UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
Área de Concentração Transportes

ANDRESSA LOUREIRO MORETTO BARROS

MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA DISTRIBUIÇÃO HORÁRIA DE LOTES DE VAGÕES FERROVIÁRIOS GDE PARA CARREGAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO

VITÓRIA
2010

ANDRESSA LOUREIRO MORETTO BARROS

MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA DISTRIBUIÇÃO HORÁRIA DE LOTES DE VAGÕES FERROVIÁRIOS GDE PARA CARREGAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração Transportes.

Orientador: Profª Drª Marta Monteiro da Costa Cruz

VITÓRIA

2010

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

B277m

Barros, Andressa Loureiro Moretto, 1973-
Modelo de otimização para distribuição horária de lotes de vagões ferroviários GDE para carregamento de minério de ferro / Andressa Loureiro Moretto Barros. – 2010.
106 f. : il.

Orientadora: Marta Monteiro da Costa Cruz.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Ferrovias. 2. Transporte ferroviário de carga - Vagões. 3. Cargas e descargas. 4. Programação inteira. I. Cruz, Marta Monteiro da Costa. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 624

MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA DISTRIBUIÇÃO HORÁRIA DE LOTES DE VAGÕES FERROVIÁRIOS GDE PARA CARREGAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO

Andressa Loureiro Moretto Barros

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.
Aprovada em 03/03/2010 por:

Profª Drª Marta Monteiro da Costa Cruz
Doutora em Engenharia de Transportes
Deptº Eng. Produção / UFES
Orientadora

Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa
Doutor em Engenharia Elétrica
Coordenadoria de Ferrovias / IFES
Examinador Externo

Prof. Dr. Marco Antônio Farah Caldas
Doutor em Logística e Planejamento de Transporte
Deptº Eng. Produção / UFF
Examinador Externo

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
Vitória – ES, março de 2010

Agradecimentos

A Deus por ter me concedido a dádiva da vida e por sempre guiar meu caminho.

A meus pais Graciano e Iracilda pelo exemplo de vida e pelo incentivo de sempre.

As minhas irmãs Renata e Cíntia pela amizade e companheirismo.

Ao meu marido Rodrigo pelo amor, paciência e apoio nos momentos difíceis durante a execução desse trabalho e a minha filha Sofia por ser motivo da minha alegria e pelos momentos que não pude lhe dedicar toda a atenção necessária.

A empresa LINDO Systems que disponibilizou a versão completa do aplicativo What's Best para ser utilizado nesse trabalho.

A professora Marta pela sua orientação ao desenvolvimento desse trabalho e pelas preciosas críticas e sugestões feitas.

Aos membros da Banca Examinadora que prontamente atenderam ao convite de composição de banca deste trabalho.

Ao Adilson Nico e ao Fabiano Burns que disponibilizaram o tempo da empresa para que o curso de mestrado fosse realizado.

A todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

O modo ferroviário responde por 25% do transporte nacional de cargas e tem importante papel na movimentação de cargas a longas distâncias. Atualmente o sistema ferroviário totaliza cerca de 30 mil quilômetros e encontra-se em constante processo de ampliação desde a desestatização ocorrida com a Lei das Concessões de1995. A Estrada de Ferro Vitória Minas (EFVM) é uma das mais produtivas ferrovias brasileiras e é operada pela Vale. Com 905 km, é responsável pelo transporte de 37% de toda a carga ferroviária nacional. Desse total, 80% é dedicado ao minério de ferro, principal negócio da empresa. O fluxo de minério de ferro na EFVM inicia com o envio de vagões vazios aos pontos de carga para atendimento a um programa de carregamento. Para atingir os altos volumes de transporte é de fundamental importância que uma boa programação seja realizada de forma que se obtenha uma maior produtividade dos ativos, isto é, um menor tempo de ativos parados. Neste sentido, torna-se essencial uma ferramenta que realize a distribuição horária de vagões vazios objetivando a redução do ciclo associado e que suporte a tomada de decisão dos programadores de trens. Assim, propõe-se a aplicação de um *software* baseado no algoritmo "*Branch and Bound*" para a resolução de um problema inteiro de distribuição horária dos lotes vazios para carregamento. Pretende-se obter como resultado uma distribuição que reduza o tempo parado do ativo e aumente assim sua produtividade, além de agilizar e tornar padrão o procedimento hoje adotado pelos programadores.

Palavras-chave: Ferrovia, Distribuição, Carregamento, Programação Inteira

ABSTRACT

Railways transportation of cargo represents 25% of the total load transported in Brazil and it plays an important role when long distances are involved. Nowadays, the Brazilian railway network totalizes around 30 thousand kilometers and it has been constantly increasing since 1995, when the process of privatization started due to the Concessions Law. Vitória Minas Railway (EFVM) is one of the most productive brazilian railroads being operated by the Vale Company. With 905 km long, it is responsible for 40% of all load transport by rail in the country. From this total, 80% is dedicated to iron ore, the core business of this company. Iron ore flow in EFVM starts sending idle cars to loading points to accomplish load programs. To achieve a high carrying capacity track, it is extremely important that a welldone load programing be elaborated in order to increase assets productivity. In this context, it is essential a tool that performs assets distribution and supports the decisions of programmers team. Thus, the purpose of this work is to use an application based on “Branch and Bound” algorithm to solve an integer problem of hourly distribution of empty wagons to be used in loading process. As result, is intended a wagon distribution that reduces assets idleness and, in such way, increases whole system productivity, besides improving and standardizing current procedures adopted by programmers.

Key-words: Railway, Distribution, Loading, Integer Programming

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Matriz de Transportes no Brasil: 2007 11
Gráfico 2 - Matriz de Transportes considerando os Fluxos Totais Estimados e a Rede Futura com investimentos até 2023..... 12

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Estrutura da Dissertação 17
Figura 2 – Taxonomia para problemas de fluxo 24
Figura 3 – Árvore de Soluções pelo Algoritmo *Banch and Bound* 28
Figura 4 – Macro-Fluxo do Transporte de Minério de Ferro na EFVM 31
Figura 5 – Vagões do tipo GDE 32
Figura 6 – Virador de vagões GDE 32
Figura 7 – Esquemático da Estrada de Ferro Vitória a Minas 33
Figura 8 – Saída do trem com 3 lotes vazios com destino a 3 pontos de carga 34
Figura 9 – Saída do trem com 3 lotes vazios com destino a 2 pontos de carga 35
Figura 10 – Saída do trem com 2 lotes vazios com destino a 2 pontos de carga 35
Figura 11 – Saída do trem com 2 lotes vazios com destino ao mesmo ponto de carga 35
Figura 12 – Carregamento de Minério de Ferro com silo 37
Figura 13 – Carregamento de Minério de Ferro via pá-mecânica 37
Figura 14 – Distribuição de lotes representada com um fluxo em rede 40
Figura 15 – Representação de lotes enviados da origem ao ponto de carga e da origem ao ponto de transbordo 44
Figura 16 – Representação de lotes enviados da origem ao ponto de carga e do ponto de transbordo ao ponto de carga 44
Figura 17 – Representação do fluxo de lotes pelo ponto de transbordo 44
Figura 18 – Exemplo de desmembramentos envolvendo 3 pontos de carga (4, 5 e 7) com capacidade de carregamento de 2 lotes 47
Figura 19 – Fluxo de lotes da origem i ao ponto de transbordo k e do ponto de transbordo ao ponto de carga j 48
Figura 20 – Otimização da distribuição diária de lotes - dados de entrada e variáveis 75
Figura 21 – Otimização da distribuição diária de lotes - restrições 76
Figura 22 – Rede otimizada de transporte origem/destino 77
Figura 23 – Otimização da distribuição horária de lotes: Dados de Entrada e Formulação Auxiliar 79
Figura 24 – Otimização da distribuição horária de lotes: Variáveis 80
Figura 25 – Otimização da distribuição horária de lotes: Função Objetivo 81
Figura 26 – Otimização da distribuição horária de lotes: Exemplo de Restrição 81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Total de Investimentos Recomendados em Infra-estrutura de Transportes até 2023 12
Tabela 2 – Operadoras da Malha Ferroviária Nacional 13
Tabela 3 – Pontos de carga para carregamento e seus atributos 36
Tabela 4 – Possibilidades de Formação dos trens 53
Tabela 5 – Distribuição Horária de Trens em 4 turnos de 6 horas, sem manutenção 83
Tabela 6 – Distribuição Horária de Trens em 4 turnos de 6 horas, com manutenção 85
Tabela 7 – Distribuição Horária de Trens em 4 turnos de 6 horas, com manutenção 87
Tabela 8 – Resultados dos Cenários de Distribuição 88

SUMÁRIO

1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS 11
1.1 Introdução 11
1.2 Objetivo 14
1.2.1 Objetivo Geral 14
1.2.2 Objetivos Específicos 14
1.3 Organização da Dissertação 15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 18
2.1 Distribuição de vagões vazios 18
2.1.1 Métodos de resolução 19
2.2 Redes de Transporte 24
2.3 O Problema de Transportes 25
3 A MALHA DA EFVM: CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS 30
4 O PROBLEMA DE DISTRIBUIÇÃO HORÁRIA DE LOTES VAZIOS 39
4.1 Modelagem do Problema de Distribuição Diária de Lotes: primeira etapa 39
4.1.1 Parâmetros 40
4.1.2 Variáveis 41
4.1.3 Função Objetivo 42
4.1.4 Restrições 43
4.2 Modelagem do problema de distribuição horária de lotes vazios: segunda etapa 51
4.2.1 Parâmetros 56
4.2.2 Variáveis 57
4.2.3 Função Objetivo 58
4.2.4 Equações 58
4.2.5 Restrições 64
5 APLICAÇÃO DO ALGORITMO DE RESOLUÇAO 72
5.1 Descrição do Algoritmo 72
5.2 Aplicação ao problema de distribuição diária 73
5.3 Aplicação ao problema de distribuição horária 77
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 89
7 REFERÊNCIAS 92
ANEXOS 95

1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1 Introdução

Entre os modos de transporte existentes, o ferroviário caracteriza-se por sua capacidade de transportar grandes volumes, com elevada eficiência energética, principalmente para longas distâncias (ANTT, acesso em 12 fev. 2008).

