o(i),d(j),t}^{k,p} \cdot Q_k \geq D_d \quad \forall (i, j, p) \in D \quad (4.7a)$$

$$\sum_i \sum_j \sum_t \sum_k \sum_p S_{o(i),d(j),t}^{k,p} \cdot Q_k + \text{folga}_p = D_d \quad \forall (i, j, p) \in D \quad (4.7b)$$

$$X_{i,1}^k = t_zero_i^k \quad \forall i, k \quad (4.8)$$

$$X_{i,t}^k \in Z^+ \quad \forall k \in K, i \in I, t = 1, 2, \dots, T \quad (4.9)$$

$$X_{i,t} \in Z^+ \quad \forall i \in I, t = 1, 2, \dots, T \quad (4.10)$$

$$S_{o(i),d(j),t}^{k,p} \in Z^+ \quad \forall k \in K, p \in P, (i, j) \in G, t = 1, 2, \dots, T \quad (4.11)$$

$$E_{d(j),o(i),t}^{k,p} \in Z^+ \quad \forall k \in K, p \in P, (i, j) \in G, t = 1, 2, \dots, T \quad (4.12)$$

$$\text{folga}_p \in R^+ \quad \forall p \in P \quad (4.13)$$

Com base nas variáveis apresentadas, o conjunto de equações (3.2) fornece as quantidades de vagões (por tipo) remanescentes no pátio i , ao final do dia t . Esta equação é composta por três partes. A primeira parte corresponde ao saldo de vagões remanescentes do dia anterior $t-1$. A segunda está relacionada à quantidade de vagões designados ao transporte do produto p que chegou ao terminal i provenientes do pátio j ; enquanto que o terceiro termo da equação está voltado ao quantitativo de ativos alocados (vagões do tipo k) ao transporte do produto p que saíram do terminal i com destino à j .

O conjunto de equações determinadas em (3.3), estabelece o total de vagões

(tipo k , alocados ao transporte do produto p) que saíram do terminal i com destino ao pátio j , no dia t , deve ser igual à quantidade de vagões que chegarão ao pátio j , no dia $t+T_{o(i),d(j)}$ (considera-se, aqui, $T_{o(i),d(j)}$ como sendo o tempo de percurso gasto pelos respectivos vagões para trafegar entre a origem i e o destino j).

As restrições definidas por (3.4), impõem que a saída total de vagões (tipo k , alocados ao transporte do produto p) do pátio i , no dia t , com destino a j , está limitada à disponibilidade destes ativos no pátio i no dia $t-1$. Esta é a restrição que adota como premissa que toda partida só ocorrerá no mínimo 1 dia após a chegada dos vagões no terminal de destino. Conforme mencionado anteriormente, este tempo foi assumido como tempo de permanência nos terminais para fins de operações de carga/descarga.

O conjunto de restrições em (3.5) determina que o somatório de todos os tipos de vagões contidos no terminal i , durante o dia t , não deve ultrapassar a respectiva capacidade daquele terminal.

As inequações presentes em (3.6), estabelecem que o total dos vagões de cada tipo, distribuídos na malha ferroviária (somatório em i), durante o dia t , devem respeitar a frota disponível de cada tipo de vagão.

O conjunto de desigualdades e equações apresentadas em (3.7a) e (3.7b) obriga o modelo a realizar, durante todo horizonte de planejamento, alocações necessárias ao completo atendimento da demanda por transporte do produto p das diferentes origens i e destinos j , levando-se em conta a capacidade máxima de transporte de cada tipo de vagão k . Em (3.7b) a diferença está relacionada ao emprego da variável folga para permitir o uso destas equações com as funções objetivos (3.1d) e (3.1e).

Em (3.8), é definido o estado inicial da frota de vagões na ferrovia, fornecendo um retrato que mostra como os vagões estão distribuídos no instante inicial (primeiro dia do horizonte de planejamento). Para fins de simplificação, foi admitido que todos os vagões encontram-se estacionados no pátio E , disponíveis e vazios.

Finalmente, de (3.9) a (3.12), é apresentado o conjunto de restrições de

integralidade das variáveis do modelo proposto. Cada vagão possui uma capacidade específica de atendimento a um determinado produto. Já em (3.13) consiste no excesso de carga transportada do produto p ao qual é associado o custo de frete.

3.5.VALIDAÇÃO DO MODELO PROPOSTO

É importante esclarecer que a MRS Logística S.A. foi contatada no intuito de se obter apoio no tocante ao fornecimento dos dados necessários à aplicação da modelagem desenvolvida para resolução de problemas reais. Porém, em virtude do atraso na resposta à solicitação, optou-se por validar o modelo através dos dados empíricos obtidos a partir da observação do modo operante da CFN – Companhia Ferroviária do Nordeste.

Segundo PEGDEN *et al* (1995) *apud* RAMOS (2003), o processo de validação consiste no esforço para que seja atingido um nível de confiança tolerável, nas premissas aplicadas no modelo, de maneira que sejam corretas e que possam ser empregadas a problemas reais.

O modelo, para ser considerado válido, deve ser capaz de atender a todas as premissas impostas colocadas durante sua elaboração. Ou seja, se a data prevista pelo modelo, para o início do transporte é respeitada; se as saídas dos vagões reconhecem a data em que a mercadoria estará disponível no pátio para o carregamento, assim como os tempos de deslocamento dos recursos para atender a demanda. Além disto, o volume planejado de transporte deve atender a demanda programada, e as alocações devem cumprir o limite disponível da frota de vagões, bem como os vagões devam corresponder ao tipo designado pelo programa de transporte. E, finalmente, se os tempos de percurso e estadia nos pátios estão sendo respeitados.

Tabela 3.6: Resumo dos objetivos de cada Modelo.

Modelo	Função	Descrição
Modelo 1	(3.1a)	Minimizar quantidade de vagões retidos nos pátios
Modelo 2	(3.1b)	Minimizar quantidade de vagões em circulação
Modelo 3	(3.1c)	Minimizar quantidade de vagões vazios em circulação

Modelo 4	(3.1d)	Maximizar lucro
Modelo 5	(3.1e)	Minimizar custo

As Figuras 3.2 e 3.3, a seguir, apresentam o atendimento em toneladas, da programação de transporte obtido através do planejamento gerado pelos cinco modelos analisados.

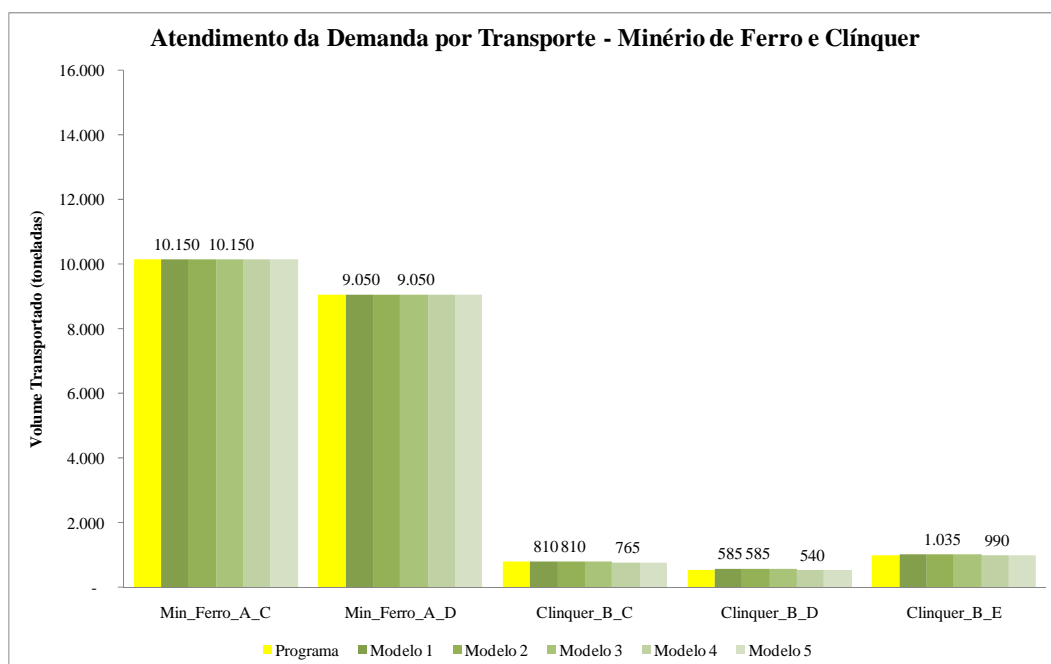


Figura 3.2: Atendimento da demanda por transporte (minério de ferro e *clínquer*).

Conforme é mostrado na Figura 3.2, as demandas de minério de ferro e *clínquer* foram integralmente atendidas por todos os modelos. Porém, os Modelos 1 e 3 apresentaram um planejamento que conduziu a um transporte excedente de carga em relação ao programa de transporte do gesso e do calcário (Figura 3.3), ou seja, o planejamento realizado pelo Modelo 1 apresentou 57,5% de volume excedente em relação ao programa de transporte do gesso com destino ao pátio A, implicando num excedente de 2.100 toneladas em relação à demanda real. Já o planejamento realizado pelo Modelo 3 apresentou um desvio de 84,1% no transporte de calcário com destino ao pátio A, trazendo como consequência um excedente de 6.186 toneladas. Este fato mostra a influência da disponibilidade da frota de vagões sobre o resultado obtido pelas funções objetivo dos modelos mencionados.

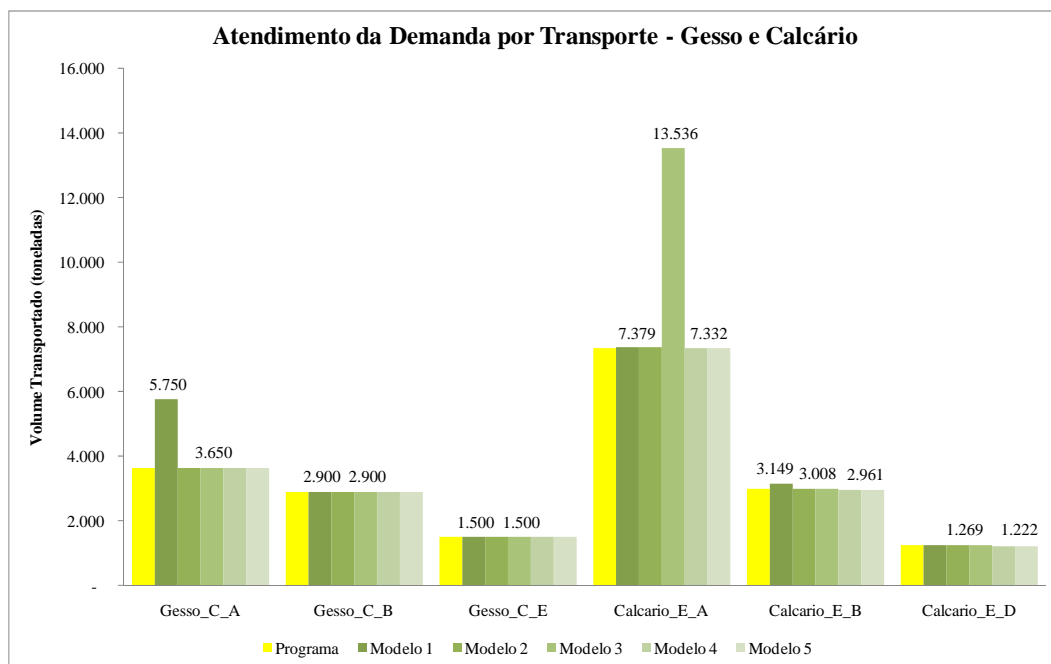


Figura 3.3: Atendimento da demanda por transporte (gesso e calcário).

Analisando as alocações, no caso do Modelo 1, a função objetivo (3.1a), buscando a minimização do número de vagões parados provocou a utilização além do necessário, de 42 vagões-plataforma no circuito de maior tempo de percurso, ou seja, de *C* para *A* com uma alternativa a se evitar a “ociosidade” destes vagões, trouxe implicações relacionadas ao transporte de uma carga inexistente, uma vez que a demanda era 3.650 toneladas.

O Modelo 3, definido pela função objetivo (3.1c), procurando minimizar o número de vagões vazios em viagem, criou um plano que definiu a movimentação de um volume de calcário além do normal devido à alocação excedente de 131 vagões fechados no fluxo. Para tanto, há dois fatores envolvidos: o tamanho da frota de vagões fechados e o tempo de percurso gasto entre a origem (pátio *E*) e o destino da carga (pátio *A*). Neste caso, enquanto houver vagões ociosos e tempo disponível para realização do transporte, o modelo continuará programando viagens para os vagões carregados mesmo que a demanda por transporte tenha sido atendida. Esta característica está relacionada ao conjunto de inequações (3.7a) e à movimentação dos vagões vazios a ser minimizada. A Figura 3.4 a seguir, sintetiza o número de vagões utilizados no processo de carregamento por cada um dos modelos.

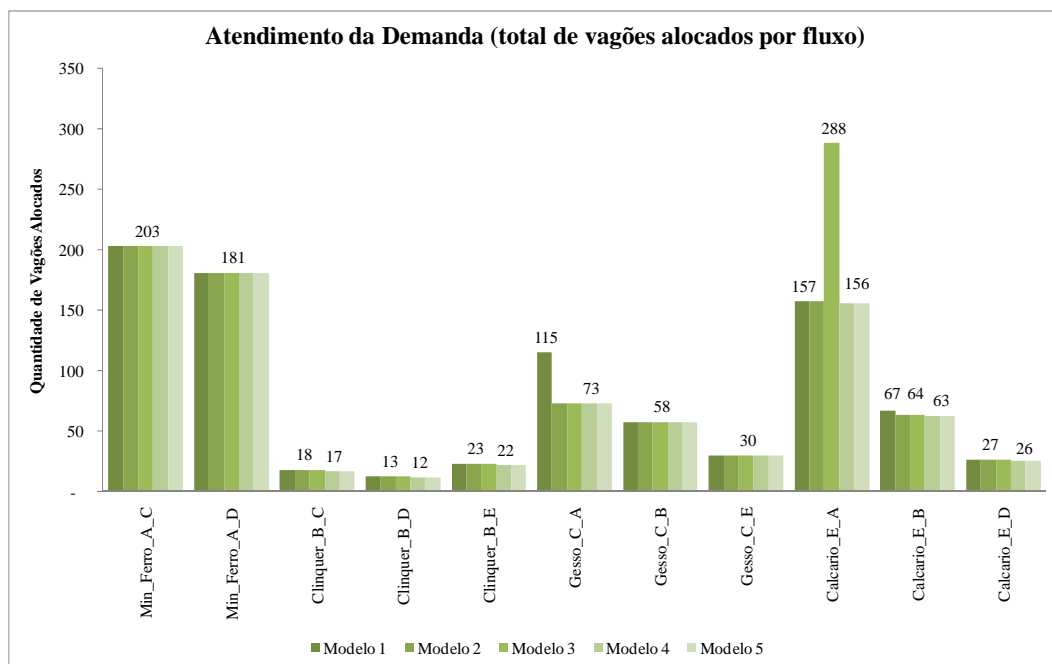


Figura 3.4: Quantidade de vagões alocados pelo Modelo para o transporte.

Ao longo do horizonte de planejamento (15 dias), houve em média: 231 vagões parados sem programação no Modelo 1; 554 vagões no Modelo 2; 526 vagões no Modelo 3; e, 242 tanto no Modelo 4 como no Modelo 5. A Figura 3.5, a seguir, apresenta as médias obtidas pelos modelos. Ressalta-se aqui, que o Modelo 2, que tem por objetivo minimizar o número de vagões em circulação para atendimento da demanda, obteve o maior número de vagões retidos, enquanto que os Modelos 4 e 5, considerando o aspecto econômico durante o planejamento, obteve o mesmo quantitativo de vagões parados.

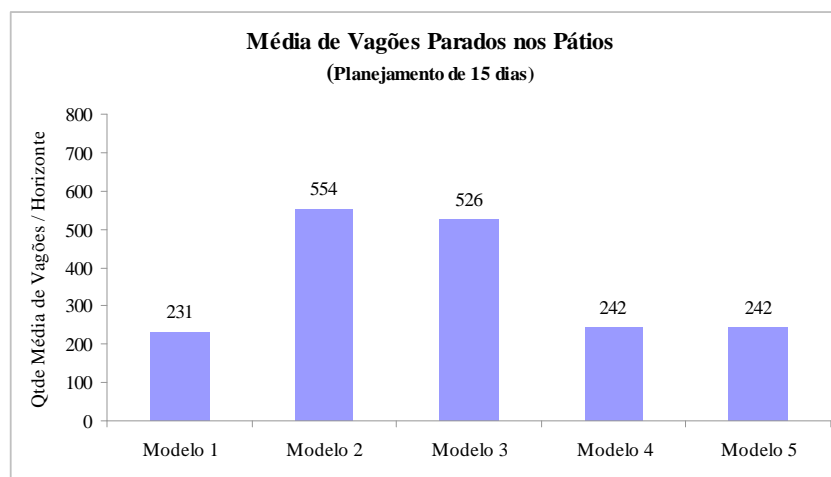


Figura 3.5: Quantidade de vagões alocados pelos Modelos Matemáticos.

Em termos de percentuais de utilização da disponibilidade, obteve-se: 77,4% da frota de vagões em operação no Modelo 1 (movimentos de atendimento a demanda e movimentos de vagões efetivamente vazios); 45,7% no Modelo 2; 48,5% no Modelo 3; e, 76,3% nos Modelos 4 e 5 respectivamente como mostra a Figura 3.6.