No Brasil, após o processo de desestatização da antiga RFFSA (Rede Ferroviária Nacional), que teve início no ano de 1992, e com a Lei das Concessões de 1995, grande parte da malha ferroviária nacional passou a ser administrada pelo poder privado, o que possibilitou maiores investimentos no setor. Esse foi um fator determinante para a ampliação da participação do modo ferroviário na matriz de transporte brasileira (Gráfico 1), tornando algumas ferrovias produtivas, lucrativas e competitivas em relação ao modo rodoviário (PLANO NACIONAL DE LOGÍSTICA E TRANSPORTES (PNLT) – Relatório Executivo 2007, acesso em 20 ago. 2008).

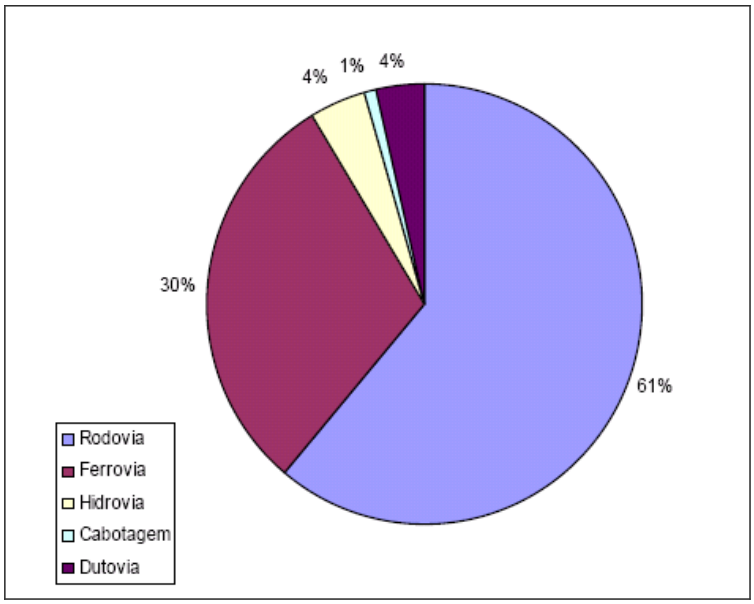

Gráfico 1 - Matriz de Transportes no Brasil: 2007
Fonte: PNLT (2007)

No Relatório Executivo 2007 do PLANO NACIONAL DE LOGÍSTICA E TRANSPORTES – PNLT (acesso em 20 ago. 2008) estabeleceu-se um portfólio de investimentos em infra-estrutura para o País até 2023, com maiores investimentos

no modo rodoviário – 43% (total de 43,2 mil km) –, seguido do ferroviário, com aproximadamente 30% (total de 20,2 mil km), de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1 - Total de Investimentos Recomendados em Infra-estrutura de Transportes até 2023

Modo de Transporte	Extensão (km)/Quantidade (nº)	Recursos (milhões de R$)	Participação Modal no Total de Investimentos (%)
Rodoviário	43.203	74.194,00	43
Ferroviário	20.256	50.556,00	29,4
Hidroviário	14.489	12.807,00	7,4
Portuário	169	25.162,00	14,6
Aeroportuário	40	9.695,00	5,6
	Total Brasil	**172.414,00**	**100**

Fonte: PNLT (2007)

Com isso, a matriz de transportes pode sofrer alteração a favor do modo hidroviário e ferroviário, continuando dominante a participação rodoviária, conforme Gráfico 2.

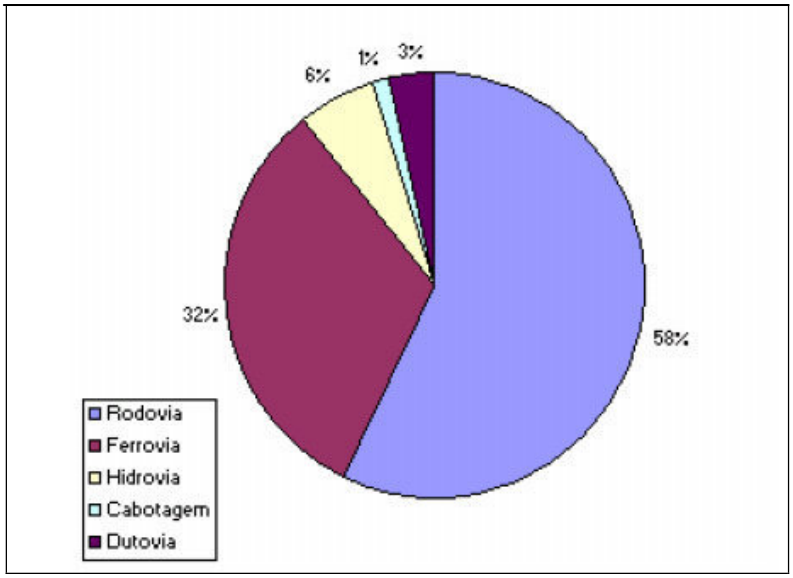

Gráfico 2 - Matriz de Transportes considerando os Fluxos Totais Estimados e a Rede Futura com investimentos até 2023

Fonte: PNLT (2007)

Atualmente, segundo a ANTT (acesso em 12 fev. 2008), o sistema ferroviário totaliza cerca de 30 mil quilômetros de linha férrea distribuídos pelas regiões Sul, Sudeste, Nordeste e Centro Leste do país, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Operadoras da Malha Ferroviária Nacional

Extensão da Malha Ferroviária - 2008 Extensões em km					
Operadoras	**Origem**	**Bitola**			**Total**
		Larga	**Métrica**	**Mista**	
ALL - América Latina Logística Malha Oeste S.A.	RFFSA		1.945		1.945
FCA - Ferrovia Centro Atlântica S.A.	RFFSA		7.910	156	8.066
MRS - MRS Logística S. A.	RFFSA	1.632		42	1.674
FTC- Ferrovia Tereza Cristina S.A.	RFFSA		164		164
ALL - América Latina Logística Malha Sul S.A.	RFFSA		7.293	11	7.304
FERROESTE			248		248
EFVM - Estrada de Ferro Vitória a Minas			905		905
EFC - Estrada de Ferro Carajás		892			892
TRANSNORDESTINA LOGÍSTICA S.A.	RFFSA		4.189	18	4.207
ALL - América Latina Logística Malha Paulista S.A.	RFFSA	1.463	243	283	1.989
ALL - América Latina Logística Malha Norte S.A.		500			500
VALEC / Subconcessão: Ferrovia Norte-Sul S.A.		420			420
Subtotal		**4.907**	**22.897**	**510**	**28.314**
Operadoras	**Origem**	**Bitola**			**Total**
		Larga	**Métrica**	**Mista**	
Companhia Brasileira de Trens Urbanos - CBTU		57	149		206
Cia. Est. de Eg. De Transportes e Logística - CENTRAL		17	75		92
Trombetas/Jarí/Corcovado/Supervia/Campos do Jordão		520	102		622
Amapá/CPTM/Trensurb/METRO-SP RJ		382	201		583
Subtotal		**976**	**527**		**1.503**
TOTAL		**5.883**	**23.424**	**510**	**29.817**

Fonte: ANTT (2008)

Dentre as várias empresas que participam do mercado ferroviário destaca-se a Vale que é a empresa responsável pelo gerenciamento da maior malha ferroviária nacional que inclui a Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM), a Ferrovia Centro Atlântica (FCA) e a Estrada de Ferro Carajás (EFC).

A Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM) possui 905 quilômetros de extensão e é uma das mais produtivas e modernas ferrovias do Brasil, respondendo pelo transporte de 37% de toda a carga ferroviária nacional (VALE, acesso em 15 jun. 2008). Desse transporte, 80% é dedicado ao minério de ferro, principal negócio da empresa, correspondendo a um total de cerca de 120 milhões de toneladas movimentadas anualmente.

Para que possa gerenciar todo o fluxo de transporte ao longo de toda a extensão de sua malha, a empresa dispõe de um Centro de Controle de toda a operação ferroviária (CCO) e um sistema integrado de informações. Esse gerenciamento é responsável por resolver uma série de problemas dentre os que se destacam: conflitos de circulação na malha, alocação de recursos ao transporte (locomotivas e vagões), alimentação do sistema de descarga do cliente e distribuição de lotes[1] vazios para carregamento de minério entre os pontos de origem e os de carregamento, passando por alguns pontos de transbordo.

Todos estes problemas devem ser resolvidos visando a maior produtividade do sistema e, apesar da complexidade de alguns dos quesitos a serem contornados, muitas decisões operacionais são tomadas somente com base na experiência operacional dos operadores, sem auxílio de uma ferramenta analítica.

Sem dúvida, a eficiência de longos anos na atividade gerencial tem um grande valor; entretanto, para resolver problemas de complexidade considerável, como os mencionados, o uso de algoritmos analíticos pode trazer alguns ganhos na produtividade da empresa.

1.2 Objetivo

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é, com a utilização de um aplicativo computacional associado a um conjunto de diretrizes operacionais, otimizar a distribuição horária de trens formados por lotes vazios para atender a uma demanda diária de carregamento, de forma a reduzir os tempos de espera em fila associados a essa atividade.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Modelar o fluxo de vagões vazios, desde a descarga no porto até que eles estejam novamente disponíveis para o cliente (ponto de carga).

[1] Considera-se um lote a composição formada por 84 vagões do tipo GDE (vagões com abertura superior e que são descarregados em viradores.

- Utilizar *software* baseado em uma técnica de pesquisa operacional para implementação e otimização da distribuição.
- Minimizar o tempo de fila nos pontos de carga nas 24 horas de distribuição de lotes vazios.
- Obter um Plano de Trens baseado na distribuição horária de lotes vazios.

1.3 Organização da Dissertação

Esta dissertação está composta de seis capítulos e doze Anexos.

O primeiro capítulo consta de uma introdução do tema, do objetivo, da metodologia e da composição da dissertação.

No Capítulo 2, é desenvolvido um estudo do estado da arte no que se refere a algoritmos para distribuição/alocação de tarefas.

No Capítulo 3, após apresentação da malha da EFVM e de suas características, é descrito o problema do transporte de minério, focando na atividade de carregamento de vagões GDE.

Nos Capítulo 4 e 5 um estudo de caso é apresentado.

No Capítulo 4, é modelado o problema de distribuição de vagões GDE com o objetivo de seleção de algoritmo adequado para a sua resolução.

No Capítulo 5, é aplicado o algoritmo de resolução para o problema da distribuição horária de vagões vazios para carregamento.

No Capítulo 6, são apresentadas as conclusões do trabalho e direções para futuras pesquisas na área.