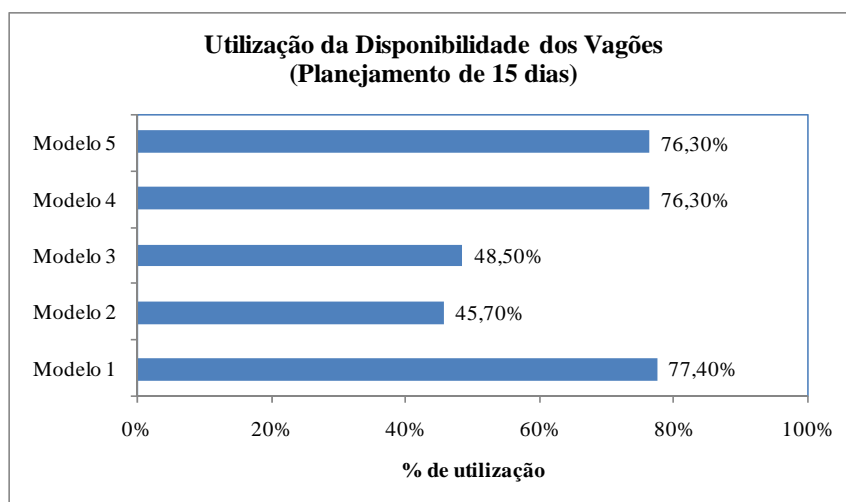


Figura 3.6: Utilização da disponibilidade dos vagões x Modelos Matemáticos.

Analisando os resultados, na Figura 3.6, percebe-se que os Modelos 2 e 3 apresentaram baixos níveis de utilização dos vagões (abaixo de 50%) devido o propósito de cada modelo. Este fato, no entanto, não implica que o modelo seja melhor ou pior em relação aos demais, pois o resultado é fruto da estratégia a ser adotada pelo planejador conforme a necessidade da empresa.

Ao detalhar os percentuais de utilização por tipo de vagão, obtidos pelos Modelos 2 e 3 (apresentado nas Figuras 3.7 e 3.8 adiante), constata-se que o nível de utilização da frota de vagões está relacionado à demanda por transporte programada. Ou seja, a frota de plataforma e fechados foi subutilizada em função do volume de carga previsto para estes tipos de vagões. Já em relação à frota de *hopper* e *gôndola* conclui-se que o volume de carga foi bem dimensionada, pois os modelos obtiveram uma utilização acima de 60%.

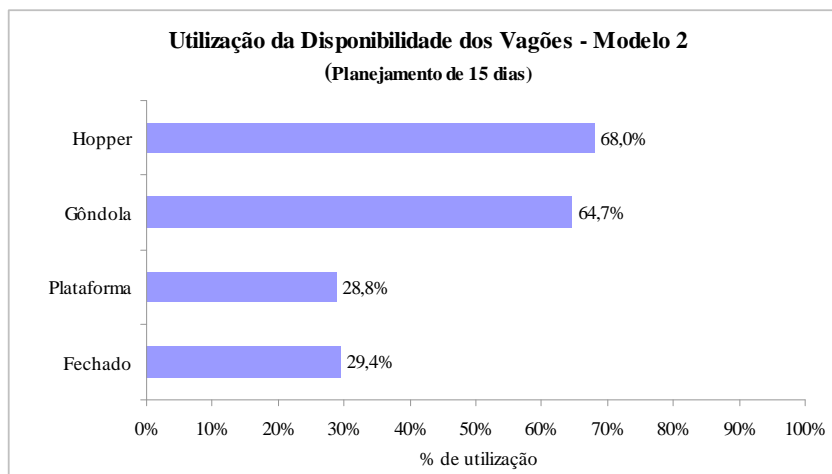


Figura 3.7: Utilização da disponibilidade dos vagões gerada pelo Modelo 2.

A Figura 3.8, evidencia que o nível de utilização da frota de fechados gerado pelo Modelo 3 (46,7%) foi superior ao obtido pelo Modelo 2 (29,4%), este fato está relacionado à função objetivo do modelo em questão que influencia na quantidade de ativos que ficaram parados, além disto, o resultado é fruto da oferta de carga. Através da modelagem matemática, é possível avaliar o nível de utilização dos vagões, a partir da demanda prevista e mensurar a necessidade de captação de cargas para frotas subutilizadas.

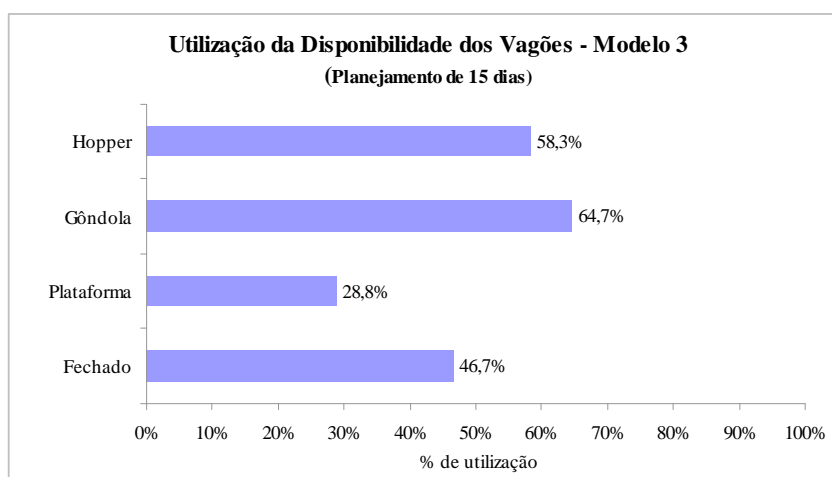


Figura 3.8: Utilização da disponibilidade dos vagões (planejamento de 15 dias).

A Tabela 3.7, adiante mostra o tempo demandado, por cada um dos cinco modelos, para o atendimento do programa de carregamento das demandas propostas. Ao estudar cada modelo isoladamente, verifica-se que os tempos de atendimento da

demanda variam em função da localização dos vagões, pois no 1º dia, toda frota de vagões encontra-se estacionada no terminal *E*, havendo necessidade de deslocar os diferentes tipos vagões para os pátios com *déficit* para atender a demanda em questão. Além disto, os volumes das mercadorias movimentadas e o tamanho da frota de cada tipo de vagão, por não serem iguais, contribuem para a divergência no dia de conclusão do carregamento.

Avaliando as informações contidas nesta tabela, conclui-se que o Modelo 1 conseguiu atender 100% do carregamento de minério de ferro, saindo de *A* para *C*, no menor prazo, ou seja, no 8º dia, enquanto que os Modelos 3 e 5 levaram 9 dias para concluir o transporte, enquanto que os Modelos 2 e 4 precisaram de 14 dias para atender 100% do volume demandado.

No caso do *clínquer*, destinado ao pátio *E*, os Modelos 1, 3 e 5 se apresentaram mais rápidos. Estes modelos geraram um planejamento que garantiu o atendimento de 100% da demanda fosse realizado até o 12º dia, enquanto que os Modelos 2 e 4 concluíram o carregamento no 13º dia. Mas, ao observar a demanda do gesso, destinado ao pátio *E*, e do calcário, destinado à *D*, verifica-se que o cumprimento do programa de carregamento, sem exceção, foi alcançado pelos cinco modelos ocorreu 14º dia.

O ambiente computacional utilizado foi o *software* Lingo 8.0 e o Excel 2007. O Lingo foi usado para executar o modelo e o Excel foi empregado para fornecer os dados de entrada e para a transferência dos resultados gerados pelo Lingo.

Cada modelo, executado em separado, apresentou 38.700 variáveis inteiras, 1.841 restrições com tempos computacionais iguais a 7 segundos na execução do Modelo 1 (função objetivo 3.1a); 4 segundos na execução dos Modelos 2 e 3 (função objetivo 3.1b e 3.1c, respectivamente); e, com relação ao Modelo 4 (função objetivo 3.1d) e Modelo 5 (função objetivo 3.1e) obteve-se respectivamente um tempo de 5 segundos. A Tabela 3.8, abaixo, apresenta os dados obtidos pelos modelos propostos.

Tabela 3.8: Resultado alcançado pelos Modelos.

	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5
Variáveis inteiras	38.700	38.700	38.700	38.700	38.700
Número de restrições	1.841	1.841	1.841	1.841	1.841
Tempo computacional	7 seg	4 seg	4 seg	5 seg	5 seg
Ramificações <i>Branch&Bound</i>	-	-	-	-	-

Os modelos foram executados em *hardware* com processador AMD Turion 64 X2 1.90 GHz, 2 Gb de Memória RAM.

CAPÍTULO 4

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Uma característica relevante a todos os modelos é a exigência de informações de boa qualidade (especificamente para este estudo, as informações se restringem à disponibilidade da frota; tempos de percurso e de retenção nos pátios, previsões de demanda coerentes; custos operacionais, etc.) e que seja capaz de traduzir um fenômeno real através da modelagem. Esta é uma área rica para novas pesquisas e pode render valiosos resultados para modelos de todos os níveis de tomada de decisão, especialmente para o nosso país, onde há pouca disponibilidade de recursos e uma enorme oportunidade de obtenção de ganhos na utilização da infra-estrutura ferroviária existente. Assim, o objetivo deste capítulo é avaliar, ao longo do horizonte de planejamento estudado, as distribuições dos vagões realizadas por cada modelo (formulado no capítulo 3), levando-se em conta a demanda e os tempos de atendimento estabelecidos.

Para facilitar o entendimento, foram criados diagramas ilustrando os deslocamentos da frota designada ao atendimento da demanda ao longo de dezesseis dias, ou seja, quinze dias de planejamento (conforme mencionado no capítulo 3, o primeiro dia é reservado para fornecer os dados de entrada). Na parte superior do diagrama são apresentadas as quantidades de vagões que saem de uma dada origem para um destino. Na parte inferior, com base nos tempos de percurso, são definidas as chegadas dos vagões aos respectivos destinos, bem como os pátios onde ocorrem estadias. Foi adotada a seguinte convenção: linha pontilhada – representa os fluxos de vagões vazios; linha tracejada – apresenta os fluxos cujos vagões estão em processo de carga ou descarga e linha contínua – são os fluxos dos vagões carregados.

Lembrando que os dados inseridos no modelo, referem-se ao instante inicial (1º dia), dizem respeito à localização da frota de vagões e 100% destes recursos encontram-se estacionados no pátio *E*. É por esta razão que no dia subsequente, há necessidade do

deslocamento destes ativos vazios em número suficiente ao atendimento da demanda para os locais onde serão efetuados os carregamentos. Portanto, os primeiros deslocamentos devem ter início somente a partir do segundo dia.

4.1. FROTA DE VAGÕES *HOPPER*

Nesta seção será apresentado o resultado do planejamento obtido pelos modelos propostos em atendimento à demanda de minério de ferro por transporte. Para este tipo de carga o vagão adotado é do tipo *hopper*, cujo carregamento é efetuado no terminal *A* e destinado aos pátios *C* e *D* conforme ilustra a Figura 4.1.

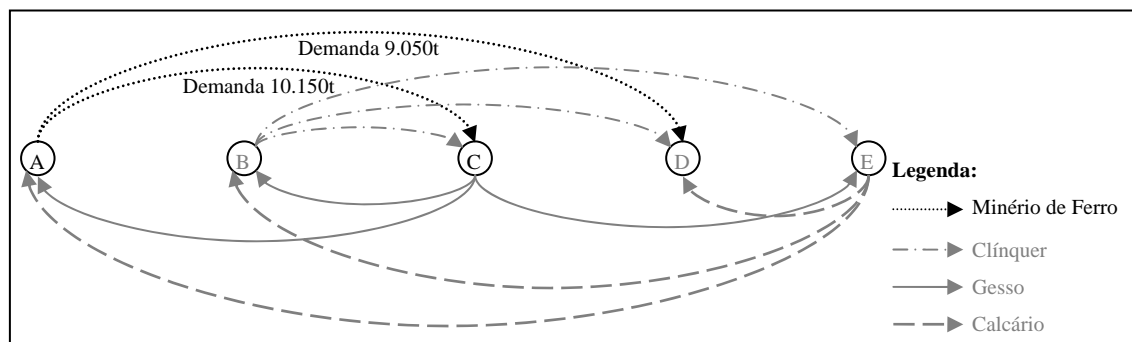


Figura 4.1: Fluxo de carga atendido pela frota de vagões *hopper*.

Através da Figura 4.2, comprova-se que os vagões partiram de *E* no dia 2 e só estarão disponíveis para o carregamento em *A* no dia 6, pois a modelagem considera o tempo de percurso neste caso, de 4 dias (vide Tabela 3.1). Além disto, a modelagem estabelece que os vagões devem permanecer por 24h nos terminais. Esta permanência destina-se às operações de manobra, carga, descarga e formação da composição ferroviária. Assim, toda saída está condicionada a acontecer no dia seguinte à chegada dos ativos no pátio. Por este motivo, pode acontecer que os vagões carregados não venham a sair no dia que fora definido pelo programa de transporte, neste caso, o dia 4 como data prevista para o início do carregamento do minério de ferro destinado ao pátio *C* e o dia 6 para o início do carregamento do minério para o pátio *D* (vide Tabela 3.4). Avaliando o plano gerado pelo Modelo 1, na Figura 4.2 e de acordo com o explanado, verifica-se que os vagões carregados só partiram de *A* para os pátios *C* e *E* nos dias 07 e

08, respectivamente.

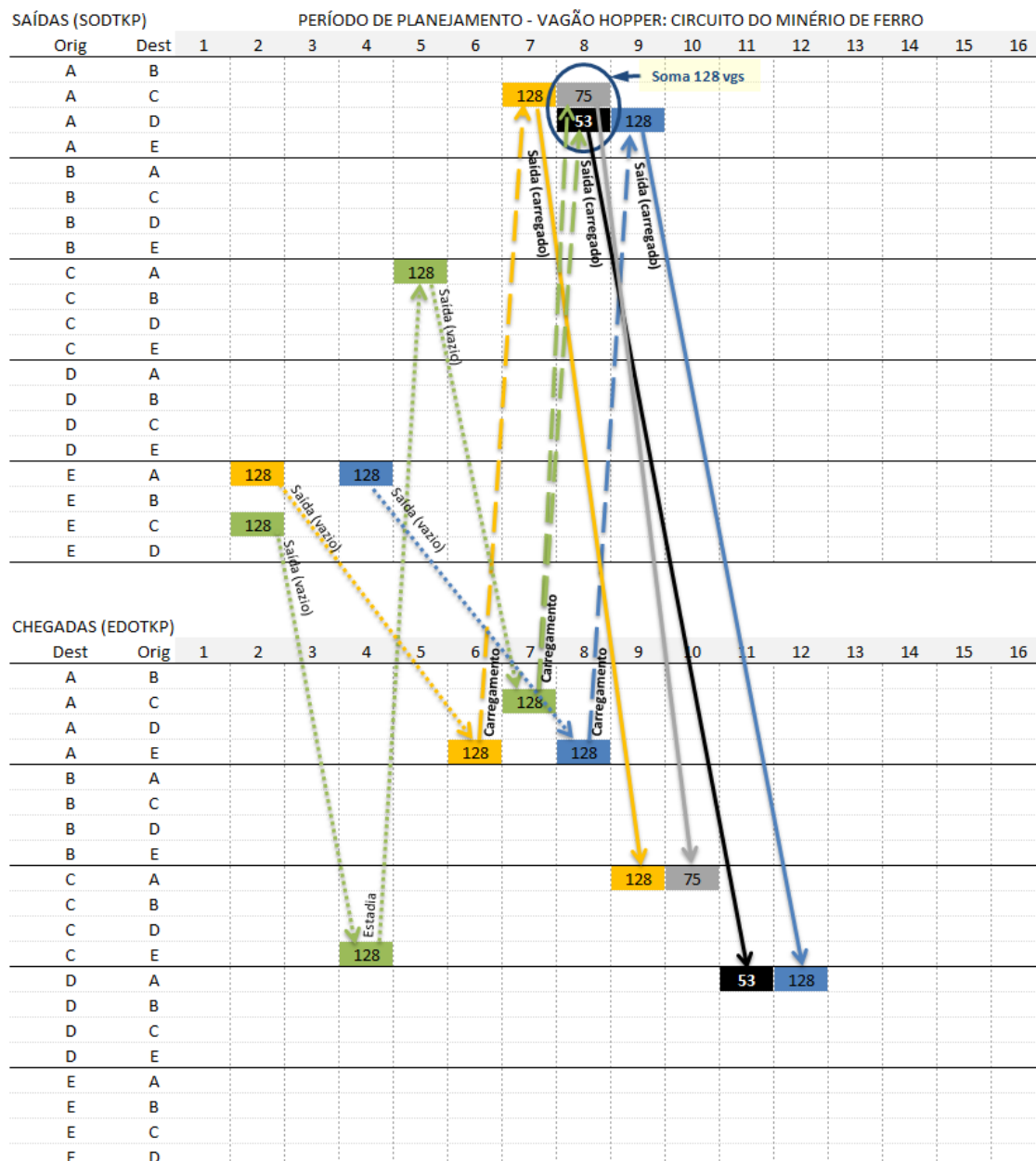


Figura 4.2: Plano do Modelo 1 para o vagão *hopper* - circuito do minério de ferro.

Os deslocamentos planejados pelo Modelo 1 geraram um movimento interessante: a saída de *hoppers* destinados ao pátio C para em seguida serem direcionados ao terminal A onde será efetuado o carregamento com minério de ferro para o destino final. Esta peculiaridade é decorrente da função objetivo (3.1a) que visa minimizar número de vagões parados nos pátios durante o horizonte de planejamento.