No Anexo 1, é apresentado o programa diário de carregamento das minas por ponto de carga, programa este acordado entre a programação da mina e o Centro de Controle Operacional da ferrovia e que define a quantidade de lotes a serem carregados em cada ponto de carga para o dia seguinte.

O Anexo 2 apresenta o relatório resultante da aplicação do programa *What'sBest* para a distribuição diária de lotes para carregamento.

Os demais anexos apresentam os relatórios resultantes da aplicação do programa *What'sBest* (LINDO SYSTEMS, 2009) para os vários cenários de distribuição horária de lotes para carregamento.

A Figura 1 representa a estrutura da dissertação, onde são apresentados o tipo de pesquisa, o universo e amostra, a seleção dos sujeitos, a coleta e o tratamento dos dados e a validação dos resultados.

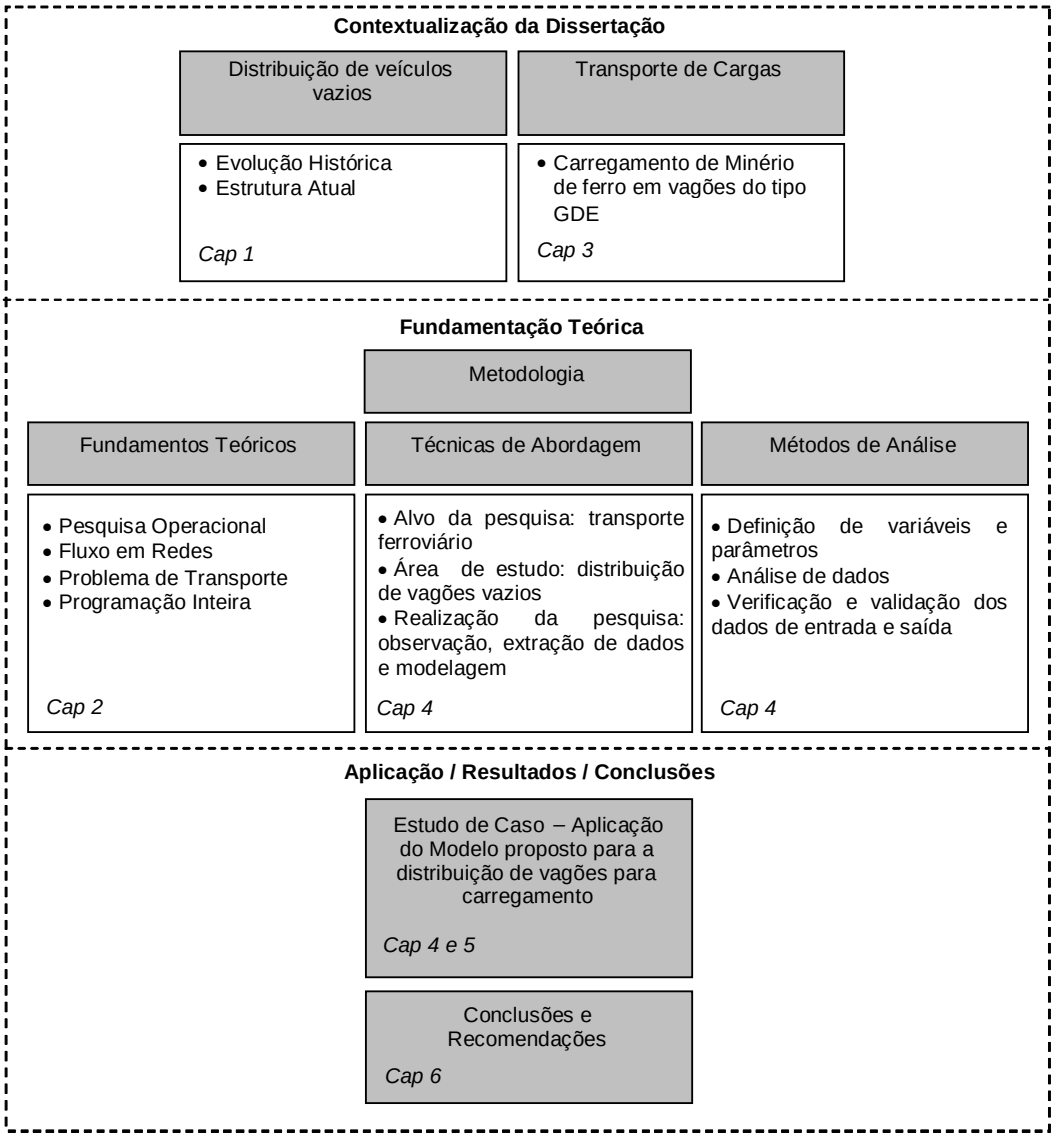

Figura 1 – Estrutura da Dissertação

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, apresenta-se um estudo da revisão bibliográfica sobre os métodos e técnicas desenvolvidas para a alocação de tarefas como é o caso da alocação de vagões vazios em uma malha ferroviária. Em seguida, é apresentado um enfoque voltado para redes de transportes, abordando o problema de transporte com transbordo.

2.1 Distribuição de vagões vazios

A alocação de veículos vazios para carregamento é uma das principais atividades do transporte de carga de uma ferrovia. Fazer uma boa distribuição, considerando as características específicas da ferrovia, significa, além da redução de tempo improdutivo do ativo, atender uma demanda de carregamento com melhor qualidade.

A distribuição de lotes vazios para carregamento tem como objetivo encontrar a melhor rota entre a origem e o destino em uma malha ferroviária composta de várias linhas e vários pátios intermediários antes de chegar ao destino final.

Segundo Haghani (1987), o problema do roteamento dos vagões consiste na tarefa de definir o melhor caminho entre a origem e o destino de uma carga sobre uma rede ferroviária composta de várias linhas entrelaçadas.

A rota mais conveniente deve ser definida como aquela de menor custo. Para este trabalho o menor custo é aquele que busca reduzir o tempo improdutivo dos ativos na ferrovia, sendo para isso minimizado o tempo de ativo parado nos pontos de carga em fila aguardando carregamento.

Nesse sentido, diversos trabalhos encontrados na literatura estudam a distribuição de veículos vazios, abordando vários métodos de resolução.

2.1.1 Métodos de resolução

White e Bomberault (1969) analisaram a distribuição de vagões através do diagrama espaço-tempo onde estão representados os vários caminhos que um veículo pode percorrer em intervalos de tempo, até seu destino final. O modelo desenvolvido no trabalho utiliza o conceito de fluxo em redes, com um método simplex de programação linear e uma formulação que permite considerar as paradas intermediárias entre pontos de suprimento e demanda. Foi utilizado o algoritmo "out-of-kilter" para resolver o problema. Segundo White e Bomberault (1969) esse algoritmo foi criado por Ford e Fulkerson e é muito conhecido para resolver problemas de custo mínimo. Compreende três fases: a inicial, a primal e a dual. O algoritmo primal inicia estabelecendo um determinado fluxo a um custo conhecido e vai alterando os padrões de fluxo, com redução de custos, até chegar ao custo mínimo. O dual, ao contrário, inicia com um padrão de fluxo de transporte, a um mínimo custo, estabelecendo uma determinada quantidade, menor que a desejada (que pode ser zero). Aumenta-se quantidade, mantendo o custo mínimo, até que a quantidade total seja alcançada. O pioneirismo do trabalho de White e Bomberault foi considerar o aspecto dinâmico na alocação de veículos vazios foi fundamental na contribuição para o desenvolvimento de outros trabalhos na área.

Assad (1980) em seu trabalho apresenta os modelos que existem na literatura aplicados às ferrovias. Segundo ele, as ferrovias constituem um importante modo de transporte e envolvem um complexo ambiente de tomada de decisão, que precisa ser suportado por modelos analíticos. Ele cita a otimização, filas e modelos de simulação, enfatizando os modelos de otimização por oferecem maior potencial de desenvolvimento. O autor tem dois objetivos: fornecer ao analista do sistema ferroviário uma visão de modelagem analítica para questões de planejamento e operação e auxiliar aos profissionais no campo de transporte e pesquisa operacional com questões em planejamento ferroviário, que apresentam oportunidades desafiadoras para formulação e implementação de modelos. São apresentados vários modelos analíticos para as atividades ferroviárias categorizados de acordo com a hierarquia de decisão do planejamento: modelos estratégicos, táticos e operacionais. Os modelos operacionais refletem as atividades do dia a dia em uma ferrovia como distribuição de vagões vazios, programação de manutenção e políticas

de despacho. Para a distribuição de vagões vazios, o autor cita que o problema pode ser entendido como uma rede espaço-tempo, na qual os nós correspondem às locações com um determinado tempo para possíveis movimentos entre eles. Pode-se formulá-lo como um problema de transporte em uma rede espaço-tempo que tem como objetivo minimizar o custo de transporte. O autor faz um apanhado de pesquisadores e modelos que tratam desse problema, mencionando White e Bomberault (apud ASSAD, 1980, p. 215) com a utilização de um método out-of-kilter, Gorenstein et al. (apud ASSAD, 1980, p.215) que trata o problema da frota não homogênea (mulitcomodity) e Allman (apud ASSAD, 1980, p.216) que usa a programação linear para determinar o “mix” ótimo de vagões para transporte maximizando as receitas de frete.

No seu trabalho Grain (1985) propõe um procedimento de otimização na distribuição de vagões através da aplicação de Programação Linear Inteira, visando a minimização da diferença entre despesa e receita para cada fluxo atendido. Esse problema diferencia-se do problema de alocação de vagões na EFVM, pois trata de um caso em que a demanda por ponto de carregamento não é pré-determinada, só considerando a capacidade de cada ponto.

Em seu trabalho sobre alocação de vagões vazios na EFVM, Caldara (1996) afirma que a melhor alocação é aquela que atende a demanda com o menor tempo de circulação de vagões vazios, ou seja, com menor ciclo. Este autor cita três abordagens para a resolução do problema. O método da Busca Exaustiva, no qual é pesquisada a melhor opção para alocação, correspondendo àquela de menor custo, testando-se todas as possíveis. Apesar da simples aplicação, há um gasto computacional alto para a escolha da melhor alocação, além de considerar o problema estático. A Busca em Árvore foi outra abordagem apresentada pelo autor que leva em consideração o aspecto dinâmico do problema. Este modelo utiliza o conceito de estado, que corresponde a uma situação corrente dos elementos da ferrovia envolvidos na alocação. Cada estado gera um novo estado chamado estado-filho. Dentre os estados-filho o algoritmo escolhe qual deles deve ser expandido, baseado numa função heurística. O critério de parada limita o número de estados abertos e permite a definição do horizonte de tempo que se quer trabalhar. A terceira abordagem do autor se refere à Otimização com combinação de alocação

e formação de vagões que se baseia em uma rede espaço-tempo, não-linear e com configuração composta por uma parte estática e uma parte dinâmica. Segundo ele, o fluxo de carga entre os vários pontos da ferrovia, como em qualquer processo de distribuição, pode ser descrito em termos de uma rede onde os pontos de carga, descarga e classificação são os nós da rede e as vias permanentes que interligam as estações são representadas através de arcos.

Crainic (2002) que em seu trabalho apresenta a questão do planejamento e tópicos de gestão para o transporte de carga em diversos modos, também faz referência aos três níveis de planejamento citados acima que são fundamentais nas políticas de gerenciamento do sistema de transporte. O Planejamento Estratégico envolve a alta administração, possuem impacto sobre todo o sistema e é baseado na aquisição de recursos a longo prazo, com altos investimentos. Como exemplo podemos citar as mudanças nas estruturas de uma rede ferroviária e a expansão de pátios. O Planejamento tático foca a alocação de recursos a médio prazo, buscando uma eficiente alocação e utilização dos recursos para alcançar um melhor desempenho de todo o sistema. Já a distribuição de vagões vazios é classificada como uma decisão operacional, pois as decisões refletem no dia a dia das atividades ferroviárias. O autor cita que a o problema de alocação de vazios é uma questão desafiadora no transporte que é afetada pela demandas dos clientes e que muitas vezes incorre no desbalanceamento da frota. Uma das principais contribuições nesse campo segundo este autor foi dada por White e Bomberault (1969) que consideraram a perspectiva tempo na modelagem de capacidade, gerando uma rede de baldeação dinâmica, otimizando o fluxo e minimizando o custo, podendo-se aplicar para isso a programação linear e os algoritmos de fluxo em redes.

Essa linha de pesquisa é ainda muito utilizada hoje, porém com formulações mais complexas para refletir a realidade. Outra contribuição importante para a resolução desse problema foi dada por Jordan e Turnquist (1983) com a consideração de incertezas nesses modelos. A estrutura desse modelo também é considerada uma rede dinâmica, na qual suprimento, demanda e tempo de viagem são considerados. O resultado do modelo é uma otimização não linear resolvido pelo algoritmo de Frank-Wolfe (apud CRAINIC, 2002, p.46).

Segundo Zhang et al (2003) existem três tipos de soluções encontradas na literatura para os problemas de alocação de vagões: a utilização de método e modelo de programação linear, análise matemática para distribuir e selecionar o caminho de vagões vazios adotando método de distribuição linear e dinâmica ou utilização do algoritmo baseado no Problema de Transporte. Estes autores propõem a construção de um modelo de otimização sintético de distribuição de vagões vazios com um “mix” de restrições. A função-objetivo expressa o custo total da distribuição de vagões vazios com a alocação da quantidade de vagões e o caminho que os mesmos devem seguir. As restrições são divididas em matemáticas e de conhecimento. Pelas restrições matemáticas, a distribuição de vagões se restringe ao suprimento e à requisição de vagões. As restrições de conhecimento focam o caminho tomado pelos veículos e enfatizam a seleção que devem encontrar um fluxo razoável de distribuição. De acordo com os autores, devido a esse modelo ter duas variáveis de decisão, a quantidade de vagões vazios a serem alocados e a seleção dos caminhos não pertence a um modelo de otimização puramente matemático. A solução pode ser encontrada com a combinação de um método de otimização matemática com um método de conhecimento e construção de um algoritmo baseado na natureza desse problema. Foi construído um algoritmo otimizado que combina a ótima distribuição de número e a seleção de via razoável. Este algoritmo pode melhorar a viabilidade prática e otimizar todo o plano de distribuição de vagões.

Bueno (2003), em seu trabalho para auxiliar o planejamento das atividades operacionais de uma refinaria de petróleo utilizou o modelo “What-it” que é uma técnica de simulação determinística com otimização, com auxílio do Solver e Excel. A partir dos valores das variáveis simuladas, a otimização com programação linear é acionada. A cada alteração das variáveis simuladas, uma nova otimização é realizada, buscando maximizar o lucro total da refinaria.

Bandeira (2005) propõe a alocação, de forma otimizada e integrada, de contêineres vazios e cheios, visando à minimização dos custos e o atendimento ao cliente. Para isso divide o problema em duas partes. A primeira consiste na alocação de contêineres vazios integrada à distribuição de contêineres cheios utilizando um modelo de transbordo estático com programação linear. Depois, inclui

procedimentos heurísticos, utilizando programação dinâmica, para atender a demanda num período de tempo pré-determinado, interligando os estágios estático e dinâmico.

Hamacher (2005) apresenta um modelo de programação inteira para o problema de alocação de vagões e locomotivas de maneira a maximizar o retorno obtido pela demanda. Foi desenvolvido um modelo de multifluxos no qual são inseridas todas as movimentações de operações de vagões e locomotivas e este foi resolvido com a utilização de um pacote genérico de programação inteira, CPLEX 9.0. Para a resolução desse problema, foram necessários alguns pré-processamentos para reduzir a quantidade de variáveis. O modelo proposto parte do princípio que o itinerário dos trens já está pré-definido e o resultado apresentou uma solução ótima ou quase ótima em um tempo razoável de processamento, aproximadamente 1 hora de execução.

Melo (2008), propõe o desenvolvimento de um modelo de programação linear inteira para a alocação de vagões de carga que auxilie aos analistas a conhecer melhor os problemas da ferrovia e a definir alguns indicadores, como tempo de retenção de vagões, tempo de deslocamento, vagões retidos na manutenção etc.

Os dados de entrada já consideram um programa de atendimento à demanda com o volume a ser transportado, tipo de vagão, data do início e fim de carregamento e o frete de transporte. De posse desses dados é calculada a oferta/demanda por tipo de vagão e as quantidades por dia de planejamento. A modelagem considera 5 variações considerando diferentes funções objetivo: minimização do quantitativo de vagões ociosos retidos em cada terminal, minimização do total de vagões em circulação para otimizar a frota existente, minimização do total de vagões vazios em circulação já que estes não contribuem diretamente para a geração de receita, maximização do lucro e por último a minimização dos custos operacionais.

O problema foi desenvolvido a partir de dados empíricos e o ambiente computacional utilizado foi o software Lingo 8.0 para executar o modelo e o Excel 2007 para fornecer os dados de entrada e a transferência dos resultados gerados

pelo Lingo. Os tempos de processamento foram muito baixos (maior tempo de 7 segundos para o modelo tipo 1) com obtenção de soluções ótimas.

Barros (2008) em seu trabalho propõe a utilização de uma ferramenta de pesquisa operacional que, utilizando o método Simplex, otimizou a distribuição diária de vagões para carregamento de minério de ferro, além de definir diretrizes para uma distribuição horária, realizada manualmente.

2.2 Redes de Transporte

Vários são os problemas de aplicação prática que podem ser modelados em redes. O modelo de fluxo em rede é aquele que representa o fluxo de um produto desde seus pontos de origem até os pontos de demanda e pode ser utilizado na solução de problemas, obtendo soluções eficientes, o que torna o problema mais simples e natural de ser formulado. Os vários tipos de problemas desta classe estão representados na Figura 2 a seguir.

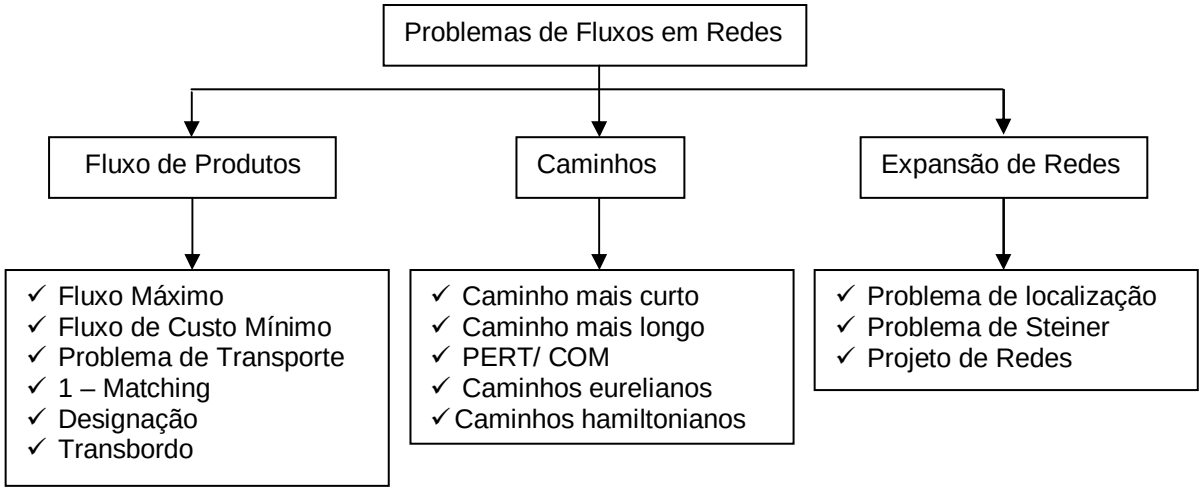

Figura 2 – Taxonomia para problemas de fluxo
Fonte: Goldbarg e Luna (2000, p. 322)

Uma rede é constituída por nós e arcos pelos quais transitam produtos sujeitos a limitações impostas pelas capacidades dos arcos, assim como pela necessidade de manter a rede em equilíbrio, e que provocam custos associados.

Os nós da rede, com exceção dos nós fontes (origens) e sumidouro (destinos), são conservativos em relação ao fluxo, ou seja, o fluxo que chega ao nó e deve ser igual ao fluxo que deixa o nó, isto é:

$$\left\{\begin{array}{c}\text{Fluxo que chega ao}\\ \text{vértice}\end{array}\right\} + \left\{\begin{array}{c}\text{Fluxo produzido no}\\ \text{vértice}\end{array}\right\} = \left\{\begin{array}{c}\text{Fluxo que sai do}\\ \text{vértice}\end{array}\right\} + \left\{\begin{array}{c}\text{Fluxo consumido no}\\ \text{vértice}\end{array}\right\}$$

2.3 O Problema de Transportes

O problema de transporte é de grande aplicação prática e consiste em determinar a forma mais eficiente de enviar um bem disponível de várias origens a seus destinos.