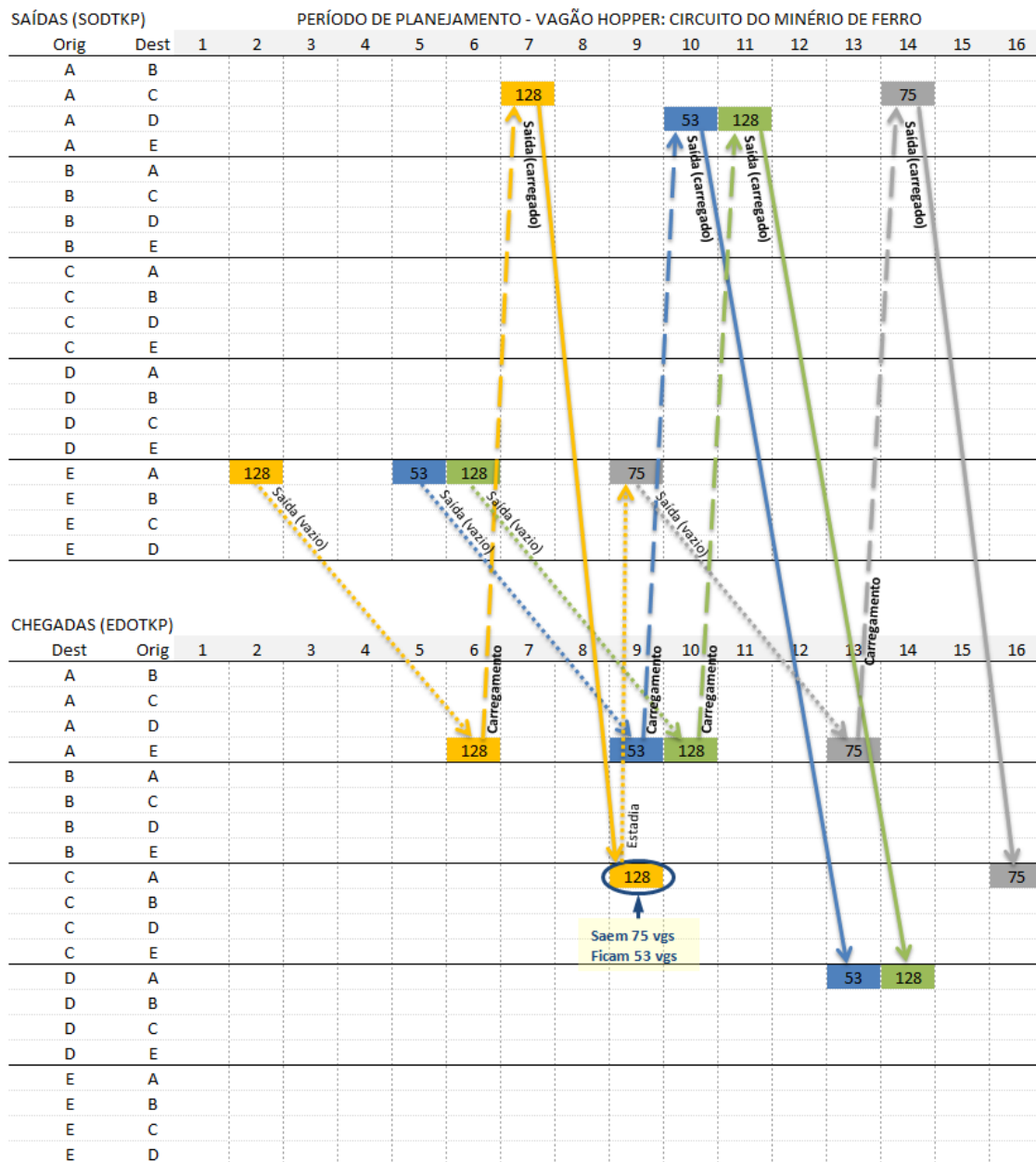


Figura 4.3: Plano do Modelo 2 para o vagão *hopper* - circuito do minério de ferro.

Comparando o planejamento apresentado pelas Figuras 4.2 e 4.3, constata-se que em relação ao plano proposto pelo Modelo 1, os deslocamentos efetuados pelo Modelo 2 (função objetivo 3.1b que procura minimizar o número de viagens realizadas) foram distribuídos ao longo do horizonte de planejamento e, ao contrário do Modelo 1, todos os *hoppers* saíram do terminal *E* diretamente para o pátio *A*.

A Figura 4.4 a seguir, exhibe o plano gerado pelo Modelo 3 (minimizar o número

de vagões vazios em circulação). Neste plano, observa-se que as movimentações dos ativos originários de *E* ocorreram de maneira similar ao Modelo 1. No entanto, as saídas foram realizadas em intervalos aproximadamente uniformes, vindo a concluir a entrega do produto no fim do planejamento (16º dia), enquanto que o Modelo 1 finalizou a entrega no 12º dia.

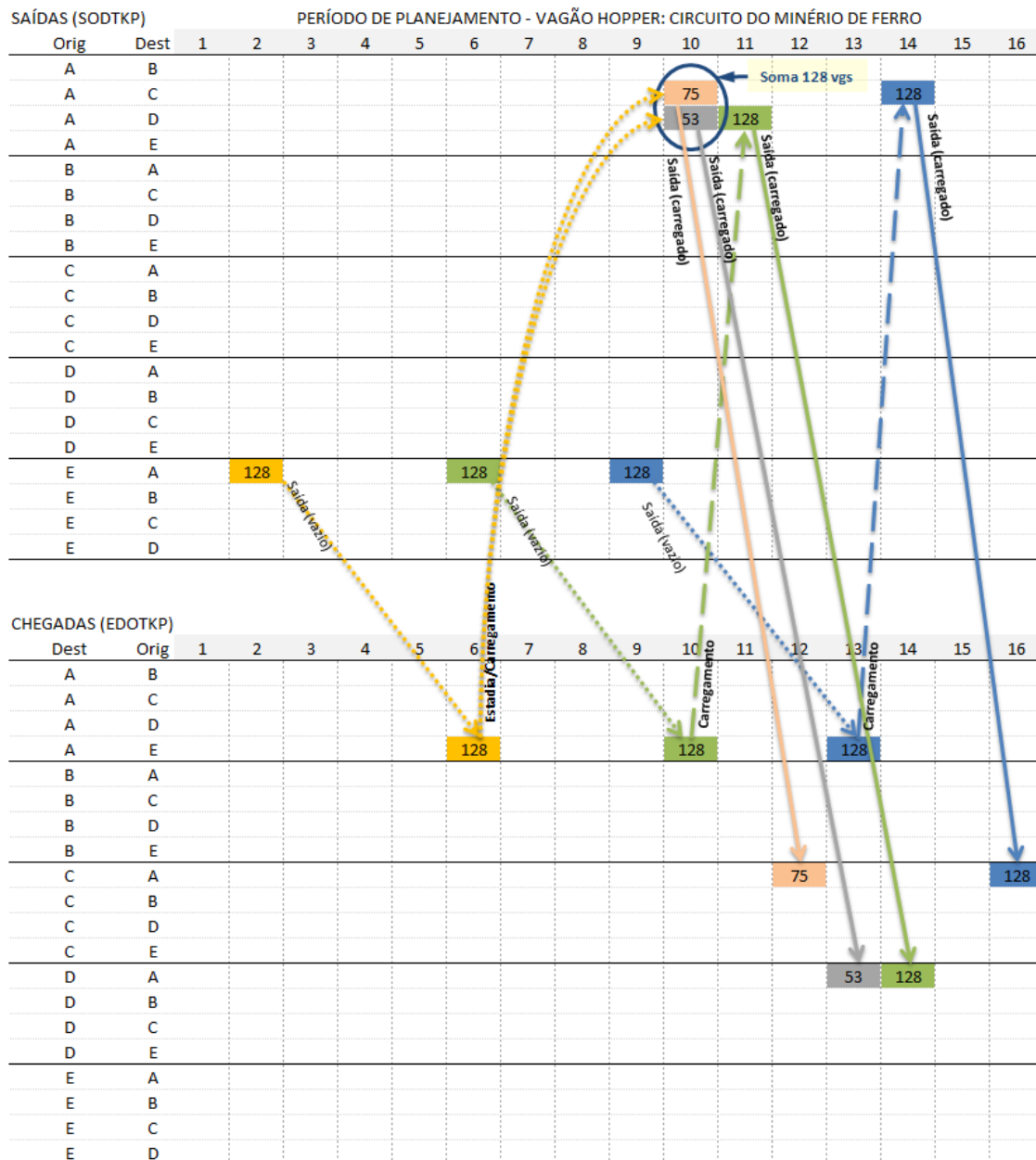


Figura 4.4: Plano do Modelo 3 para o vagão *hopper* - circuito do minério de ferro.

O planejamento realizado pelos Modelos 4 e 5 (ambos ponderam os fatores econômicos) foi mais robusto no tocante à movimentações desnecessárias, pois

apresentou uma movimentação objetiva e sistemática. Nos dias 7 e 8, há divergência pautada no quantitativo de *hoppers* alocados ao transporte de carga para o pátio C e para o pátio D, porém, nos dias 9 e 10 subsequentes, os quantitativos de 51 e 128 *hoppers* não divergem, apenas diferem quanto ao destino dos ativos alocados ao respectivo fluxo. Apesar dos planejamentos terem atendido à condição de partida dos vagões (variável *Sodtkp*), houve diferença na data de conclusão de entrega da carga ao destino, conforme observado nas Figuras 4.5 e 4.6 adiante.

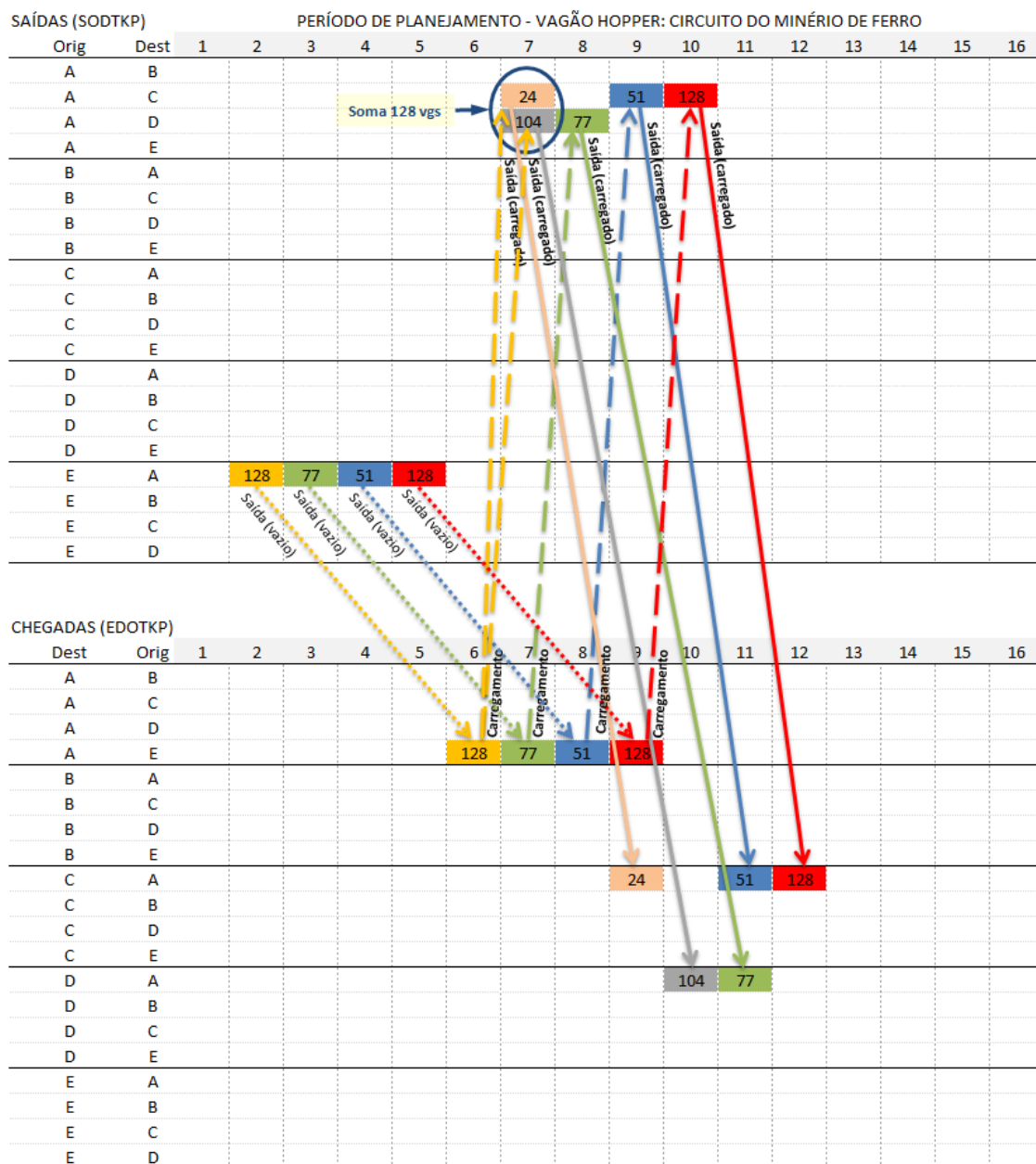


Figura 4.5: Plano do Modelo 4 para o vagão *hopper* - circuito do minério de ferro.

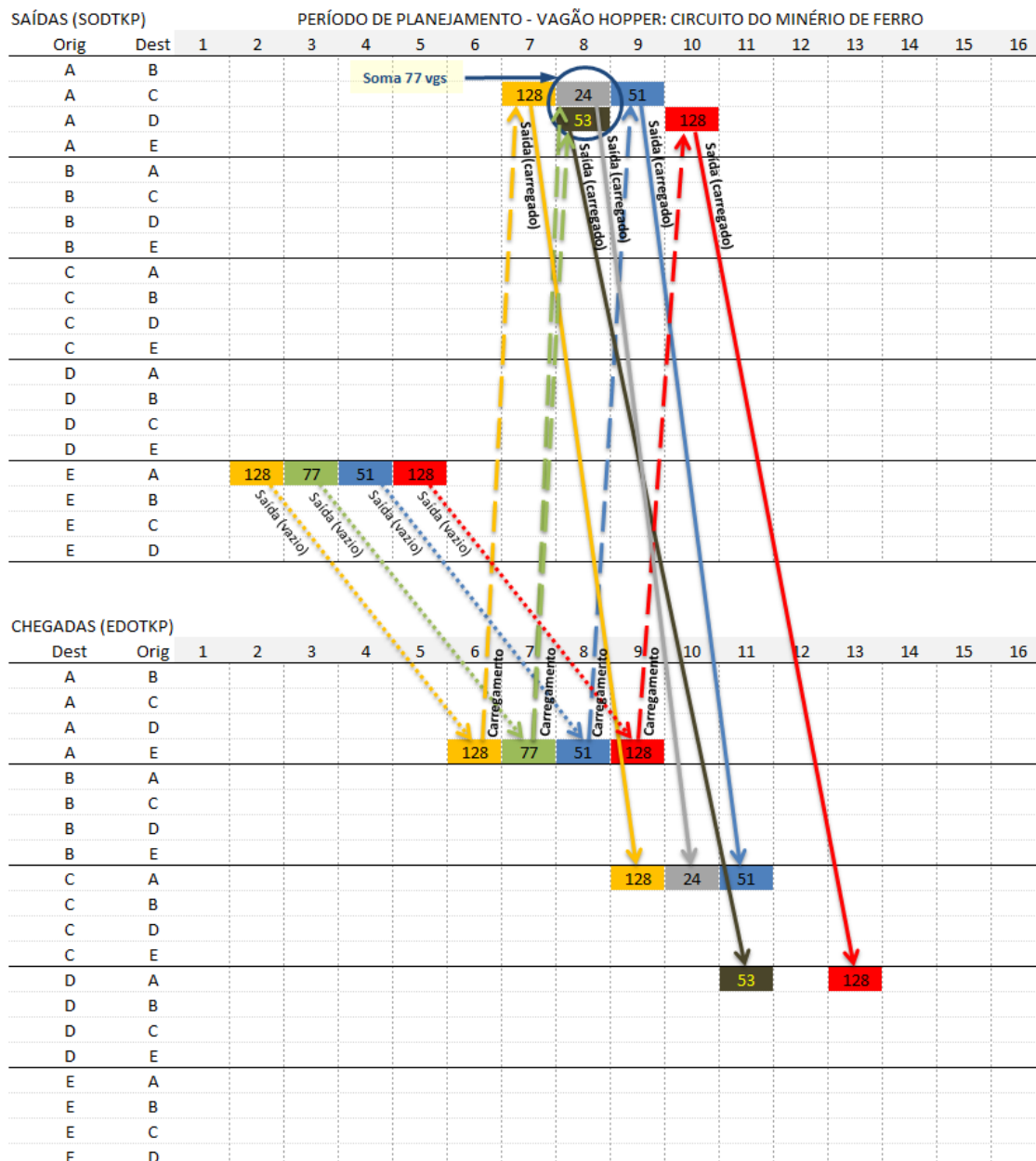


Figura 4.6: Plano do Modelo 5 para o vagão *hopper* - circuito do minério de ferro.

4.2. FROTA DE VAGÕES GÔNDOLA

A seguir, é apresentado o resultado do planejamento obtido pelos modelos propostos em atendimento ao programa de transporte do *clínquer*. Para este produto o vagão adotado é do tipo *gôndola*, cujo carregamento é efetuado no terminal *B* e destinado aos pátios *C*, *D* e *E* conforme ilustra a Figura 4.7.

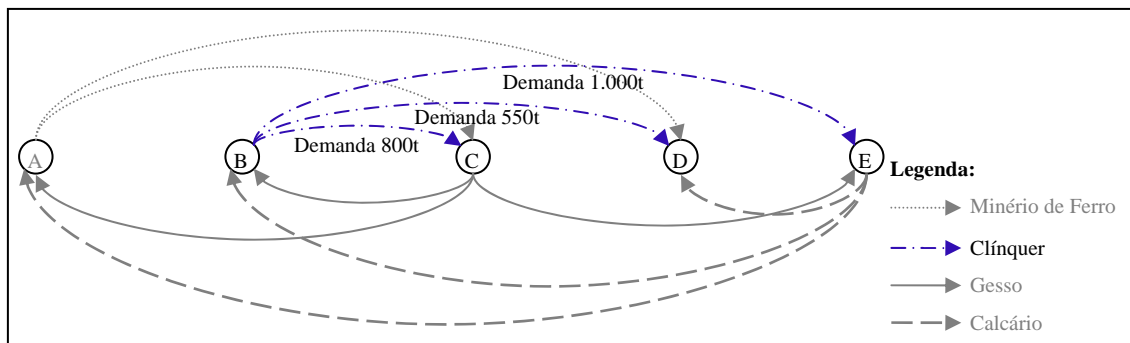


Figura 4.7: Fluxo de carga atendido pela frota de vagões gôndola.