Apesar de ter sido estudado por vários pesquisadores foi Dantzig (apud NOVAES, 1978, p. 189) o primeiro a formular esse problema como um problema de programação linear e propor um método sistemático de resolução.

A formulação Clássica para o Problema de Transporte consiste em calcular $\{x_{ij}\}_{\substack{i=1,\ldots,m \\ j=1,\ldots,n}}$ número de elementos a serem alocados no arco (i,j) de uma rede, de forma que:

$$\text{Minimize } z = \left(\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} c_{ij}x_{ij}\right) \tag{1}$$

Sujeito a restrições de oferta:

$$\sum_{j=1}^{n} x_{ij} = o_i \text{ , } i = 1, \ldots, m \tag{2}$$

e de demanda:

$$\sum_{j=1}^{m} x_{ij} = d_j \text{ , } j = 1, \ldots, n \tag{3}$$

$$x_{ij} \geq 0 \text{ e inteiros} \tag{4}$$

$$i = 1,\ldots, m;\ j = 1,\ldots,n$$

Onde:

o_i é a oferta disponível em cada origem $\forall$i

d_j é a demanda em cada destino $\forall$j

c_{ij} é o custo associado a cada arco, para ir da origem i ao destino j

É condição que a soma das ofertas seja igual a soma das demandas:

$$\sum_{i=1}^{m} o_i = \sum_{j=1}^{n} d_j \tag{5}$$

Um caso particular do problema de transportes é o problema de transbordo que é um problema de transporte com a característica de que todas ou algumas fontes produtoras e dos centros consumidores podem atuar como pontos de transbordo, ou seja, são pontos de demanda e de oferta simultaneamente.

Trata-se de um problema que pode ser resolvido por programação linear (PL), quando as variáveis são contínuas e com comportamento linear para as restrições e função objetivo ou por programação não linear (PNL), quando não existe linearidade nas restrições ou na função objetivo.

Segundo Mateus e Luna (1986) os problemas de PNL caracteriza-se por não possuir um método geral de resolução, tal qual o método Simplex na Programação Linear. O maior problema desse tipo de programação está na incerteza de que a solução obtida seja realmente a melhor, isto é, muitas vezes chega-se a um ótimo local ao invés de um ótimo global. (CIRILO, 1997).

Um caso particular é quando o modelo de otimização possui variáveis que só podem assumir valores inteiros. É aplicado à resolução de um problema de Programação Inteira (PI). Existem vários algoritmos que resolvem esse tipo de problema sendo que uma das técnicas mais conhecidas é a *Branch and Bound*.

O algoritmo *Branch and Bound* é um algoritmo enumerativo, cuja estrutura baseia-se na construção de uma árvore onde os nós representam os problemas candidatos e os ramos representam as novas restrições que devem ser consideradas. Por

intermédio dessa árvore, todas as soluções inteiras da região viável do problema são enumeradas de modo implícito e explícito o que garante que as soluções ótimas serão encontradas (HAFFNER, 2007).

Ehrlich (1991) cita em seu trabalho um exemplo de aplicação do método *Branch and Bound:*

$$\text{Max } Z = x_1 + 4\,x_2 \tag{6}$$

Sujeito a:

$$2x_1 + 4\,x_2 \leq 7 \tag{7}$$

$$10x_1 + 3x_2 \leq 15 \tag{8}$$

$$x_1 \text{ e } x_2 \text{ inteiros e positivos} \tag{9}$$

Inicialmente, resolve-se o problema desprezando a restrição de inteireza. Para simplificar o entendimento observa-se a árvore de soluções *Branch and Bound* da Figura 3.

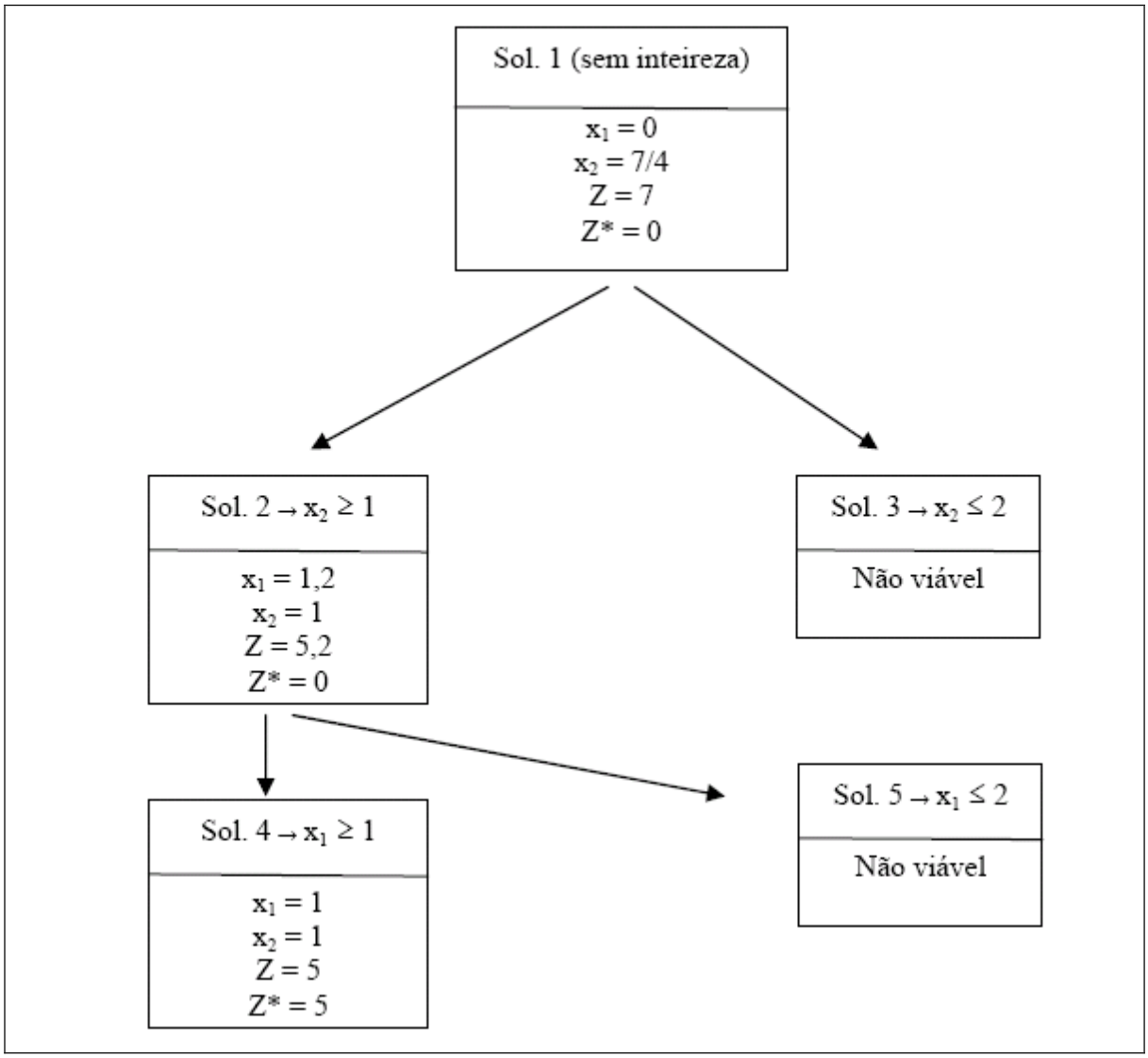

Figura 3 – Árvore de Soluções pelo Algoritmo *Banch and Bound*
Fonte: Rosal (2007,p. 35)

De acordo com a Figura 3 cada vez que a variável resulta não inteira, ramifica-se o resultado em duas opções de restrições inteiras, adicionando às variáveis o inteiro logo acima e o logo abaixo.

O algoritmo *Branch and Bound* gira em torno de um Z^* e este será o maior valor para o problema que também satisfaz às restrições de inteireza. O valor inicial do Z^* é zero, correspondendo a x_1 e x_2 iguais a zero e sendo este o valor inicial que satisfaz as restrições de inteireza. A cada ramificação deve-se fazer uma comparação entre Z^* e o valor da função-objetivo obtido no nó de estudo, verificando se esse valor será aceito ou descartado. Será aceito apenas quando houver satisfação das restrições

de inteireza. Em problemas de maximização o Z^* atua como limite inferior, ou seja, deve-se prosseguir a ramificação em nó se $Z>Z^*$. Já para minimização, o Z^* atua como limite superior, ou seja, prossegue-se por um nó se $Z<Z^*$. A solução ótima será obtida, respeitando as restrições de inteireza, quando $Z = Z^*$ (EHRLICH, 1991).

No capítulo 4 será apresentada a modelagem baseada na Alocação de Fluxo em Redes, aplicada ao problema tema desta dissertação.

Trata-se de um problema não linear, no qual as variáveis devem obrigatoriamente ser inteiras e que será resolvido pelo método *Branch and Bound.*

3 A MALHA DA EFVM: CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS

A Estrada de Ferro Vitória a Minas foi construída em 1903 pelo Engenheiro Pedro Nolasco. Suas ações foram compradas em 1909 pela Brazilian Hematite Syndicate (BHS) empresa de capital britânico, que tinha a finalidade de explorar as reservas de minério de ferro de Minas Gerais (VALE, acesso em 15 jun. 2008).

Em 1922, a BHS transformou-se na Itabira Iron One Company e efetuou o primeiro embarque de minério de ferro pelo Porto de Vitória. Em 1º de julho de 1942 o presidente Getúlio Vargas assinou decreto criando a Companhia Vale do Rio Doce que encampou as empresa Itabira Iron One Company e a EFVM (VALE, acesso em 15 jun. 2008).

Como parte da CVRD a Estrada de Ferro Vitória a Minas iniciou uma nova fase de desenvolvimento, passando por um total re-equipamento, tanto nas instalações fixas como no material rodante e de tração. A linha chegou a Itabira em outubro de 1943, permitindo o carregamento direto do minério nos trens próximos às minas (ANTF, acesso em 15 jun. 2008).