Através da Figura 4.8 a seguir, é possível observar que os 23 vagões que partiram do terminal *E* no dia 2, foram direcionados para o pátio *C*, para em seguida no dia 5, retornarem ao terminal *E* e posteriormente no dia 8, seguirem viagem para o pátio *B*, de onde no dia 12, será realizado o carregamento de *clínquer* para o pátio *E*. Observe que o objetivo de se manter as 23 gôndolas em movimento (representando 43% da frota deste tipo de vagão), se deve a dois fatores: influência da função objetivo (3.1a) e a data para o início do carregamento de *clínquer*, conforme o programa de transporte, o primeiro carregamento de *clínquer* para o pátio *D* deveria ocorrer no 5º dia, no 8º ocorreria o carregamento destinado ao pátio *C* e no 12º para o terminal *E*.

A função objetivo (3.1a), cujo propósito é minimizar a quantidade de vagões retidos nos pátios, foi responsável por manter os vagões em movimento até que fosse atingido o momento para realizar o carregamento do *clínquer* a ser destinado ao terminal *E* (no 12º dia). Do ponto de vista prático, planejamento como o apresentado pelo Modelo 1, deve ser evitado de qualquer maneira, pois não se pode ter vagões vazios circulando de um lado para outro sem contribuir para a geração de receita e por implicar apenas em custos de deslocamentos. Porém, a função objetivo (3.1a), apresentou um resultado que atende plenamente ao propósito pela qual foi concebida: evitar que fiquem vagões parados ao longo do horizonte de planejamento.

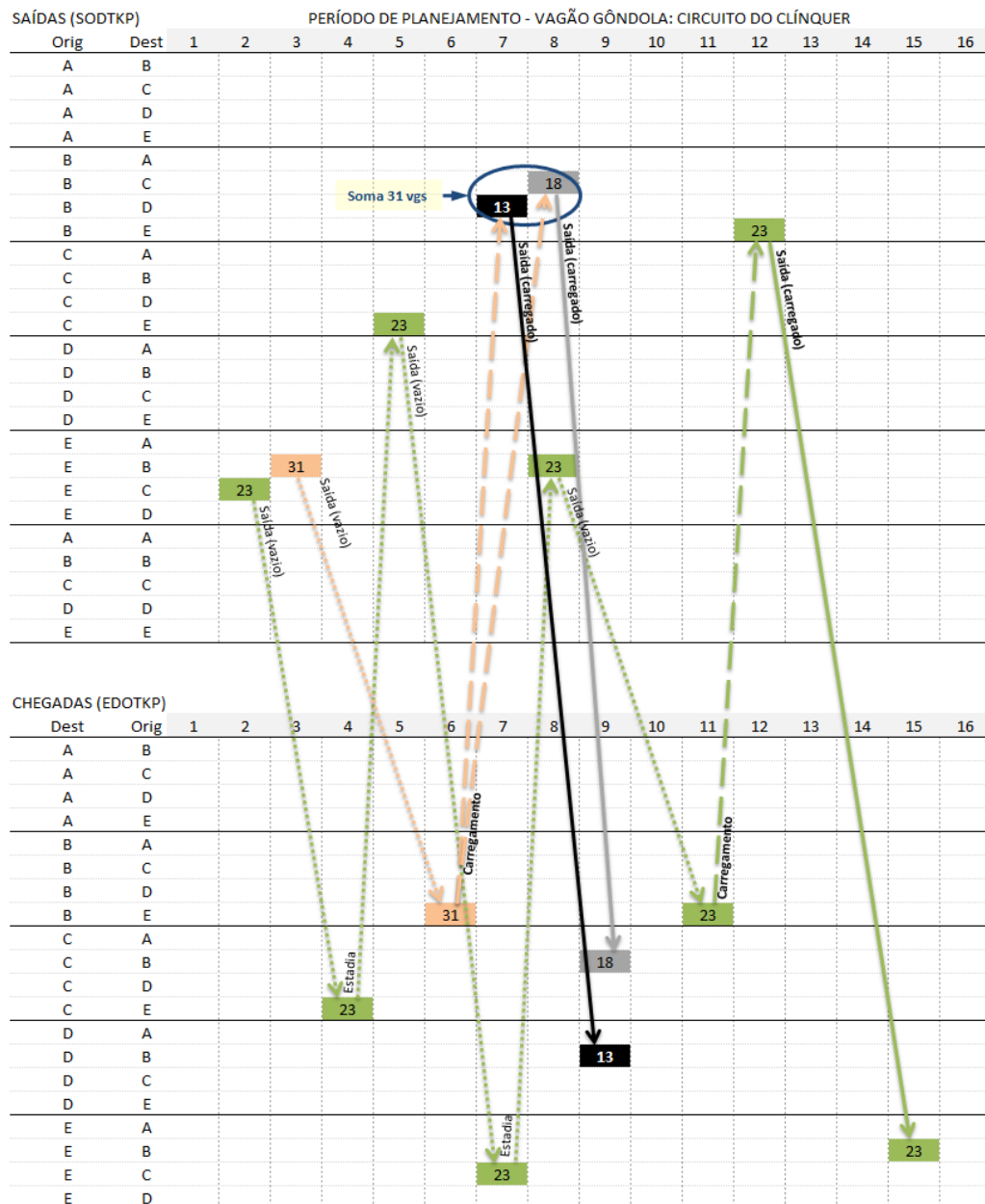


Figura 4.8: Plano do Modelo 1 para o vagão gôndola - circuito do clínquer.

O Modelo 2, cujo objetivo é minimizar a quantidade de viagens dos vagões, programou no dia 2, a saída de 31 gôndolas do pátio *E*, em número suficiente para uma única viagem para atender a demanda de *clínquer* destinada aos pátios *C* e *D*. O mesmo ocorreu no dia 9, para a saída das 23 gôndolas alocadas ao transporte da carga destinada ao terminal *E*. Este planejamento, em consonância com o objetivo ora estabelecido, aperfeiçoou a utilização da frota a fim de que atender a demanda com o menor número de viagens possível, eliminando deslocamentos desnecessários. É importante notar que as datas dos carregamentos realizados ocorreram dentro da data prevista.

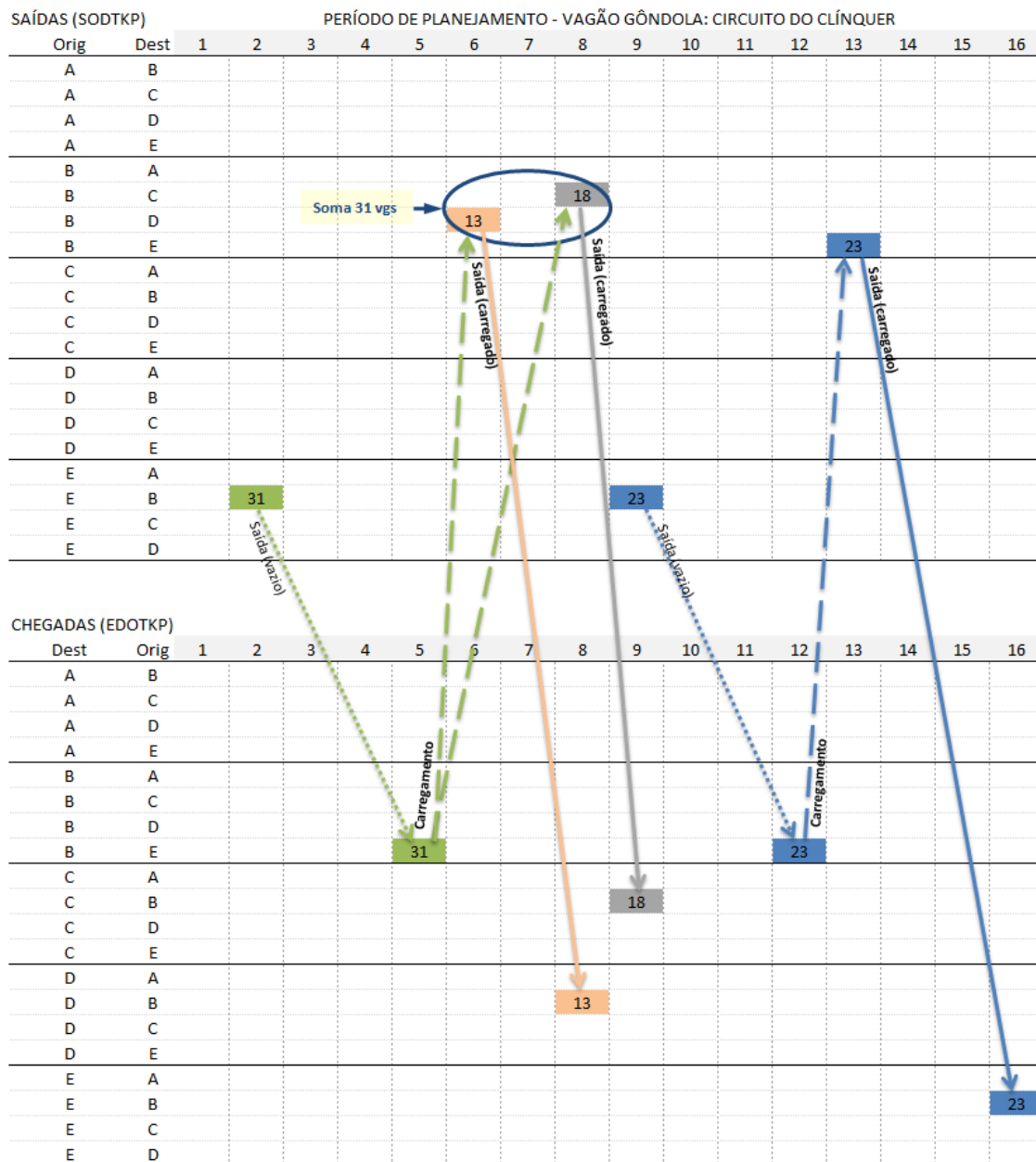


Figura 4.9: Plano gerado pelos Modelos 2 e 3 para o vagão gôndola - circuito do *clínquer*.

Estudando os deslocamentos gerados pelo Modelo 3, que tem por finalidade minimizar a quantidade de vagões vazios em circulação, constata-se que a solução apresentada pelo Modelo 3 foi rigorosamente a mesma obtida pelo Modelo 2 (Figura 4.9). Em outras palavras, a solução de se limitar o número de viagens dos vagões (de uma maneira geral) ou limitar o número de viagens dos vagões vazios foram simplesmente iguais.

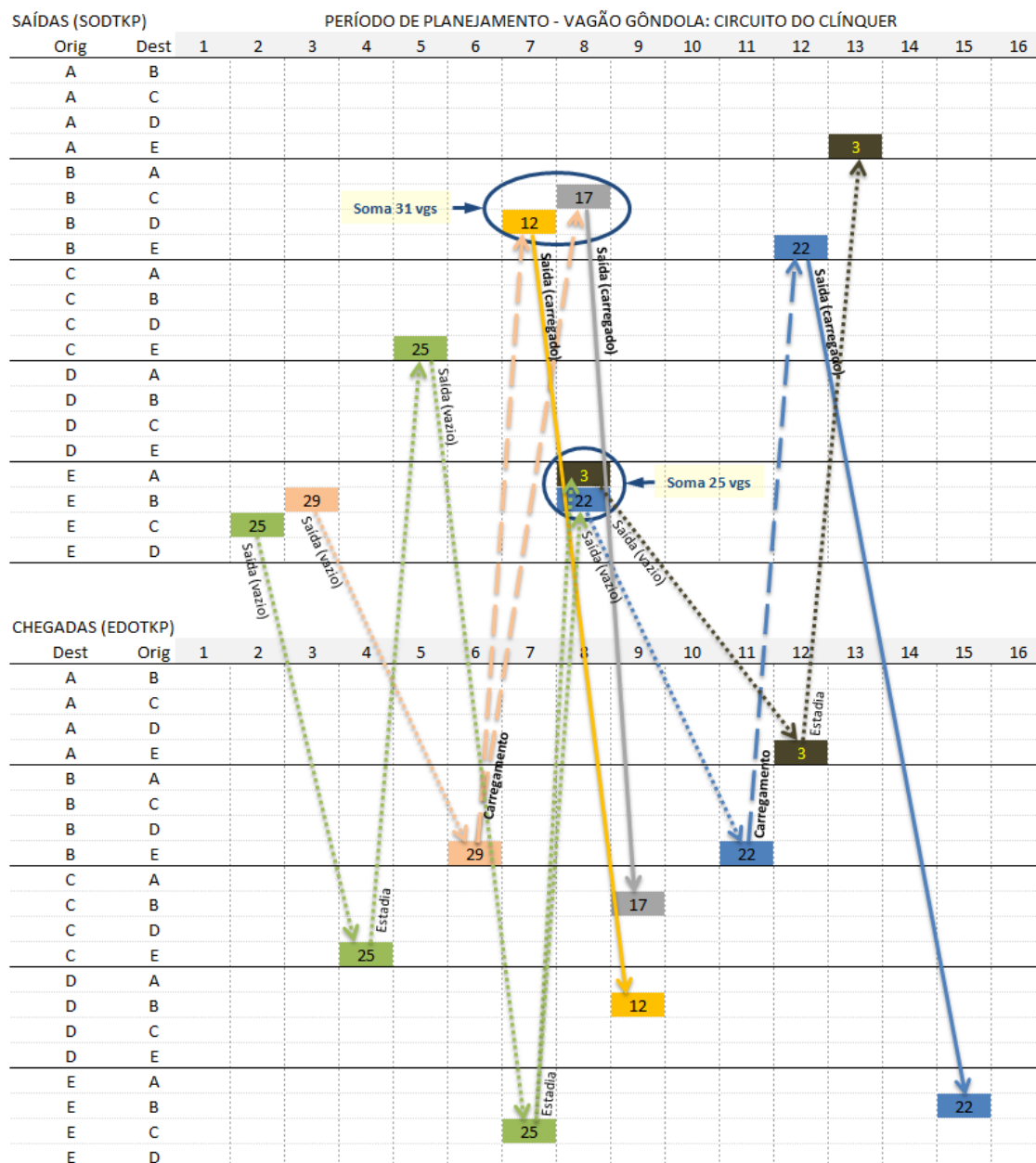


Figura 4.10: Plano do Modelo 4 para o vagão gôndola - circuito do *clínquer*.

Na Figura 4.10 é possível avaliar a distribuição dos vagões gerada pelo Modelo 4 (função 3.1d). Este modelo procura atender a demanda obtendo o maior lucro possível, observando os custos operacionais e de paralisação dos ativos.

Um fato intrigante, envolvendo a função objetivo (3.1d), está relacionado ao deslocamento de 25 vagões vazios que partiram do terminal *E*, no dia 2 direcionados para o pátio *C*, retornando ao terminal *E* no dia 7, de onde foram direcionados 3

gôndolas para o terminal *A* e os 22 restantes encaminhados ao pátio *B* para início de carregamento. Acredita-se que este caso esteja relacionado aos custos envolvidos, principalmente ao custo de paralisação, configurando um padrão de deslocamento similar ao obtido pelo Modelo 1. Conforme mencionado anteriormente, os valores destes custos foram assumidos como sendo 10% maior que o custo de operação, uma vez que este percentual representa o custo de imobilização da frota de vagões. Espera-se no entanto, que a inserção de dados reais na modelagem possa gerar resultados diferentes do obtido.

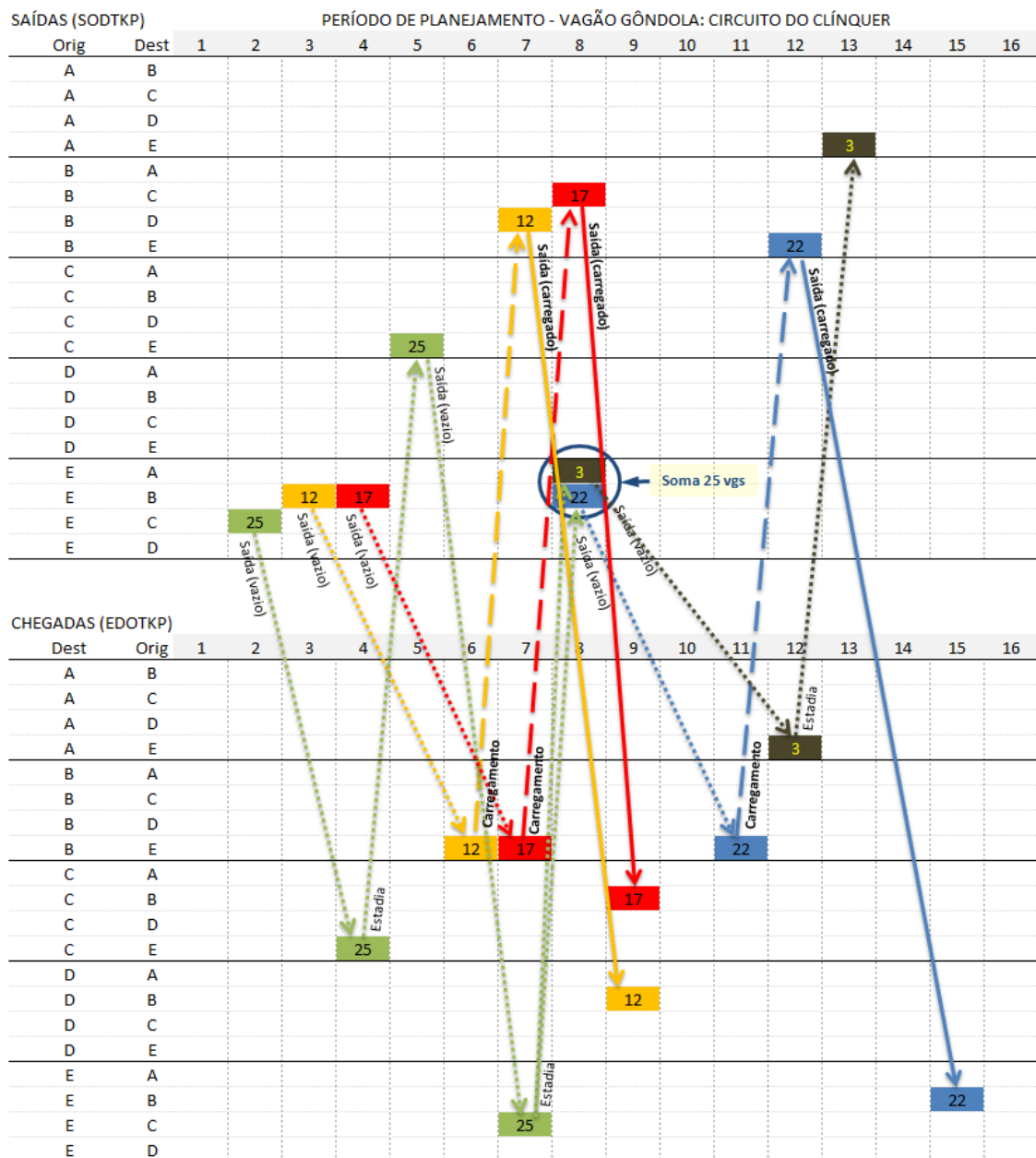


Figura 4.11: Plano do Modelo 5 para o vagão gôndola - circuito do *clínquer*.

Avaliando o planejamento efetuado pelo Modelo 5, para a minimização dos custos envolvidos, representado na Figura 4.11 é possível comprovar a saída de 25 vagões vazios do terminal *E* no dia 2, destinados ao pátio *C*, onde no dia 5, retornam ao terminal *E* no dia 7, que finalmente são direcionados 3 gôndolas para o terminal *A* e os 22 restantes encaminhados ao pátio *B* onde será efetuado o carregamento de *clínquer* destinado ao terminal *E*.

Analisando o padrão de deslocamentos dos vagões vazios obtido pelos Modelos 4 e 5, nota-se diferença relacionada à partida no dia 3, de 29 vagões destinados ao pátio *B* (Modelo 4) enquanto que no Modelo 5, este quantitativo foi distribuído nos dias 3 e 4 em quantidades iguais a 12 e 17 gôndolas. Portanto, julga-se que estes movimentos estão ligados aos custos de paralisação, que também são ponderados pelas funções objetivo (3.1d e 3.1e).

4.3.FROTA DE VAGÕES-PLATAFORMA

Nesta seção é mostrado o planejamento gerado pelos cinco modelos propostos em cumprimento à demanda do fluxo de gesso. O vagão adotado neste caso, é do tipo plataforma e o carregamento é realizado no terminal *C* e destinado ao pátio *B*, e aos terminais *A* e *E*, respectivamente conforme se verifica na Figura 4.12.

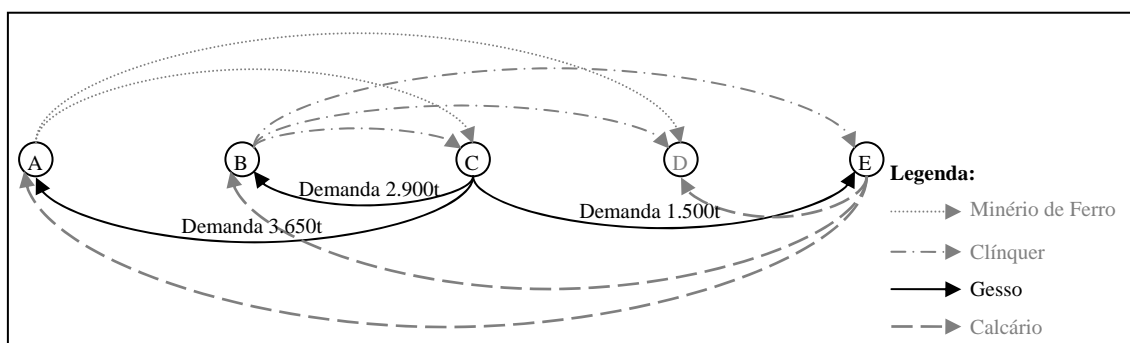


Figura 4.12: Fluxo de carga atendido pela frota de vagões plataforma.

A seguir, na Figura 4.13 é detalhado o planejamento da alocação dos vagões

plataforma para o atendimento do transporte de gesso.

Como era de se esperar, a função objetivo (3.1a) manteve em trânsito plataformas vazias em boa parte do horizonte de planejamento até o início dos carregamentos previstos para o 10º, 12º e 14º dias para as cargas destinadas a *A*, *B* e *E*. Este caso demonstra que o Modelo 1 atende plenamente ao propósito pelo qual foi desenvolvido. É interessante observar que a solução apresentada utiliza toda a frota de plataformas ou seja, todos 203 vagões, ocasionando um volume excedente de 2.100 toneladas de gesso (vide Figura 3.3). Este fato evidencia que há uma capacidade ociosa de 42 plataformas da frota e como o objetivo da modelo era evitar a ociosidade e em resposta à restrição (3.7a), estes vagões foram carregados provocando o transporte excedente de carga.

O Modelo 2, por sua vez, desenvolveu um planejamento enxuto, acatando satisfatoriamente a demanda do gesso. A estratégia está voltada à movimentação em número estritamente necessário ao transporte, ou seja, colocar 161 ativos em circulação destinados diretamente ao ponto de carregamento do produto (Figura 4.14). Neste momento cabe ressaltar que mais uma vez, a solução obtida pelo Modelo 2 foi rigorosamente idêntica à do Modelo 3.

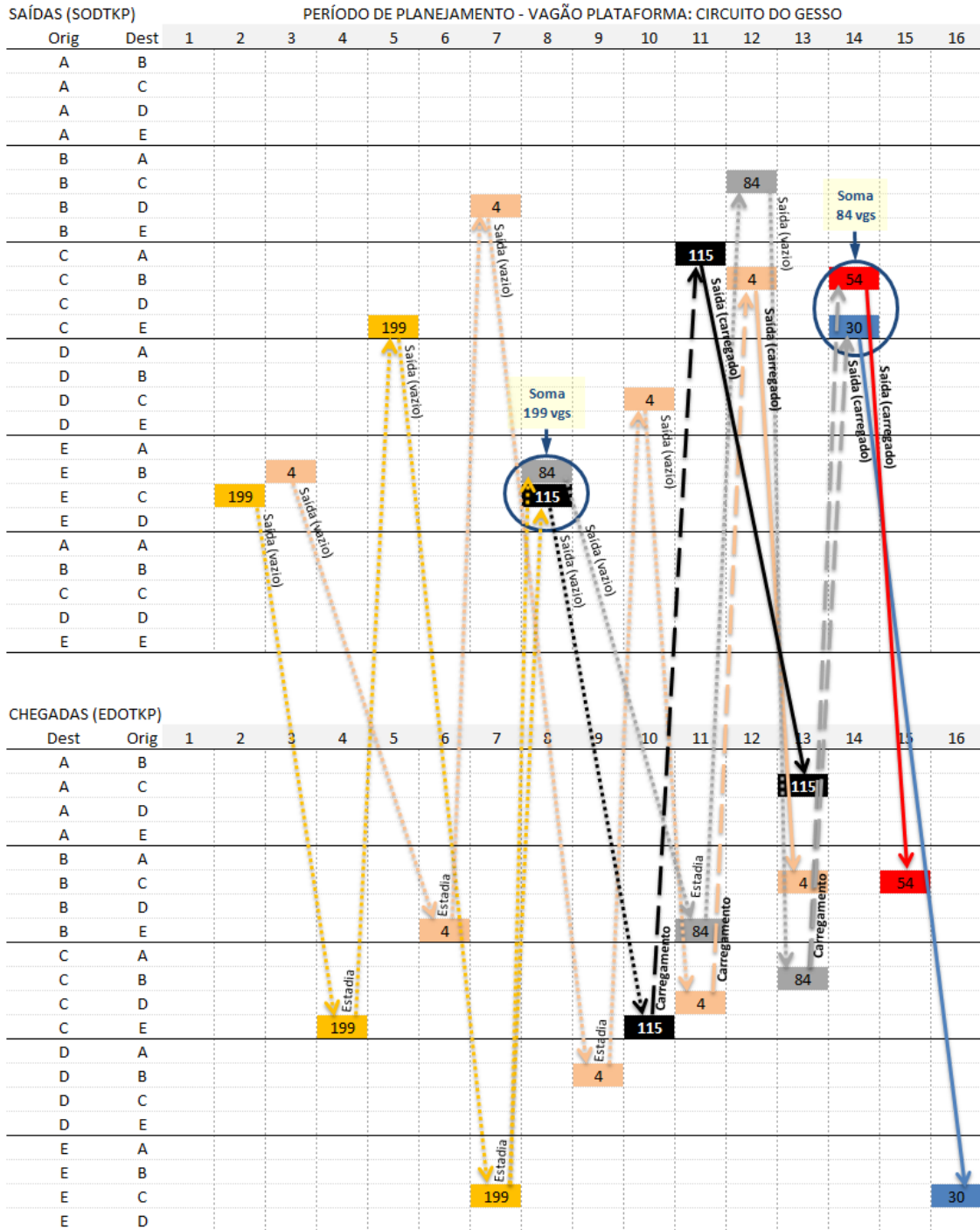


Figura 4.13: Plano do Modelo 1 para o vagão-plataforma - circuito do gesso.

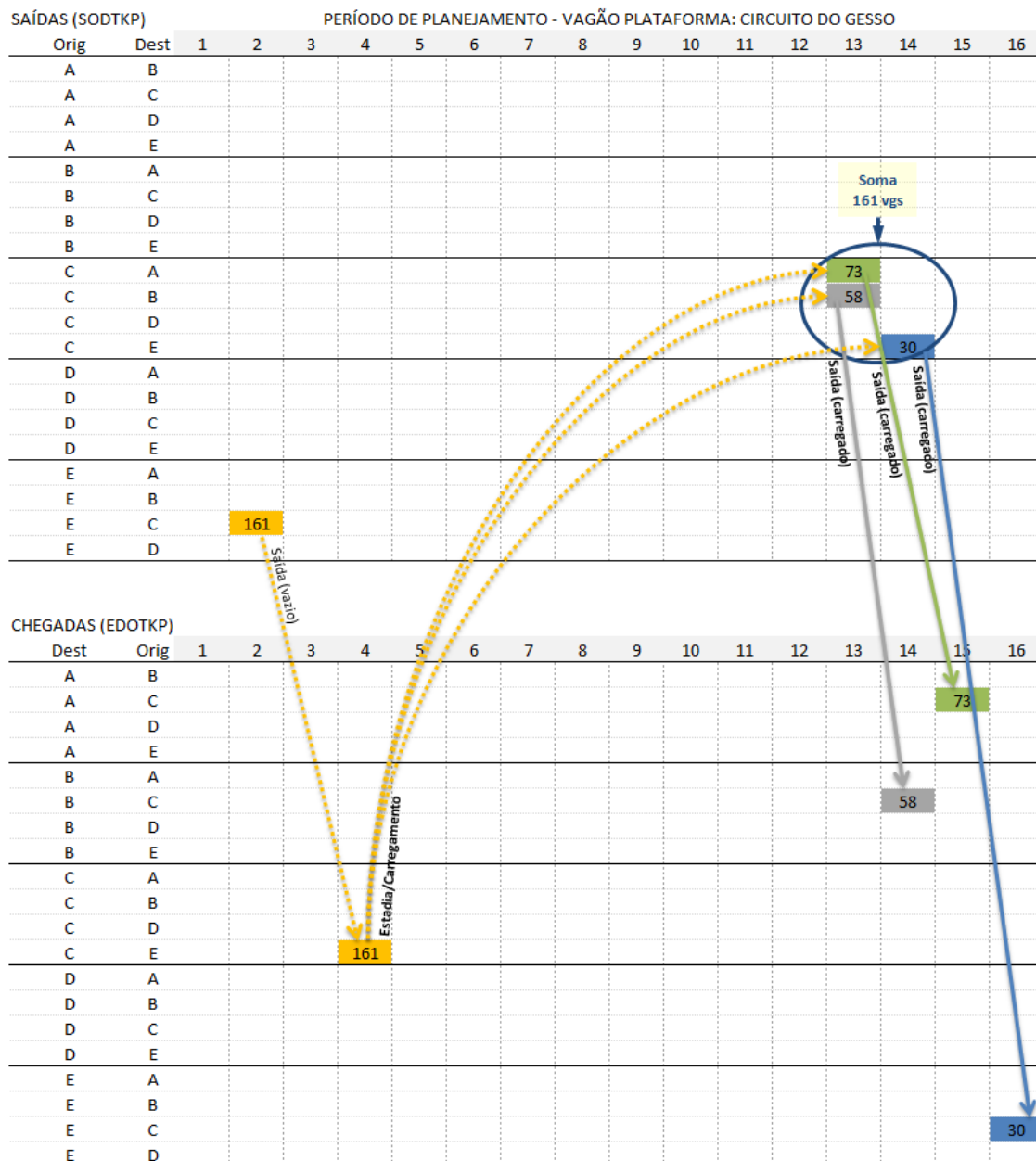


Figura 4.14: Plano gerado pelos Modelos 2 e 3 para o vagão-plataforma - circuito do gesso.

A Figura 4.15, traduz o poder do custo sobre o planejamento obtido pelos Modelos 4 e 5. Os resultados obtidos por estes modelos também foram idênticos, comprovando que o custo de paralisação exerceu uma forte influência sobre os deslocamentos dos vagões vazios, pois nestas funções, colocou-se em circulação toda a frota disponível, apesar de ser necessário apenas o carregamento de 161 plataformas no 11º, 12º e 14º dias.

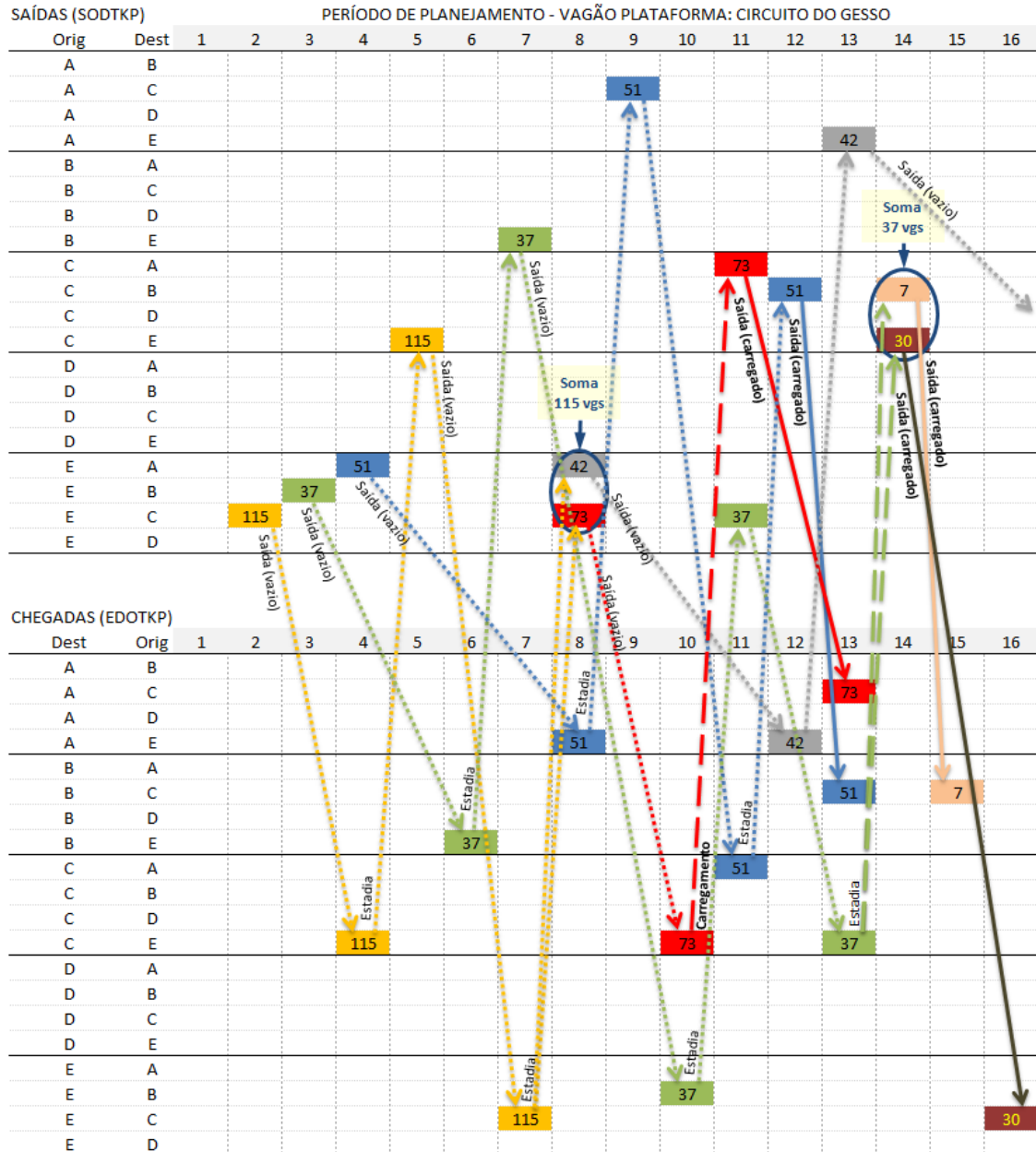


Figura 4.15: Plano gerado pelos Modelos 4 e 5 para o vagão-plataforma - circuito do gesso.

4.4. FROTA DE VAGÕES FECHADO

O vagão adotado neste caso, é do tipo fechado e o carregamento é realizado no terminal *E* e destinado aos pátios *B* e *D* e ao terminal *A* conforme se ilustra na Figura 4.16.

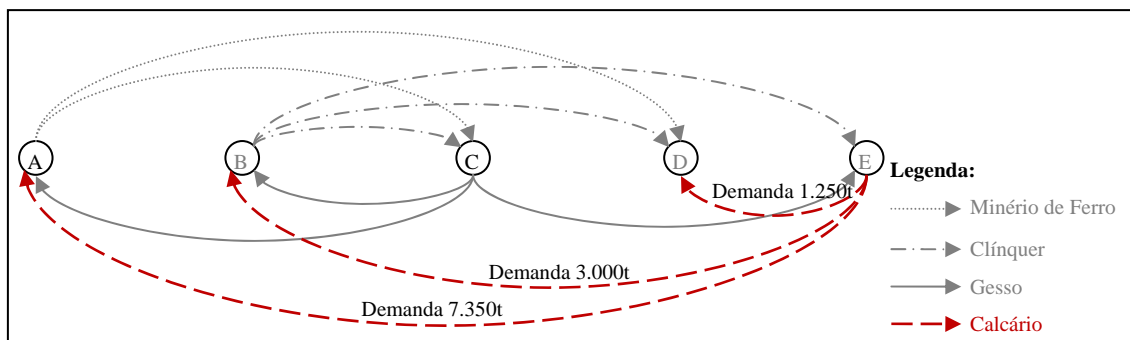


Figura 4.16: Fluxo de carga atendido pela frota de vagões fechado.