Em 1º de abril de 1966 foi inaugurado o novo terminal oceânico na ponta de Tubarão em Vitória - ES. O terminal de Tubarão foi sendo progressivamente ampliado, incorporando praticamente todas as atividades de manutenção e operação da EFVM, incluindo as modernas oficinas de locomotivas e de vagões, e centro de controle (ANTF, acesso em 15 jun. 2008). No mesmo ano, foi inaugurado o Centro de Controle Operacional (CCO) em Tubarão.

Esse Centro gerencia todas as operações da EFVM. Seu painel contém a representação esquemática da linha férrea, pela qual os operadores localizam os trens e decidem que rotas devem seguir. Por meio de um rádio, o maquinista mantém contato com o CCO, comunicando-se com estações, terminais e oficinas.

O pátio de Tubarão é o único pátio ferroviário totalmente sinalizado da América Latina e com mais de 100 km de linhas, permite a classificação dos vagões por gravidade, de acordo com o sistema computadorizado.

Com a EFVM o cliente tem privilegiado acesso aos terminais portuários de Vitória e movimenta através destes vários produtos como o minério de ferro, carvão, coque, aço, aço, contêineres, celulose, madeira etc., sendo o primeiro o principal produto da empresa.

O transporte de minério de ferro da EFVM tem início com a definição do volume anual de transporte, de onde são obtidos os volumes mensais e diários de carregamento, conforme representado na Figura 4.

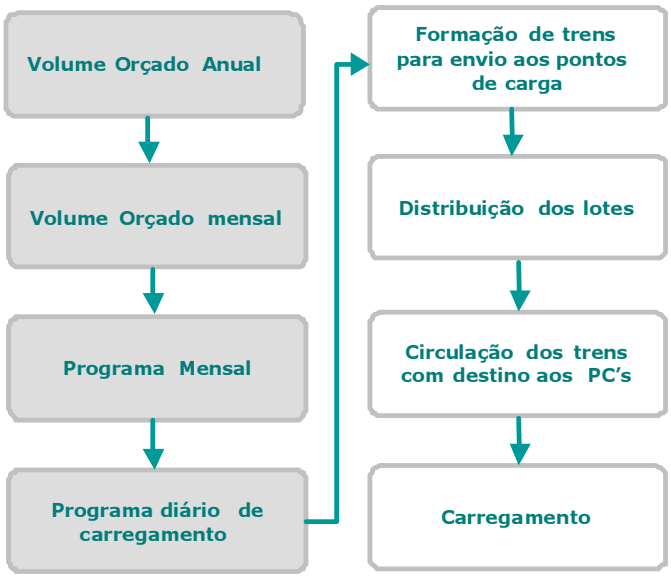

Figura 4- Macro-Fluxo do Transporte de Minério de Ferro na EFVM

O programa diário de carregamento é composto pela quantidade de lotes a serem carregados em cada ponto de carga (Anexo 1) e é enviado ao CCO no dia anterior pelos programadores da mina. Essa demanda pode ser ajustada no dia, em consenso, pelos programadores da mina e do CCO, de acordo com a disponibilidade de lotes para carregamento, uma vez que as alterações na malha são muito dinâmicas, gerando um programa revisado de carregamento.

O processo de carregamento começa com a formação de trens e envio aos pontos de carga. Um trem tipo na EFVM é formado por duas locomotivas e 168 vagões (ou dois lotes de 84 vagões) do tipo GDE, que possuem abertura superior (Figura 5) e

são descarregados em viradores (Figura 6). Essa composição abrange a maioria dos trens, quando se tem altos volumes de transporte, sendo os restantes formados por uma locomotiva e 84 vagões (1 lote) ou três locomotivas e 252 vagões (3 lotes).

Figura 5 – Vagões do tipo GDE

Figura 6 – Virador de vagões GDE

Os trens formados são compostos por vagões vazios provenientes da descarga no cliente final. Portanto, há a necessidade de aguardar a descarga dos vagões no cliente, além da disponibilidade de locomotivas. Existem três origens de vagões vazios: Tubarão, de onde partem os trens formados por vagões provenientes da descarga do minério que é embarcado pelo porto para o mercado externo e por

aqueles descarregados pela Arcelor Mittal Tubarão, cliente do mercado interno; Intendente Câmara onde está localizado o cliente Usiminas e Ouro Branco, onde está localizado o cliente Açominas, ambos os clientes também do mercado interno.

Após o despacho dos trens cabe ao Centro de Controle Operacional da EFVM decidir entre uma série de opções e com base nas informações de que dispõe, como utilizar os ativos para atender ao programa revisado, encaminhando-os aos pontos de carga. O período para executar o programa é de 24 horas a partir da hora zero de um dado dia.

Além disso, o CCO tem que gerenciar todo o volume transportado em uma rede complexa (Figura 7) e resolver conflitos de trens na malha, principalmente aqueles que ocorrem em trechos singelos, nos quais decide-se pela priorização de circulação de um dado trem em detrimento de outro.

Na Figura 7, a seguir, é apresentada a configuração da EFVM e seus pontos notáveis, isto é, pontos de origem, pontos de formação/desmembramento e pontos de carga.

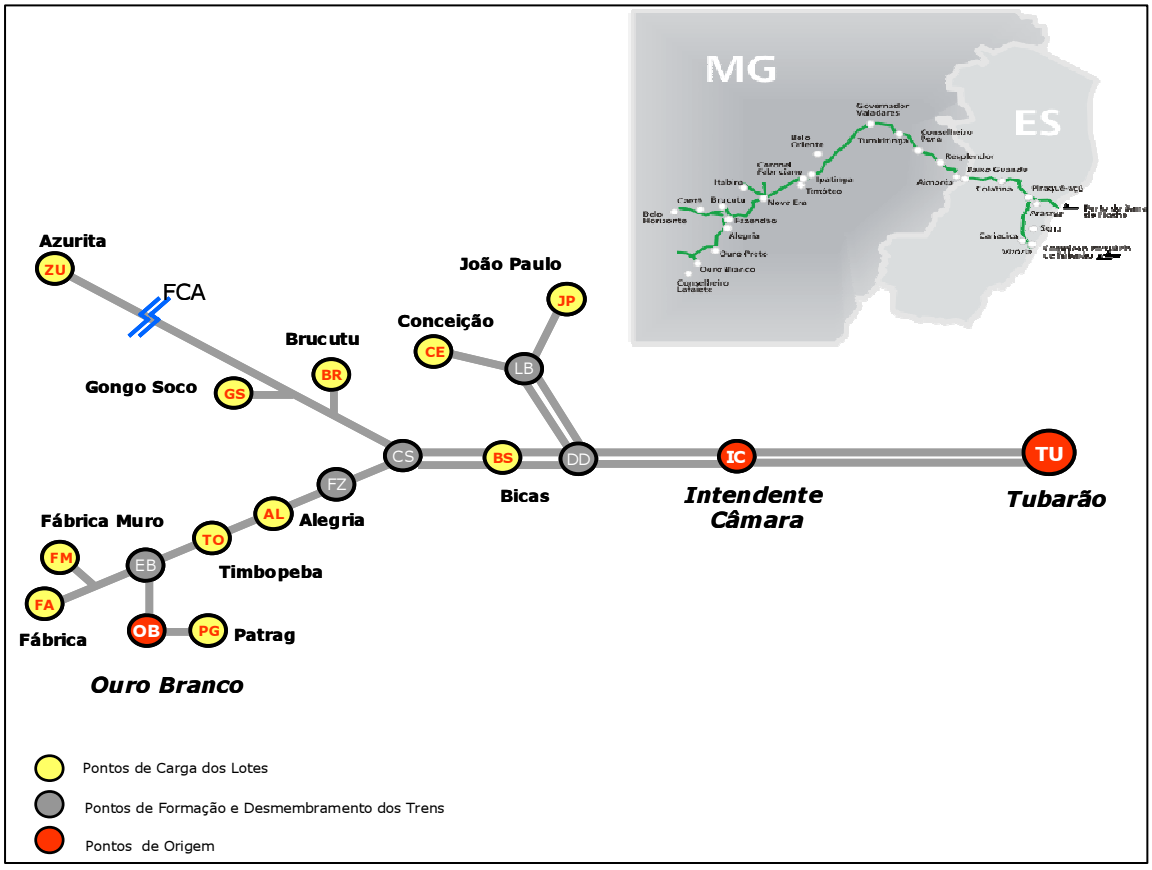

Figura 7 – Esquemático da Estrada de Ferro Vitória a Minas

A malha ferroviária da EFVM é formada por uma linha tronco duplicada e três ramais, quais sejam: o ramal de Itabira, no qual se localizam os pontos de carga João Paulo (JP) e Conceição (CE); o ramal de Fábrica, no qual se localizam os pontos de carga Alegria (AL), Timbopeba (TO), Fábrica (FA), Fábrica Muro (FM) e Patrag (PG) e o ramal de Belo Horizonte, no qual se localizam os pontos de carga Brucutu (BR), Gongo Soco (GS) e Azurita (ZU).

Conforme já citado anteriormente, os pontos de origem são TU (Tubarão), IC (Intendente Câmara) e OB (Ouro Branco) de onde são enviados trens no decorrer do dia até que a demanda total seja atendida. Da origem TU podem sair trens com dois ou três lotes, de IC saem trens com dois lotes e de OB, trens com um lote devido às características físicas/operacionais das linhas.

Para que o trem seja formado e trafegue na malha, existem restrições operacionais ao longo da mesma que devem ser obedecidas. Dentre essas se destacam inclinações críticas de trechos e capacidades dos pátios que impedem o tráfego de mais de um lote e que exigem os desmembramentos ou formações de trens. Estes pontos podem ser considerados pontos de transbordo e flexibilizam o envio de lotes aos pontos de carregamento.

Nos pontos de desmembramento ocorre a separação dos lotes de um trem para só depois seguirem para os pontos de carga. Esses pontos são: Laboriau (LB), Costa Lacerda (CS), Fazendão (FZ) e Engenheiro Bandeira (EB).

As figuras 8, 9, 10 e 11 apresentam os esquemáticos da saída do trem com seus lotes da origem até os pontos de carga, passando pelo ponto de transbordo.