O planejamento detalhado da alocação dos vagões fechados obtido pela função objetivo (3.1a) é apresentado na Figura 4.17. O atendimento do transporte de calcário destinado ao terminal A teve início a partir do 9º dia, conforme estabelecido pelo programa de transporte. Os carregamentos destinados a B e D ocorreram nas datas definidas pela programação, ou seja, no 10º e 14º dia. Vale lembrar que de acordo com a definição do estado inicial do modelo, os vagões já se encontravam disponíveis em E desde o primeiro dia. Esta função manipulou 100% da frota de vagões fechados e manteve os vagões vazios em circulação durante boa parte do horizonte de planejamento, sendo designados 251 vagões para o transporte de calcário, número suficiente para movimentar 11.797 toneladas em programa de 11.600 toneladas. Este fato evidencia que há oportunidade para o aumento do volume programado das cargas que utilizam o vagão fechado, tendo em vista que 128 ativos não foram empregados no processo de carregamento.

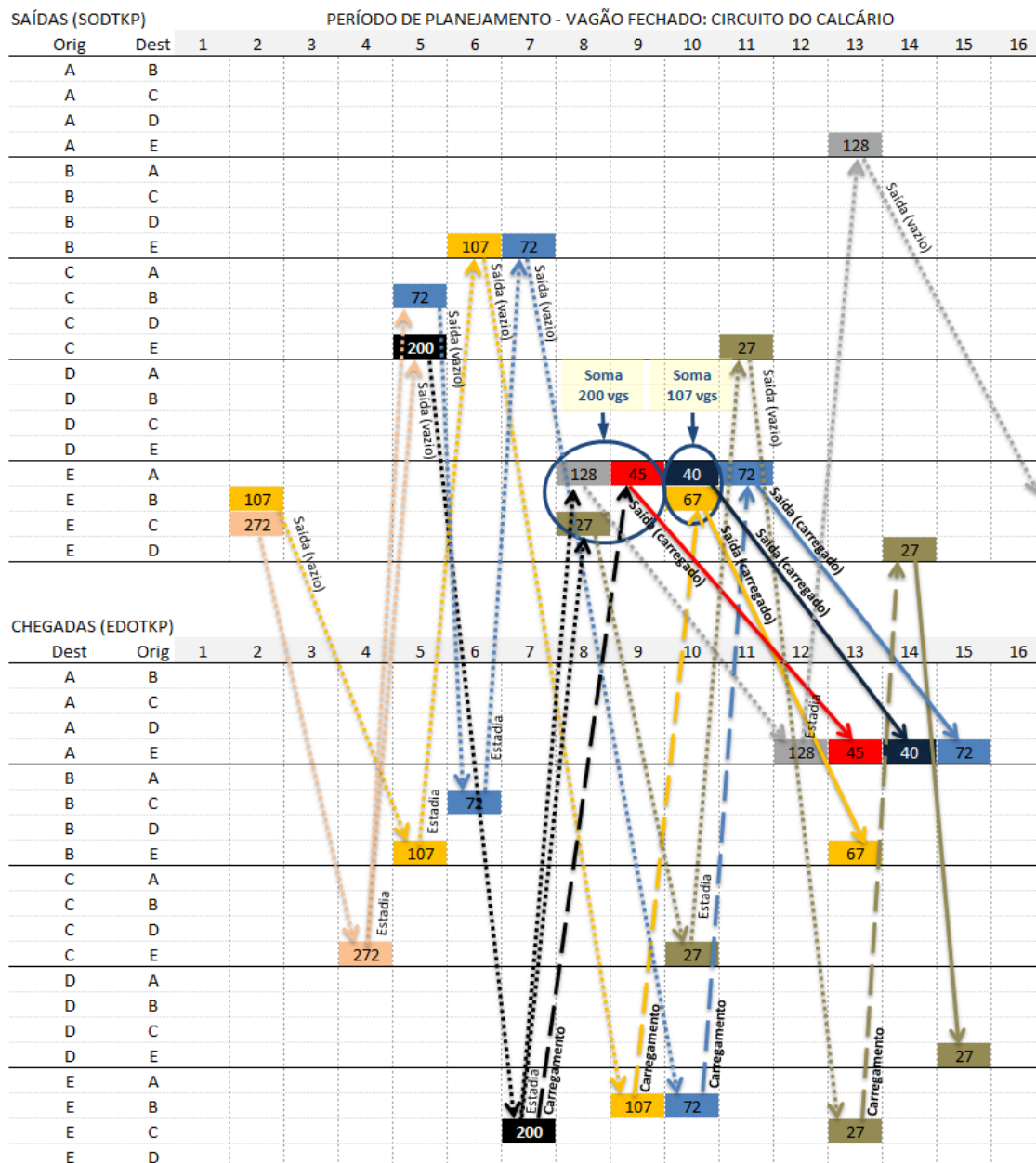


Figura 4.17: Plano do Modelo 1 para o vagão fechado - circuito do calcário.

O Modelo 2, visando minimizar a quantidade de viagens, empregou 248 vagões fechados, revelando uma frota ociosa ao deixar 131 vagões parados no pátio E (Figura 4.18). Este acontecimento mostra como a modelagem pode ser uma ferramenta útil durante o processo do planejamento ferroviário, oferecendo ao analista a oportunidade de conhecer em detalhes todas as limitações da ferrovia analisada, sendo possível ainda avaliar a proposição de metas de cumprimento dos tempos de retenção em pátios, tempos de deslocamento, número de vagões retidos para manutenção, necessidade do aumento da frota e até mesmo se o programa de transporte é factível diante das

premissas operacionais em vigor.

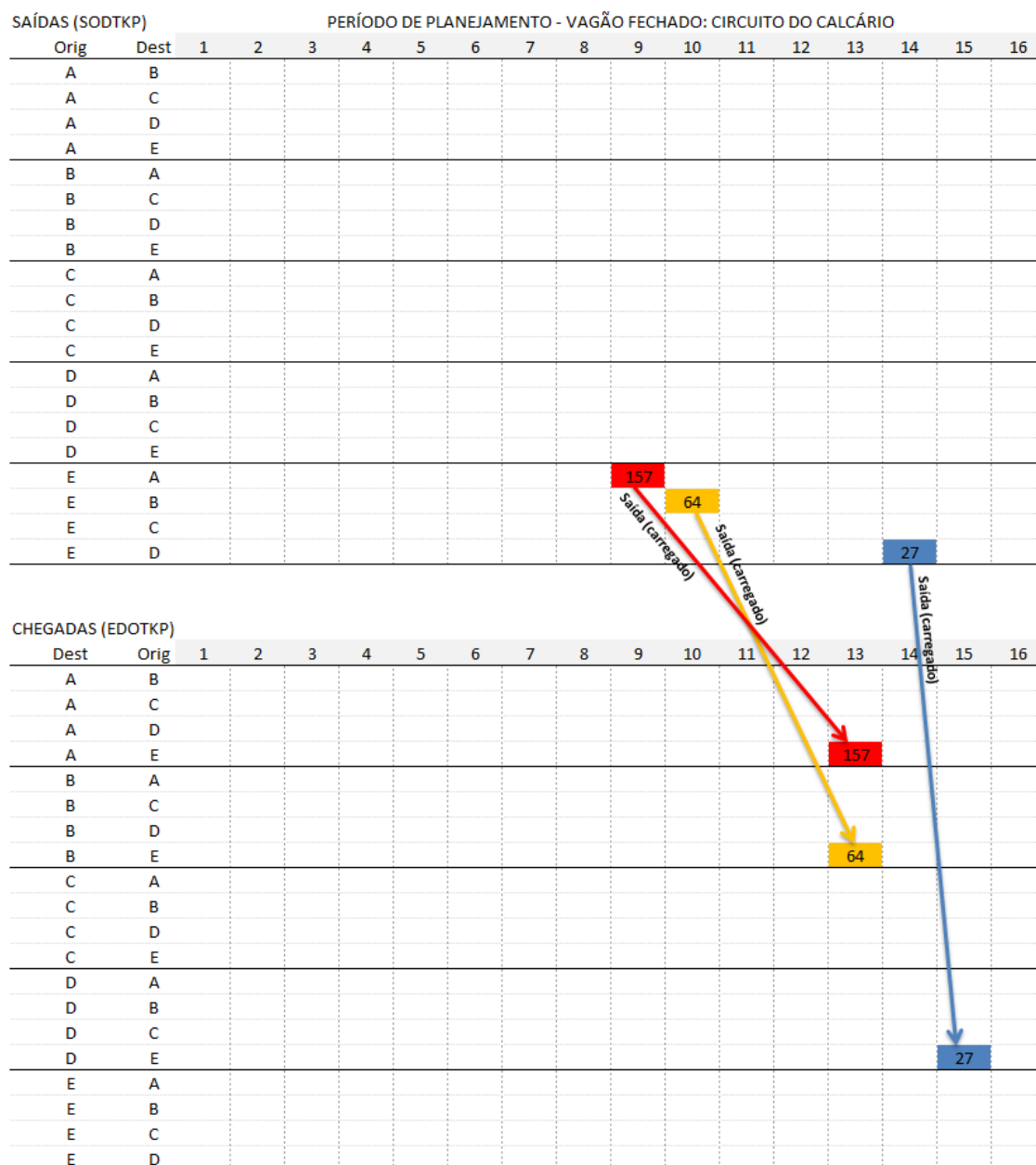


Figura 4.18: Plano do Modelo 2 para o vagão fechado - circuito do calcário.

O Modelo 3 foi o único que gerou um plano que resultou no transporte excedente de calcário. Este caso provavelmente, está relacionado à função objetivo (3.1c) que limita as viagens dos vagões vazios. Acredita-se que o resultado obtido seja uma resposta do modelo à inequação (3.7a) que programou carregar toda frota de fechados para eliminar a ocorrência de vagões vazios (Figura 4.19). Este feito implicou no transporte excedente de calcário, pois foram designados para o transporte os 131

vagões “ociosos” que foram evidenciados pela solução do Modelo 2.

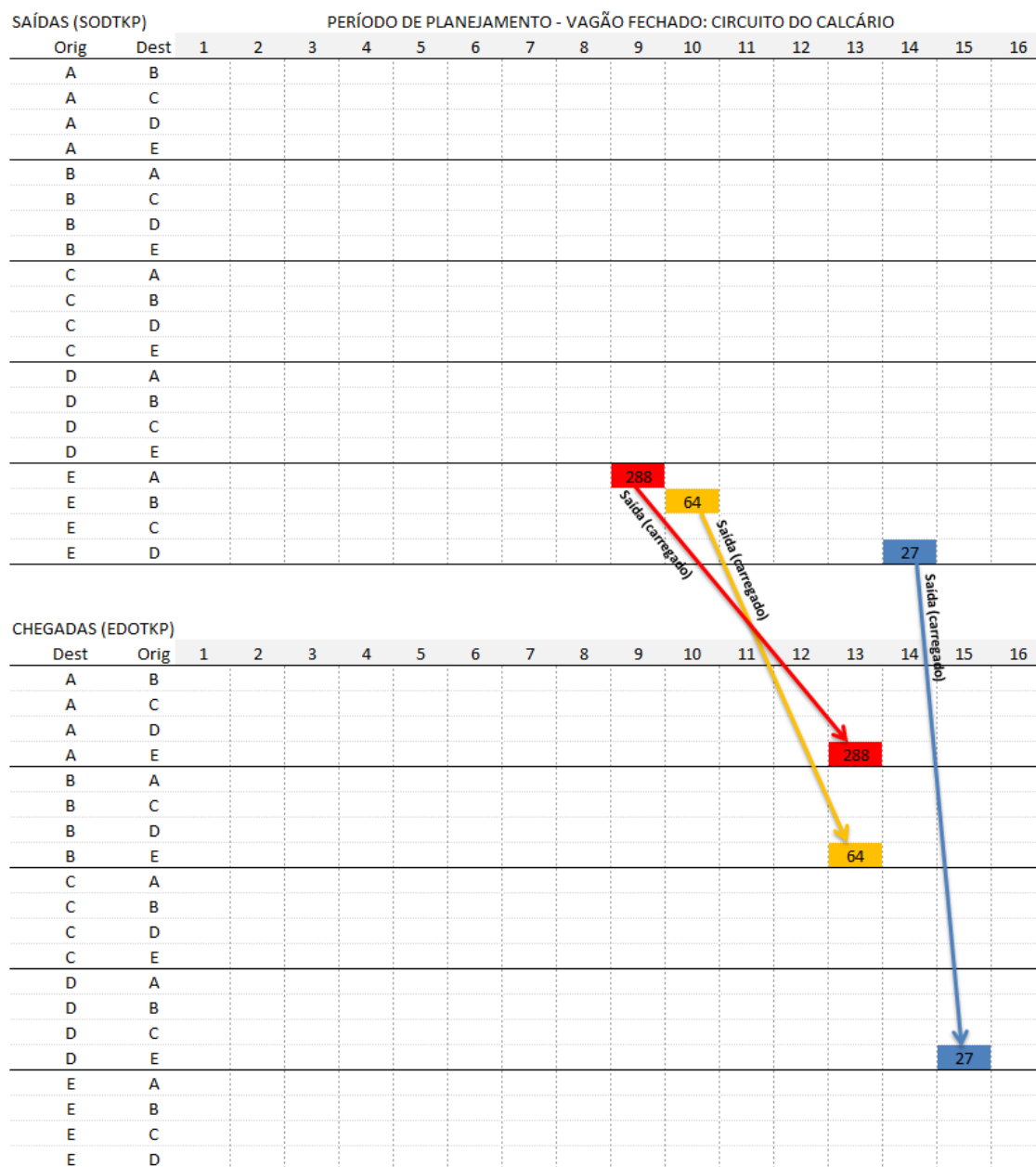


Figura 4.19: Plano do Modelo 3 para o vagão fechado - circuito do calcário.

A Figura 4.20, traz os deslocamentos considerados pelo Modelo 4. Nota-se que estes deslocamentos obedecem a mesma lógica dos planejamentos gerados por este modelo para o transporte do minério de ferro, *clínquer* e gesso. De acordo com as informações introduzidas na modelagem, o núcleo da solução está relacionado à manutenção da frota em movimento devido ao peso do custo de paralisação destes ativos sobre o lucro. Em outras palavras, o modelo encontrou uma solução ótima na

qual é mais interessante manter os vagões vazios em movimentos a tê-los parados afetando o lucro. Conforme mencionado anteriormente, este fato demonstra o quanto é importante a qualidade dos dados fornecidos ao modelo. Fica aqui, a recomendação de se obter dados de boa qualidade quando da implementação de um modelo matemático para solução de problemas reais.

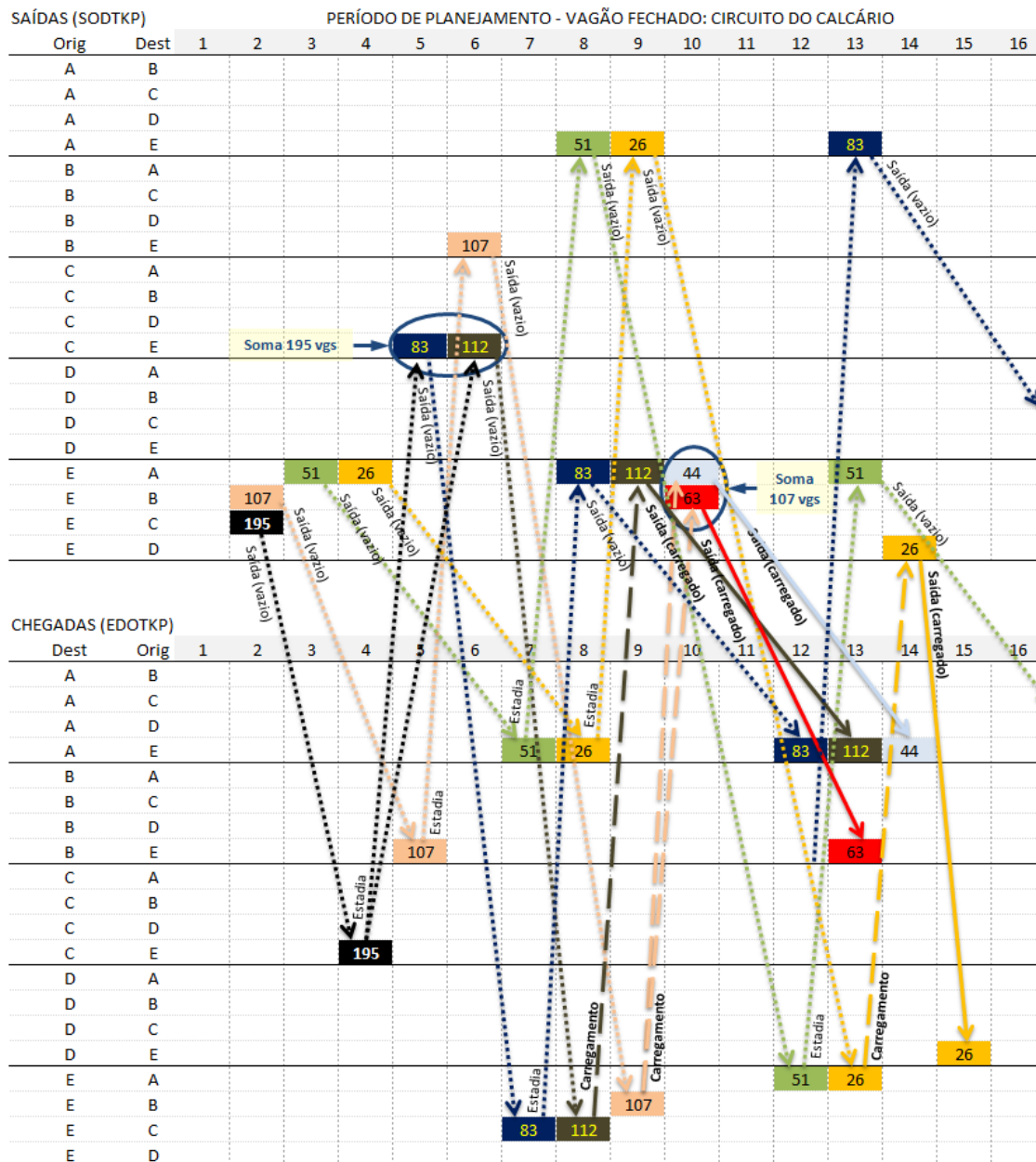


Figura 4.20: Plano gerado pelo Modelo 4 para o vagão fechado - circuito do calcário.