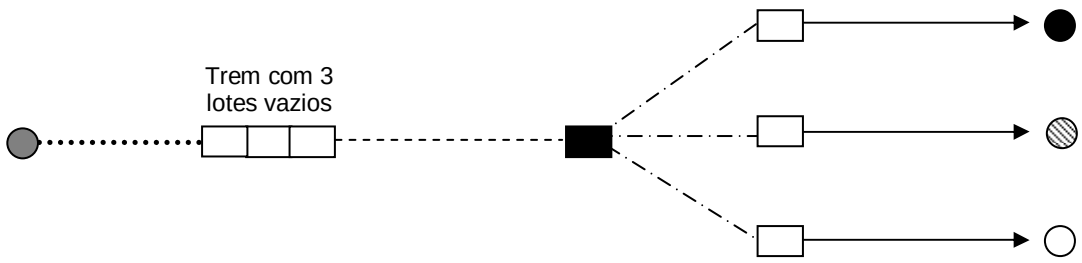

Figura 8 - Saída do trem com 3 lotes vazios com destino a 3 pontos de carga

Figura 9 - Saída do trem com 3 lotes vazios com destino a 2 pontos de carga

Figura 10 - Saída do trem com 2 lotes vazios com destino a 2 pontos de carga

Figura 11 - Saída do trem com 2 lotes vazios com destino ao mesmo ponto de carga

Origem

Ponto de Transbordo – pátio de desmembramento

Lote de um trem – composição de 84 vagões

Ponto de carga 1

Ponto de carga 2

Ponto de carga 3

Formação do trem na origem

Circulação do trem até o ponto de transbordo

Desmembramento

Envio para carregamento no ponto de carga

Entre os casos apresentados acima, existe uma particularidade. O trem, mesmo possuindo lotes para um único ponto de carga, realiza a operação de desmembramento. Os pontos de carga que se enquadram nessa situação possuem

carregamento de 2 lotes simultâneos, porém só conseguem receber 1 lote/vez, por restrição de trecho e/ou de pátio. São eles: Timbopeba, João Paulo e Conceição.

Deve-se ressaltar que, em alguns casos, pode ocorrer o envio de trens diretamente da origem para os pontos de carga, não havendo a necessidade do trem ser desmembrado. Esses trens podem sair com 1 ou 2 lotes, de acordo com a origem, sendo que aqueles com 2 lotes são enviados a pontos que possuem capacidade de carregamento simultâneo.

Na Tabela 3 são apresentados os 11 pontos de carregamento hoje ativos na EFVM, juntamente com os respectivos pontos de formação e desmembramento, forma de carregamento (silo ou pá-mecânica), os tempos médios de carregamento e capacidade de carregamento, em lotes. A capacidade de cada ponto não é só limitada pelos tempos de carregamento, mas também pela disponibilidade do minério de ferro e pelos dias destinados à manutenção dos silos.

Tabela 3 – Pontos de carga para carregamento e seus atributos

Pontos de Carga	Descrição	Origem dos vagões vazios	Atendido por origem ou pelo ponto de transbordo?	Pátio de formação e desmemb.	Restrição chegada (lotes/vez)	Forma carreg	Qtde silos	Qtde lotes simultâneos (carreg)	Tempo antes carreg (min)/lote	Tempo carreg (min)/lote	Tempo após carreg (min)/lote
JP	João Paulo	TU ou IC	transbordo	LB	1	silo	2	2	30	117	100
CE	Conceição	TU ou IC	transbordo	LB	1	silo	2	2	30	130	100
BS	Bicas	TU ou IC	origem	-	2	pá-mecânica	0	1	25	175	40
BR	Brucutu	TU ou IC	ambos	CS	2	silo e pá	2	2	45	153	40
GS	Gongo Soco	TU ou IC	ambos	CS	2	pá-mecânica	0	1	100	180	70
ZU	Azurita	TU ou IC	transbordo	CS	1	pá-mecânica	0	1	40	300	520
AL	Alegria	TU ou IC	ambos	CS/FZ	2	pá-mecânica	0	1	35	150	40
TO	Timbopeba	TU ou IC	ambos	CS/FZ	1	silo	2	2	60	110	55
PG	Patrag	OB	origem	-	1	pá-mecânica	0	1	80	240	582
FM	Fábrica Muro	TU ou IC ou OB	ambos	CS/FZ/EB	1	pá-mecânica	0	1	30	240	50
FA	Fábrica	TU ou IC ou OB	ambos	CS/FZ/EB	2	silo e pá	1	2	45	162	60

Nota: Para os pontos de carga BR e FA o tempo de carregamento apresentado é a média entre o tempo utilizando pá mecânica e tempo no silo

A forma de carregamento em um ponto de carga é de relevante importância, uma vez que pode reduzir drasticamente o tempo para tal atividade e assim aumentar a produtividade. O carregamento via silo (Figura 12) é um processo automatizado e que possui menor variabilidade de carga entre os vagões, tornando o processo mais uniforme e mais ágil do que o carregamento via pá-mecânica (Figura 13) que é um

processo manual e que depende da disponibilidade de equipamentos, que muitas vezes são compartilhados com outras atividades.

Figura 12 - Carregamento de Minério de Ferro com silo

Figura 13 - Carregamento de Minério de Ferro via pá-mecânica

A capacidade diária de carregamento em cada ponto de carga é afetada pelas manutenções que ocorrem na mina, nos silos de carregamento, e na ferrovia, nos ramais de linha singela de Fábrica e Belo Horizonte.

Durante a manutenção na ferrovia os lotes devem chegar aos pontos de carga do ramal antes do início da mesma para serem carregados durante o período de indisponibilidade da linha e só saírem após liberação da mesma.

Uma boa distribuição/programação para o transporte realizada pelo CCO se traduz em obter uma configuração de trens que resulte em um menor ciclo de vagões com uma maior produtividade dos ativos, satisfazendo as regras operacionais que se fazem necessárias.

O ciclo de um vagão é o tempo total de viagem entre descargas consecutivas de um vagão. Começa com a saída do vagão vazio após a descarga e termina quando o vagão é novamente descarregado. É composto pelos seguintes tempos: tempo de circulação do vagão vazio, tempo de desmembramento, tempo de carregamento nos pontos de carga, tempo de formação, tempo de circulação do vagão carregado e tempo de espera nos pátios de destino, onde ocorrem as descargas.

Para decidir em quais pontos de carga os lotes serão alocados de forma a reduzir o tempo de ativo parado é recomendável a utilização de uma ferramenta analítica que realize a distribuição dos ativos atendendo à demanda diária de carregamento e que suporte a tomada de decisão na programação dos trens. Para isso, é essencial o estudo de uma técnica de pesquisa operacional que possa ser aplicada ao problema e que otimize essa distribuição.

Os resultados que podem ser obtidos desta forma podem levar a uma economia substancial em material rodante que é um dos maiores ativos das companhias ferroviárias. Com um menor ciclo, o ativo passa a girar mais rápido na malha, podendo atender a volumes ainda mais desafiadores.

4 O PROBLEMA DE DISTRIBUIÇÃO HORÁRIA DE LOTES VAZIOS

O problema da distribuição horária de lotes vazios entre origens, pontos de transbordo e destinos será resolvido em duas etapas utilizando o modelo de transporte com transbordo, conforme Goldbarg e Luna (2000). A primeira etapa fornecerá a quantidade de lotes por dia de cada origem para cada destino, já apresentada em Barros (2008) e a segunda fará a distribuição horária desses lotes.

A distribuição diária, obtida na primeira parte do problema, otimiza o tempo de percurso na rede alocando a cada arco a quantidade de lotes para atendimento ao programa de carregamento do dia. Essa quantidade será utilizada como parâmetro de entrada para a distribuição horária, na qual os lotes serão alocados aos trens de forma a obter o menor tempo de fila nos pontos de carga, objetivo do trabalho em questão.

Verifica-se que o problema é não linear, por suas restrições, e inteiro, já que a quantidade de lotes que passa em cada arco deve ser inteira.

4.1 Modelagem do Problema de Distribuição Diária de Lotes: primeira etapa

O problema a ser modelado é o da distribuição diária de lotes vazios na malha da rede da Vale (Figura 7), onde as restrições operacionais e físicas são as apresentadas no Capítulo 3.

Essa malha pode ser representada como a rede da Figura 14 a seguir.

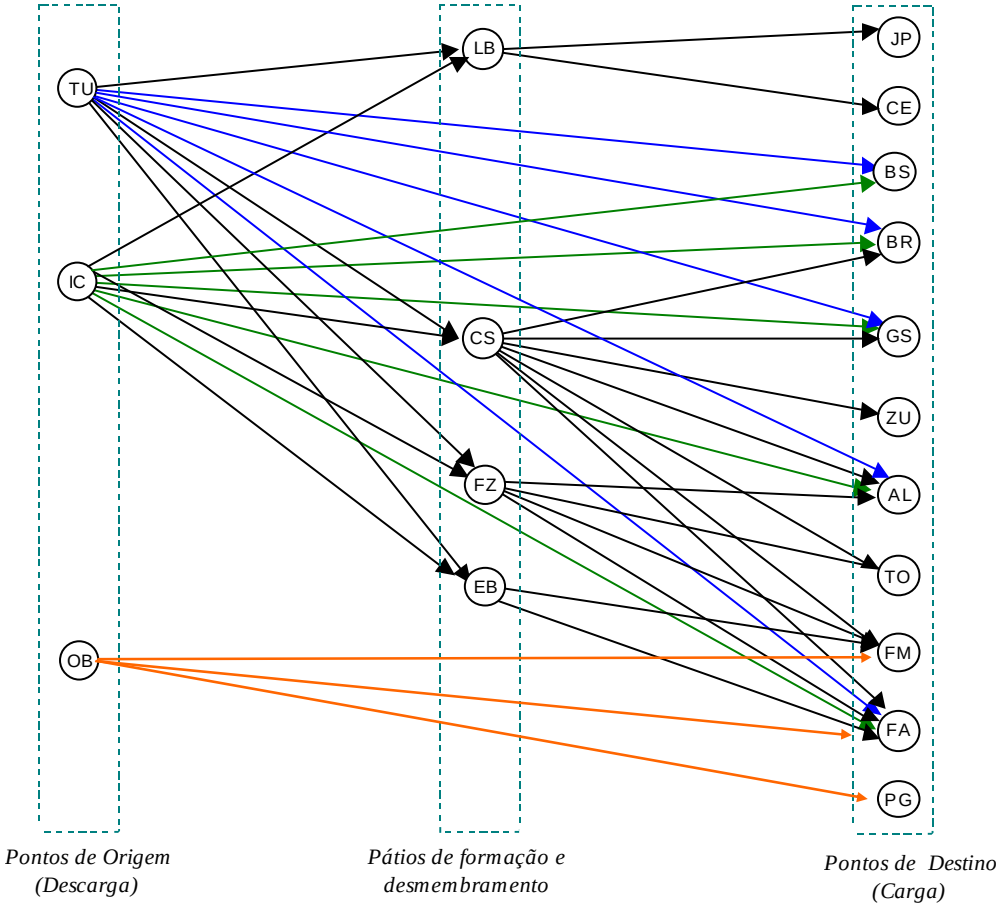

Figura 14 - Distribuição de lotes representada com um fluxo em rede

Fonte: Barros (2008, p. 30)

Os nós representam os pontos notáveis da ferrovia (pontos de origem, formação/desmembramento e pontos de carga) e os arcos representam as ligações entre esses pontos. Os pontos de formação e desmembramento são considerados os pontos de transbordo.