A diferença do planejamento realizado pelo Modelo 5 (Figura 4.21) em relação ao Modelo 4 (Figura 4.20) está concentrada na maneira em que foram estabelecidas as

saídas dos 195 vagões entre o 2º e 3º dia. No caso do Modelo 4, todos os 195 vagões foram direcionados de uma vez para o pátio C, enquanto no Modelo 5, os 195 ativos foram separados em grupos de 137 vagões (que partiram do terminal E no dia 2) e de 58 vagões (que foram postos em circulação no dia seguinte). Ambos os modelos manusearam os 379 ativos ou seja, a frota toda e ambos adotaram 245 para o carregamento do calcário.

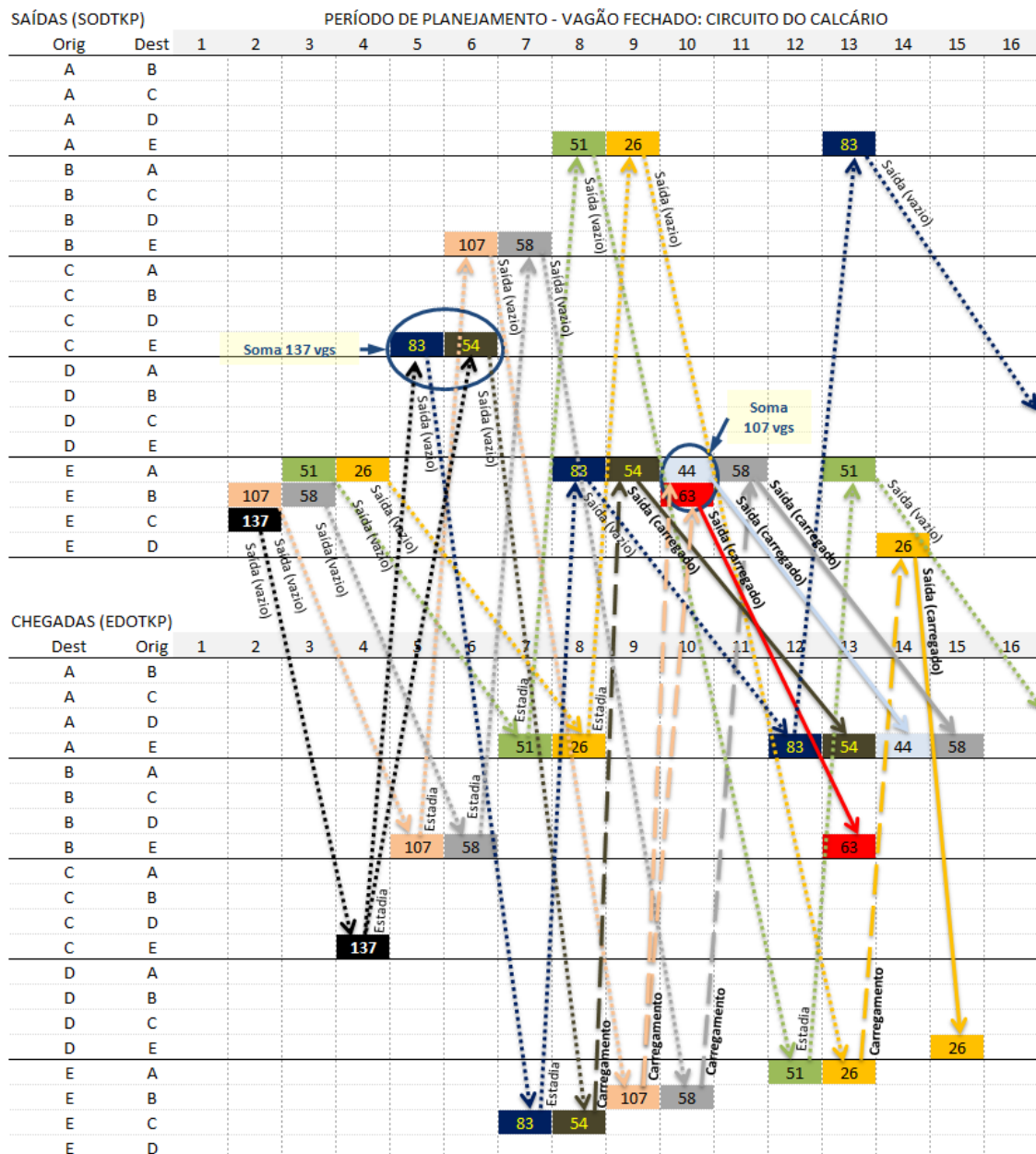


Figura 4.21: Plano gerado pelo Modelo 5 para o vagão fechado - circuito do calcário.

4.5. PLANEJAMENTO PARA UM HORIZONTE DE PLANEJAMENTO DE 30 DIAS

O objetivo deste item foi analisar os resultados obtidos pela modelagem matemática utilizando um horizonte de planejamento de 30 dias ou seja, 31 (trinta e um) dias. Para tanto, em relação ao volume de carga transportado no horizonte de 15 dias, foi imposto um acréscimo na ordem de 267% e 167% sobre o volume de minério de ferro e calcário, permanecendo inalterados para o restante dos produtos. Portanto, para o horizonte de 30 dias as toneladas adotadas foram 51.250t para o minério de ferro e 17.813t para o calcário. O propósito desta variação está concentrado na verificação da existência de fragilidade do planejamento tático em relação as variações na demanda e na interpretação do comportamento da modelagem matemática ante ao aumento na ordem de 94% do número de variáveis inteiras (passando de 38.700 para 75.000), e de 1.841 para 3.946 restrições ou seja, um aumento na ordem de 114%.

Tabela 4.1: Programação do transporte de carga considerada pelo Modelo.

Produto	Origem	Destino	Volume (t)	Data Início	Data Fim
Min.Ferro	A	C	26.750	4	30
Min.Ferro	A	D	24.500	6	30
Clínquer	B	C	800	8	30
Clínquer	B	D	550	5	30
Clínquer	B	E	1.000	12	30
Gesso	C	A	3.650	10	30
Gesso	C	B	2.900	12	30
Gesso	C	E	1.500	14	30
Calcário	E	A	6.016	9	30
Calcário	E	B	5.029	10	30
Calcário	E	D	6.768	14	30

Ficaram em média, as seguintes quantidades de vagões parados sem programação: 262 vagões no Modelo 1; 781 vagões no Modelo 2; 782 vagões no Modelo 3; e, 273 tanto nos Modelos 4 e 5. A Figura 4.22 a seguir, apresenta as quantidades médias de vagões parados obtidas pelos modelos. Ressalta-se aqui, que no Modelo 2, o objetivo é minimizar o número de vagões em circulação para atendimento

da demanda sendo por esta razão, o que obteve maior número de vagões retidos. Já nos Modelos 4 e 5 o quantitativo de vagões parados foi o mesmo, pois consideraram o aspecto econômico durante o planejamento.

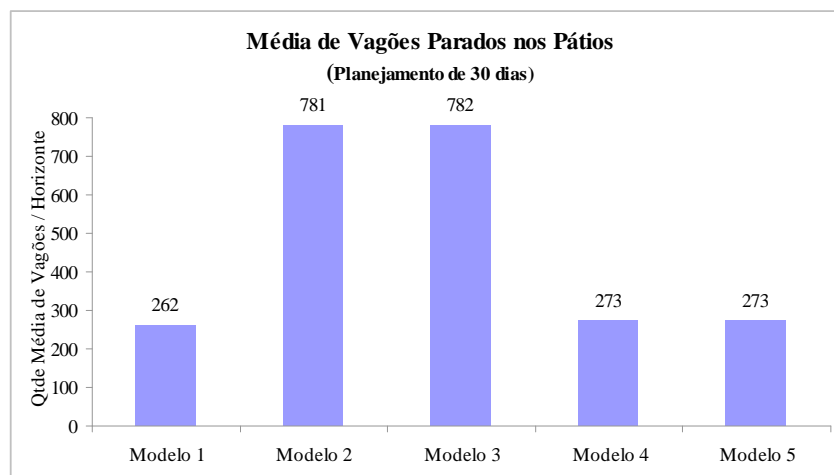


Figura 4.22: Quantidade de vagões alocados pelo Modelo para o transporte.

A Tabela 4.2 adiante, consolida os resultados alcançados pelos modelos, sendo possível comparar o número de carregamentos realizados e o respectivo volume transportado. Também é possível reparar que não houve distinção entre os resultados dos Modelos 1, 2 e 3 no entanto, houve divergência na ordem de 5,6%; 7,7% e 4,3%, em relação ao volume transportado de *clínquer* para os pátios *C*, *D* e *E*, quando comparado com o volume atendido pelos Modelos 4 e 5. Esta variação, conforme abordado no item 5.4 está relacionada aos fatores econômicos ponderados por estas duas últimas modelagens. A seguir, serão interpretados os resultados obtidos pelo Modelo 3 para o transporte de minério de ferro e pelo Modelo 4 no caso do transporte de calcário. Não se pretende fazer aqui, uma abordagem minuciosa dos deslocamentos gerados por cada um dos modelos propostos, mas apresentar os pontos relevantes advindos da análise da alteração de 16 para 31 dias no horizonte de planejamento.

Através da Figura 4.23 adiante, é possível verificar o resultado do planejamento criado pelo Modelo 3 para atender a demanda de minério de ferro. Esta solução programou saídas em número máximo de 128 *hoppers*, pois este acontecimento está relacionado à capacidade de movimentação do pátio de destino. No dia 23, a saída dos vagões está limitada a 12 *hoppers*, que serão somados aos 11 *hoppers* e se encontram no

pátio A (remanescentes do 22º dia), totalizando 23 vagões a serem carregados para conclusão da demanda de minério de ferro destinada ao pátio C.

Tabela 4.2: Transporte de carga obtido pelos Modelos para um plano de 30 dias.

Produto	Orig.	Dest.	Modelos 1, 2 e 3		Modelo 4		Modelo 5	
			Vgs Alloc.	Volume	Vgs Alloc.	Volume	Vgs Alloc.	Volume
Min.Ferro	A	C	535	26.750	535	26.750	535	26.750
Min.Ferro	A	D	490	2.4500	490	24.500	490	24.500
Clínquer	B	C	18	810	17	765	17	765
Clínquer	B	D	13	585	12	540	12	540
Clínquer	B	E	23	1.035	22	990	22	990
Gesso	C	A	73	3.650	73	3.650	73	3.650
Gesso	C	B	58	2.900	58	2.900	58	2.900
Gesso	C	E	30	1.500	30	1.500	30	1.500
Calcário	E	A	128	6.016	128	6.016	128	6.016
Calcário	E	B	107	5.029	107	5.029	107	5.029
Calcário	E	D	144	6.768	144	6.768	144	6.768

Analisando o planejamento efetuado pelo Modelo 3, na Figura 4.23 percebe-se que o tempo de permanência dos *hoppers* que chegaram em C, no 14º e 16º, foi de 3 dias e de 6 dias para os vagões que chegaram no 17º. Este fato está relacionado à capacidade do terminal A e ao tamanho da frota dos vagões *hoppers* (totalizam 384 unidades) contribuindo desta forma, para a elevação dos tempos de retenção no pátio C.

A Figura 4.24, traz os deslocamentos considerados pelo Modelo 4 para o cumprimento do programa de transporte do calcário. Devido à influência do custo de paralisação dos ativos sobre o lucro, a função objetivo (3.1d) manteve a frota em constante movimento. É importante destacar que no dia 22, houve a alocação de 4 vagões carregados destinados ao pátio B. Sob o ponto de vista econômico este tipo de planejamento deve ser evitado, pois essa quantidade de vagões não justifica a formação de um trem em virtude do volume carregado não conseguir diluir os custos fixos. No entanto, esta solução está consistente com o propósito do modelo analisado. Assim, observa-se uma oportunidade de melhoria futura do modelo desenvolvido por esta

dissertação com relação à consideração de alocações mínimas que possibilitam a formação de trens. Já no dia 23, dos 112 vagões que partiram de E para A , apenas 21 foram designados para carregar, pois este foi o número necessário para conclusão do programa de transporte de calcário.

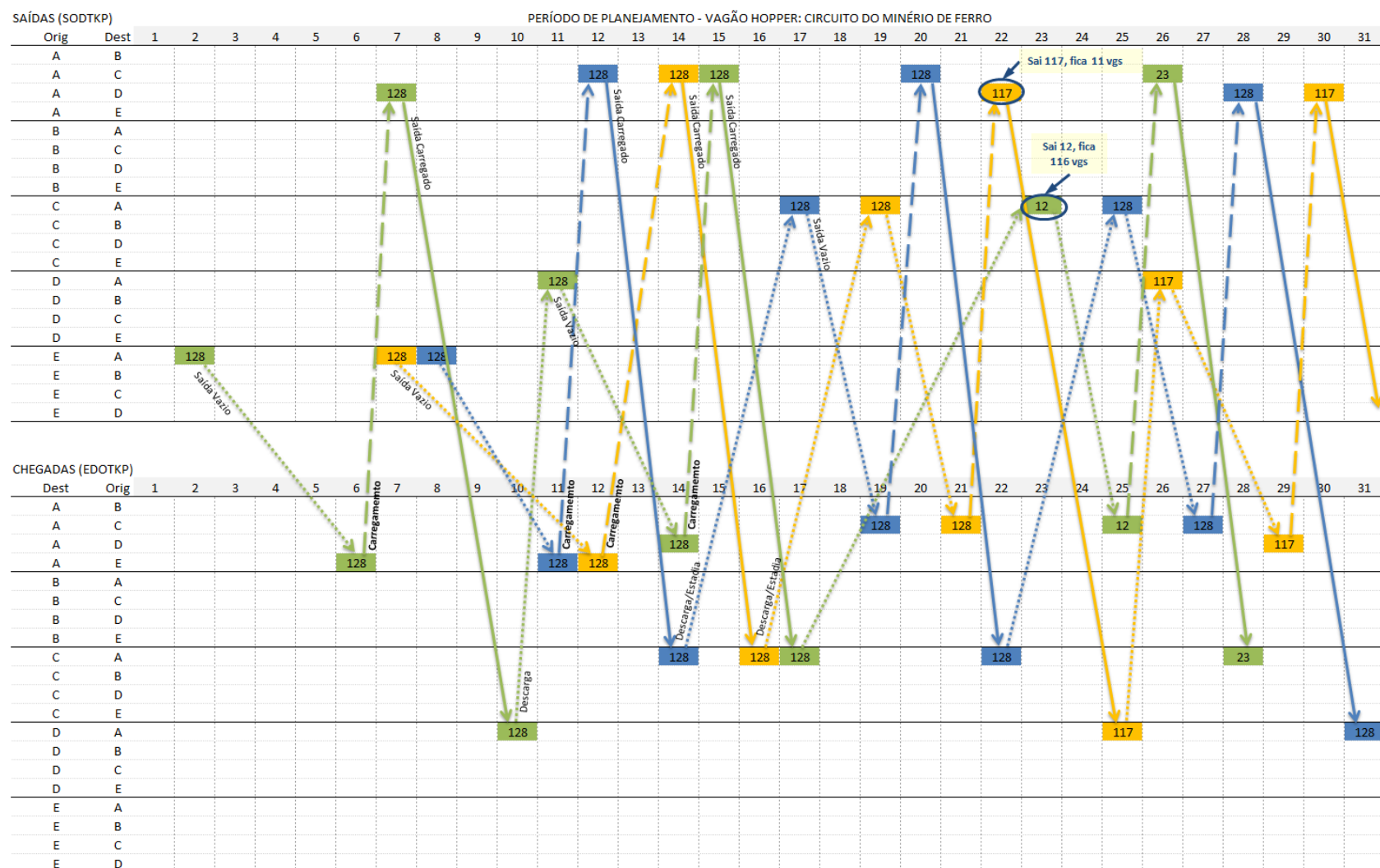


Figura 4.23: Plano do Modelo 3 para o vagão *hopper* - circuito do minério de ferro.

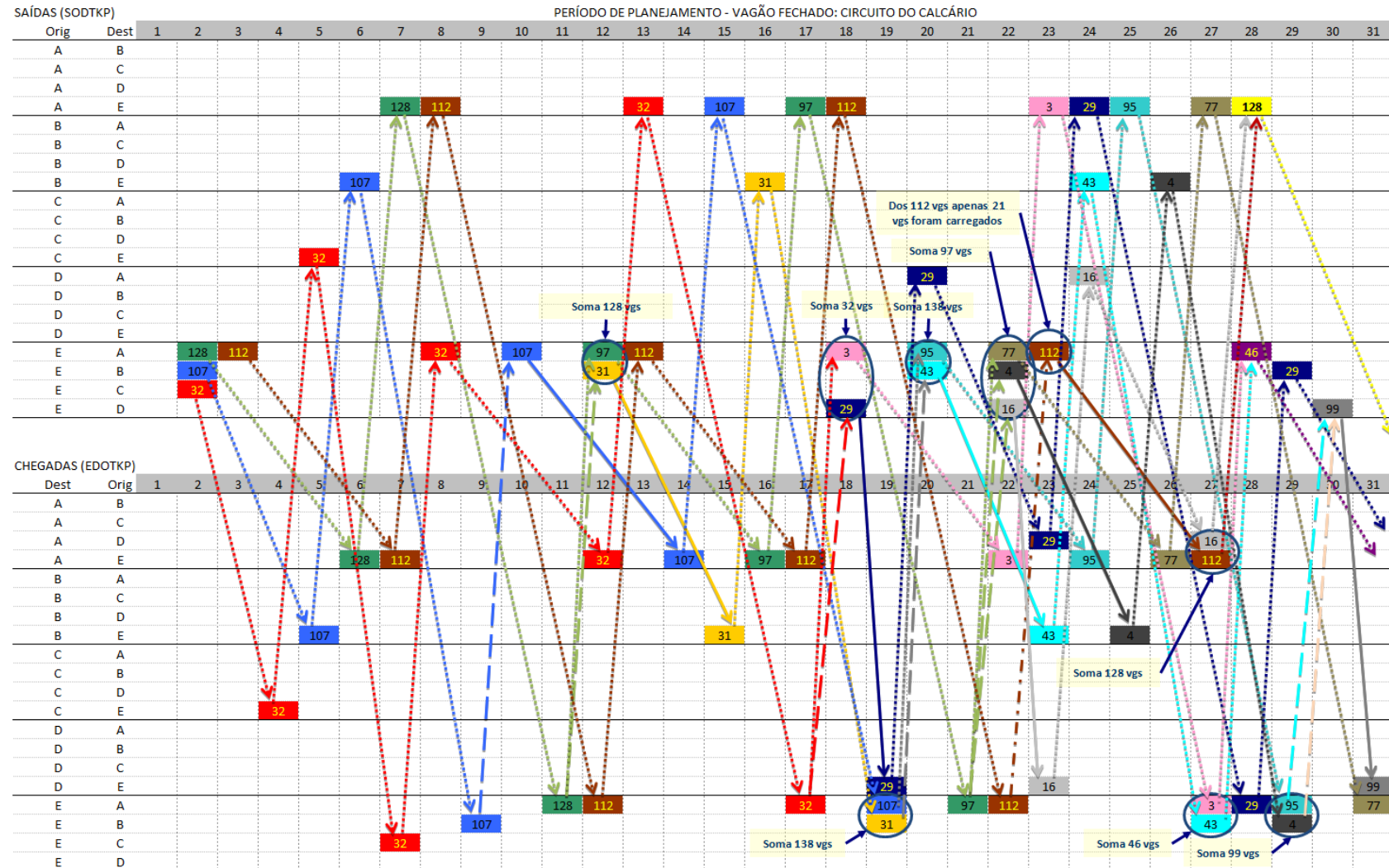


Figura 4.24: Plano do Modelo 4 para o vagão fechado - circuito do calcário.

Em termos de percentuais de utilização da disponibilidade, obteve-se: 74,3% da frota de vagões em operação no Modelo 1 (movimentos de atendimento à demanda e movimentos de vagões efetivamente vazios); 23,5% no Modelo 2; 23,3% no Modelo 3; e, 73,3% nos Modelos 4 e 5 respectivamente como mostra a Figura 4.25.

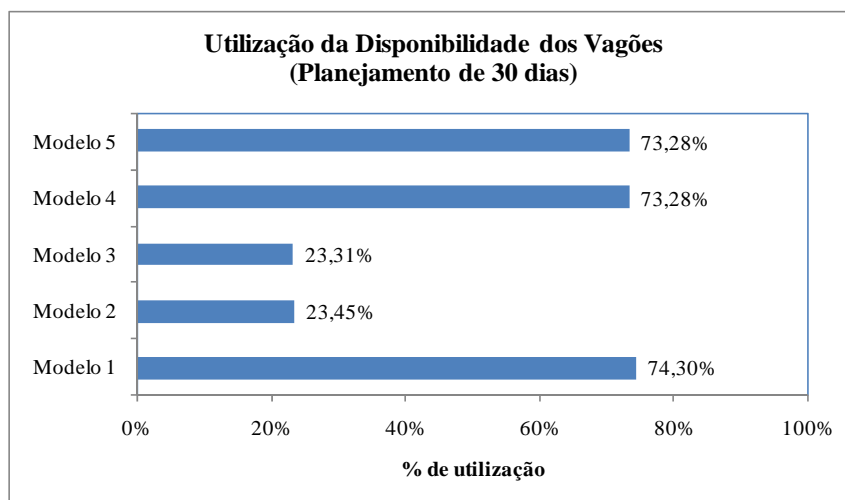


Figura 4.25: Utilização da disponibilidade dos vagões (planejamento de 30 dias).

Os baixos níveis de utilização dos vagões (23,45 e 23,31%), apresentado na Figura 4.25, estão relacionados à minimização de ativos vazios em circulação e à demanda por transporte prevista para o horizonte de planejamento (30 dias). Este resultado evidencia que a ferrovia possui uma capacidade ociosa (em função do cenário estudado) e oferece ao planejador a possibilidade de se avaliar a proposição de metas a serem alcançadas.

A Tabela 4.3, apresenta o tempo despendido por cada modelo, para o atendimento das demandas estudadas. Analisando um modelo por vez, verifica-se que os tempos de atendimento da demanda variaram em função da localização dos vagões, pois no 1º dia, toda frota de vagões encontrava-se estacionada no terminal *E*, havendo necessidade de deslocar os diferentes tipos vagões para os pátios com *déficit* para o atendimento da demanda em questão. Além disto, os volumes das mercadorias movimentadas e o tamanho da frota de cada tipo de vagão, por não serem iguais, contribuíram para a divergência no dia de conclusão do carregamento.

Avaliando as informações contidas nesta tabela, conclui-se que o Modelo 3

realizou um planejamento ágil conseguindo atender, no 26º dia, 100% da demanda de minério de ferro, destinada a *C*, enquanto que os Modelos 1, 4 e 5 levaram 30 dias para concluir o transporte; já o Modelo 2 precisou de 29 dias para atender 100% do volume demandado.

Com relação ao transporte do *clínquer*, os Modelos 4 e 5 se apresentaram mais rápidos no transporte para o pátio *E*. Estes modelos geraram um plano de tal maneira que a demanda foi 100% atendida no 12º dia, enquanto que o Modelo 2 conseguiu concluir o atendimento no 17º dia. Já o Modelo 3 veio a finalizar o carregamento no 22º dia enquanto que o Modelo 1, visando minimizar a quantidade de vagões parados, concluiu o carregamento de *clínquer* destinado a *E* no 29º dia.

Ao analisar o atendimento da demanda de gesso para o terminal *A*, verifica-se que o cumprimento do programa de carregamento foi alcançado no 11º dia pelos Modelos 1, 4 e 5, enquanto que os Modelos 2 e 3 finalizaram o carregamento no 30º.

No caso do atendimento da demanda de calcário para o pátio *D*, o Modelo 2 foi exceção ao concluir os carregamentos no 16º dia, enquanto que os Modelos 1 e 3 atenderam ao programa de carregamento no 27º dia, e os Modelos 4 e 5 realizaram o último carregamento no 30º dia.

O ambiente computacional utilizado foi o *software* Lingo 8.0 e o Excel 2007. O modelo executado para os dados acima, apresentou 75.000 variáveis inteiras, 3.946 restrições com tempos computacionais iguais a 14 segundos para o Modelo 1 (função objetivo 1a); 11 segundos para o Modelo 2 (função objetivo 1b) e Modelo 3 (função objetivo 1c), respectivamente; e 204 segundos para o Modelo 4 (função objetivo 1d) e 20 segundos para o Modelo 5 (função objetivo 1e). Dos cinco modelos apresentados, apenas os dois últimos adotaram algoritmo *Branch-and-Bound*, gerando 11.946 ramificações no processo de solução do Modelo 4 e 211 no caso do Modelo 5. A Tabela 4.4 abaixo, apresenta o resultado obtido pelos Modelos.

Tabela 4.4: Resultado alcançado pelos Modelos.

	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5
Variáveis inteiras	75.000	75.000	75.000	75.000	75.000
Número de restrições	3.946	3.946	3.946	3.946	3.946
Tempo computacional	14 seg	11 seg	11 seg	204 seg	20 seg
Ramificações <i>Branch&Bound</i>	-	-	-	11.946	211

Os modelos foram executados em *hardware* com processador AMD Turion 64 X2 1.90 GHz, 2 Gb de Memória RAM.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A relevância do problema do planejamento da distribuição do material rodante vem estimulando o desenvolvimento de vários estudos com o propósito de desenvolver modelagens matemáticas que proporcionem ganhos operacionais às ferrovias. Esta dissertação apresentou alguns trabalhos desenvolvidos, a partir de problemas vividos pelo setor ferroviário e as diferentes abordagens realizadas, tais como alocações individuais dos vagões; ponderação da capacidade da malha ferroviária; análise da influência das programações de manutenção do material rodante e da via permanente; consideração dos fluxos de carga, análises de problemas de formação das composições evidenciando-se que as estradas de ferro são terrenos férteis para o desenvolvimento de estudos voltados ao problema de planejamento.

5.1. CONCLUSÕES

A aplicação do Excel 2007, associado ao Lingo 8.0, revelou-se uma alternativa eficaz para a transferência de dados (entrada e saída) manipulados pelo Lingo 8.0 na solução de grandes problemas. Além disto, o Excel facilitou a organização da entrada dos dados, a compilação e visualização dos resultados obtidos.

A modelagem proposta considerou algumas questões operacionais como: tempo de percurso; permanência em pátio; frota, capacidade e tipos de vagões adotados; capacidade dos pátios; custos operacionais, etc., mas há de se convir que contemplar todos os detalhes seria uma tarefa extremamente difícil devido à complexidade relacionada ao controle, planejamento e operação de uma estrada de ferro. Assim, ao se dividir o problema global do planejamento da alocação dos vagões de carga em um problema suficientemente pequeno e estruturado proporcionou-se uma abordagem viável, facilitando a concepção de uma modelagem simples, de fácil execução e capaz de chegar rapidamente ao ótimo.

Os resultados obtidos através dos modelos propostos, e os baixíssimos tempos despendidos para a obtenção das soluções ótimas, demonstram que a proposta da alocação dos vagões em certas quantidades, pode conferir agilidade ao processo de resolução do problema e que a aplicação destes modelos não está limitada à esfera acadêmica, podendo ser adotados na prática, como uma ferramenta computacional de planejamento ferroviário. No entanto, uma abordagem que engloba alocações individuais envolve programação linear binária e pode atingir tempos computacionais exponenciais.

Apesar das limitações apresentadas, os modelos são úteis, pois proporcionam análise e suporte ao planejamento realizado, oferecendo ao analista a oportunidade de conhecer em detalhe (em um nível tático e operacional) as dificuldades enfrentadas pela ferrovia, bem como avaliar a proposição de metas de cumprimento dos tempos de retenção em pátios, tempos de deslocamento, número de vagões retidos para manutenção, necessidade do aumento da frota e até mesmo, a rentabilidade das demandas ou a viabilidade de execução do programa de transporte diante das premissas operacionais em vigor.

5.2. RECOMENDAÇÕES DE CAMINHOS PARA O APRIMORAMENTO DA PROGRAMAÇÃO DOS RECURSOS FERROVIÁRIOS

Em função dos resultados apresentados pelos modelos anteriormente abordados, novas considerações deverão ser desenvolvidas nos modelos futuros entre as quais destacamos: capacidade diária de formação de trens nos terminais; programação de partida dos vagões das estações em função das dimensões mínima e máxima das composições e problemas de formação das composições (blocagem de vagões). Tais considerações beneficiam o modelo em relação à economia de escala, ou seja, o atendimento das demandas será distribuído de forma mais adequada e econômica ao longo do horizonte de planejamento.

Outro aspecto relevante a ser considerado para melhoria dos modelos é

ponderação das restrições dos arcos entre os pátios ou seja, a modelagem deve ser capaz de considerar restrições relacionadas aos aspectos da infra-estrutura ferroviária, tais como: rampa máxima do trecho, quebras de perfil (locais onde há mudança da capacidade dos trechos) e TBC - Tonelada Bruta Compensada durante o desenvolvimento da solução para o atendimento das demandas.

Conforme comentado no decorrer desta obra, é sabido que os modelos desenvolvidos apresentam limitações. O problema tratado não considera a capacidade de formação de trens nos terminais, nem estabelece condições para programar as movimentações dos vagões em função das dimensões mínima e máxima dos trens. Restrições relativas às capacidades dos trechos da malha e questões relativas à blocagem de vagões não são consideradas. Além disto, a modelagem proposta não contempla problemas relacionados à frota de material de tração. Neste sentido, é desejável o desenvolvimento de trabalhos futuros que complementem a abordagem desenvolvida, pois contribuem para o aumento da eficiência e do aproveitamento dos recursos ferroviários.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANTF – Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários (2004) *150 anos de Ferrovia no Brasil*. Edição comemorativa dos 150 anos de ferrovia no Brasil., Rio de Janeiro.
- ALFIERI, A., GROOT, R., KROON, L.G., SCHRIJVER, A. (2006) Efficient Circulation of Railway Rolling Stock. *Transportation Science*. n. 40, v. 3, p. 378-391.
- ALVARENGA, A. C. e NOVAES, A. G. N. (2001) *Logística Aplicada: Suprimento e Distribuição Física*. Ed. Pioneira, São Paulo.
- BALLOU, R. H. (2006) *Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos/Logística Empresarial*. Ed. Bookman, Porto Alegre.
- BARR, R. S.; GOLDEN, B. L., KELLY, J. P.; RESENDE, M. G. C. e STEWART JR., W. R. (1995) Designing and Reporting on Computational Experiments with Heuristic Methods. *Journal of Heuristics*, v. 1, n. 1, p. 9-32.
- BORBA, J. L. (2001) Pós-graduação em Engenharia Ferroviária, Módulo Material de Tração. PUC - Minas/IEC - Instituto de Educação Continuada, Belo Horizonte.
- BRINA, H. L. (1983) *Estradas de Ferro, Volume 1: Via Permanente*. Ed. Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro.
- CAMPOS, V. F. (1996) *Gerenciamento pelas Diretrizes*. Ed. Desenvolvimento Gerencial, Belo Horizonte.
- COOTNER, P. H. (1963) The Role of the Railroads in United States Economic Growth. *The Journal of Economic History*, v. 23, n. 4, p. 477-521.
- CORDEAU, J.F.; TOTH, P.; VIGO, D. (1998) A survey of optimization models for train routing and scheduling. *Transportation Science*. n. 32, v. 4, p. 380-404.
- CASTRO, N. e LAMY, P. A (1994) Reforma e a Modernização do Setor de Transporte Ferroviário de Carga. Ipea, São Paulo.
- COSTA, E. V. (1966) *Da Colônia à Senzala*. Ed. Difel, São Paulo.
- CRAINIC, T. G. (2003) Long-Haul Freight Transportation. In: HALL, R. W. (ed.). *Handbook of Transportation Science*. Ed. Springer, Boston.
- DEJAX, P. J., CRAINIC, T. G. (1987) A review of empty flows and fleet management models in freight transportation. *Transportation Science*. n. 21, v. 4, p. 227-247.
- DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes (2007) *Histórico. A Primeira Ferrovia do Brasil* Disponível em: <<http://www1.dnit.gov.br/ferrovias/historico.asp>>. Data de acesso: 31 de agosto de 2007.

- FLEURY, P. C. (2000) Logística Integrada. In: FLEURY, P. F.; WANKE, P. e FIGUEIREDO, K. F. (eds.). *Logística Empresarial: a Perspectiva Brasileira*. Ed. Atlas, São Paulo.
- FUKASAWA, R. (2002) *Resolução de Problemas de Logística Ferroviária Utilizando Programação Inteira*. Dissertação Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica. Rio de Janeiro.
- GARRISON, W. L. e LEVINSON, M. D. (2006) *The Transportation Experience - Policy, Planning, Deployment*. Ed. Oxford, Nova Iorque.
- HAGHANI, A. E. (1989) Formulation and solution of combined train routing and makeup, and empty car distribution model. *Transportation Research - Part B*. n. 23, v. 6, p. 433-452.
- HOLMBERG, K.; JOBORN, M.; LUNDGREN, J. T. (1998) Improved empty freight car distribution. *Transportation Science*. n.32, v. 2, p. 163-173.
- JOBORN, M.; CRAINIC, T. G.; GENDREAU, M.; HOLMBERG, K.; LUNDGREN J. T. (2004) Economies of Scale in Empty Freight Car Distribution in Scheduled Railways. *Transportation Science*, v. 38, n. 2, p. 121-134.
- MARÓTI, G. (2006) *Operations Research Models for Railway Rolling Stock Planning*. Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven.
- MARTINS, R. S. e CAIXETA FILHO, J. V. (2001) Evolução Histórica da Gestão Logística do Transporte de Cargas. In: MARTINS, R. S. e CAIXETA-FILHO, J. V. (eds.) *Gestão Logística do Transporte de Cargas*. Ed. Atlas, São Paulo.
- MOREIRA, D. A. (1996) *Administração da Produção e Operações*. Ed. Pioneira. São Paulo.
- PEETERS, M. e KROON, L. (2008) Circulation of railway rolling stock: a branch-and-price approach. *Computers & Operations Research*, v.35, p. 538 - 556.
- PEGDEN, C. D.; SHANNON, R. E.; SADOWSKI, R.P. (1995) *Introduction to simulation using SIMAN*. Ed. McGraw-Hill, New York.
- PNLT (2007) Plano Nacional de Logística e Transportes. Ministério dos Transportes, Ministério da Defesa, Brasília, DF.
- POWELL, W. B.; CARVALHO, T. A.; (1998a) Dynamic control of logistics queueing networks for large-scale fleet management. *Transportation Science*. n. 32, v. 2, p. 90-109.
- POWELL, W. B.; CARVALHO, T. A. (1998b) Real-time optimization of containers and flatcars for intermodal operations. *Transportation Science*. n. 32, v. 2, p. 110-126.

RAMOS, G. M. (2003) *Análise Prospectiva da Capacidade de Processamento de Cargas pela Ferrovia no Porto de Santos*. Dissertação Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Paulo.

SOBRAPO - Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional (2007) Pesquisa Operacional Disponível em: <<http://www.sobrapo.org.br/sitesobrapo.htm>>. Data de acesso: 01 de outubro de 2007.

LISBOA, E. F. A. (2008) Pesquisa Operacional Disponível em: <<http://www.ericolisboa.eng.br/cursos/apostilas/po/index.htm>>. Data de acesso: 13 de agosto de 2008.