A seguir são apresentados os parâmetros e variáveis para a formulação analítica do problema da distribuição diária de lotes vazios.

4.1.1 Parâmetros

Para a formulação do problema é necessária a definição de alguns parâmetros para representar todos os conjuntos de nós da rede de transporte, que incluem as origens, pontos de transbordo e destinos (pontos de carga). São eles:

M = {1, 2, 3} o conjunto de pontos de suprimento de lotes vazios, onde:

i = 1 - Tubarão (TU)

i = 2 - Intendente Câmara (IC)

i = 3 - Ouro Branco (OB);

S = {1, 2, 3, 4} o conjunto de pontos de transbordo de lotes vazios, onde:

k = 1 - Laboriau (LB)

k = 2 - Costa Lacerda (CS)

k = 3 - Fazendão (FZ)

k = 4 - Engenheiro Bandeira (EB);

N = {1, 2, 3, 4, ..., 11} o conjunto de pontos de demanda de lotes vazios para carregamento, onde:

j = 1 - João Paulo (JP)

j = 2 - Conceição (CE)

j = 3 - Bicas (BS)

j = 4 - Brucutu (BR)

j = 5 - Gongo Soco (GS)

j = 6 - Azurita (ZU)

j = 7 - Alegria (AL)

j = 8 - Timbopeba (TO)

j = 9 - Fábrica Muro (FM)

j = 10 - Fábrica (FA)

j =11 - Patrag (PG)

4.1.2 Variáveis

As variáveis de decisão representam para a distribuição diária a quantidade de lotes que passam em cada arco da rede, passando ou não pelo ponto de transbordo de forma a atender à demanda de carregamento. São elas:

x_{ik} : quantidade de lotes vazios que percorre um arco da origem i até um ponto de transbordo k, $i \in M$ e $k \in S$.

y_{kj} *:* quantidade de lotes vazios que percorre um arco do ponto de transbordo k até um ponto de carga j, $k \in S$ e $j \in N$.

z_{ij}*:* quantidade de lotes vazios que percorre um arco da origem i até um ponto de carga j, sem passar por um ponto de transbordo, $i \in M$ e $j \in N$.

Para o problema sob análise, devido à capacidade de recebimento de alguns pontos de carga ou à imposição da saída de lotes de algumas origens ou à capacidade de recebimento em pontos de transbordo há a necessidade de criar variáveis auxiliares que obrigam a chegada, saída ou passagem, respectivamente de um número par de lotes vazios.

Assim, sendo:

q_{ij}: quociente da divisão de z_{ij} por dois, p/ i = 1, 2 e j = 3, 4 , 5, 7 e 10;

q_{ik}: quociente da divisão de x_{ik} por dois, p/ i = 2 e k = 1, 2 , 3, 4 e p/ i = 1 e k = 4

Os pontos de carga Timbopeba, João Paulo e Conceição podem realizar o carregamento de 2 lotes simultâneos, porém esses lotes devem ser desmembrados, uma vez que só recebem 1 lote/vez por restrição operacional. Se esses pontos receberem toda a demanda de lotes que chegam ao ponto de transbordo, deve-se criar variáveis que obriguem que essa demanda seja par.

Dessa forma:

q_{kj}: quociente da divisão de y_{kj} por dois, p/ k=1 e j= 1, 2, k = 2 e j = 8, k = 3 e j = 8

4.1.3 Função Objetivo

Sejam $\{c_{ik}\}$ $\{w_{kj}\}$ $\{v_{ij}\}$ os tempos de percurso entre pares de arcos $\forall$ $i \in M$, $k \in S$ e $j \in N$ e seja Z o tempo total de percurso dos lotes vazios dos pontos de origem até os pontos de carga, variável esta a ser minimizada.

O problema consiste em calcular a quantidade de lotes $\{x_{ij}, y_{kj}, z_{ij}\}_{\substack{i \in M \\ k \in S \\ j \in N}}$ para a distribuição diária tal que:

$$\text{Minimize } Z = \left(\sum_{i \in M} \sum_{k \in S} c_{ik} x_{ik} + \sum_{k \in S} \sum_{j \in N} w_{kj} y_{kj} + \sum_{i \in M} \sum_{j \in N} v_{ij} z_{ij} \right), \tag{10}$$

Sendo:

c_{ik}: tempo de percurso entre cada ponto de origem i e cada ponto de transbordo k, para i $\in$ M e k $\in$ S;

w_{kj}: tempo de percurso entre cada ponto de transbordo k e cada ponto de destino j, para k $\in$ S e j $\in$ N;

v_{ij}: tempo de percurso entre cada ponto de origem i e cada ponto de destino j, para i $\in$ M e j $\in$ N.

A função objetivo está sujeita às restrições apresentadas a seguir.

4.1.4 Restrições

Oferta de lotes x Demanda de carregamento

A quantidade de lotes disponível nas origens deve ser igual à soma da quantidade demandada nos pontos de carga, ou seja, a oferta deve ser igual à demanda. Isso porque o programa de carregamento é baseado na quantidade de lotes disponíveis para efetuar essa atividade.

$$\sum_{i \in M} o_i = \sum_{j \in N} d_j \tag{11}$$

Onde:

o_i: quantidade de lotes vazios disponíveis em cada origem i, i $\in$ M, que servirá para suprir a demanda de lotes para carregamento em cada ponto de carga;

d_j: demanda de lotes para carregamento em cada ponto de carga j $\in$ N, limitada pela capacidade de carregamento deles.

Atendimento à oferta de lotes

A quantidade de lotes que sai das origens aos pontos de transbordo somada à quantidade de lotes que sai das origens diretamente aos pontos de carga é igual à oferta total de lotes, conforme Figura 15:

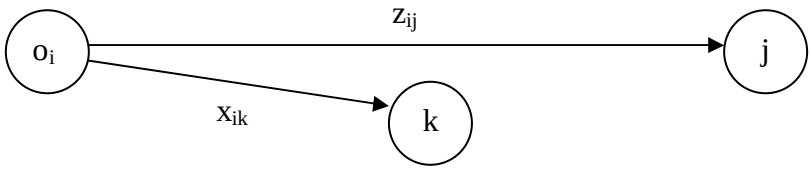

Figura 15 - Representação de lotes enviados da origem ao ponto de carga e da origem ao ponto de transbordo

$$\sum_{k \in S} x_{ik} + \sum_{j \in N} z_{ij} = o_i, \forall i \in M \tag{12}$$

Atendimento à demanda de carregamento

A quantidade de lotes que sai de cada ponto de transbordo somada à quantidade de lotes que sai de cada origem diretamente para os destinos deve ser igual à quantidade total demandada nos pontos de carga, conforme Figura 16:

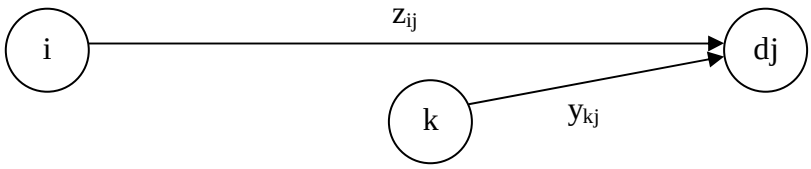

Figura 16 - Representação de lotes enviados da origem ao ponto de carga e do ponto de transbordo ao ponto de carga

$$\sum_{k \in S} y_{kj} + \sum_{i \in M} z_{ij} = d_j, \forall j \in N \tag{13}$$

Fluxo de entrada x Fluxo de Saída do Nó

A quantidade de lotes que chega a cada ponto de transbordo deve ser igual à quantidade de lotes que sai dele, conforme Figura 17:

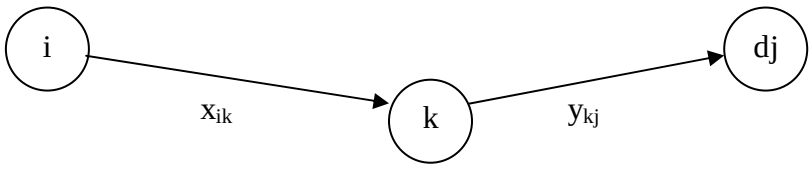

Figura 17 - Representação do fluxo de lotes pelo ponto de transbordo

$$\sum_{i \in M} x_{ik} = \sum_{j \in N} y_{kj}, \forall k \in S \tag{14}$$

Quantidade par de lotes em alguns arcos da rede

- Para os lotes de trens que saem da origem i diretamente ao ponto de carga j:

Para as origens Tubarão (i=1) e Intendente Câmara (i=2), quando os trens saem com destino aos pontos de carga, sem passar pelos pontos de transbordo, estes devem levar dois lotes, já que os pontos de carga não possuem capacidade de recebimento/carregamento de três lotes simultâneos. Portanto, a quantidade total de lotes que saem dessas origens para esses pontos deve ser par. Para isso, o resto da divisão das variáveis z_{ij} por dois deve ser igual a zero, tendo como quociente a variável auxiliar q_{ij} que deve ser inteira:

$$z_{ij} - 2q_{ij} = 0 \quad \begin{cases} i = 1 \; e \; j = 3, 4, 5, 7, 10 \\ i = 2 \; e \; j = 3, 4, 5, 7, 10 \end{cases} \tag{15}$$

- Para os lotes de trens que saem da origem i para o ponto de carga j passando pelo ponto de transbordo k:

Todos os pontos de transbordo conseguem receber 3 lotes simultaneamente para desmembramento, com exceção de Engenheiro Bandeira (EB), que não tem capacidade de receber mais de dois lotes ao mesmo tempo. Assim, a quantidade de lotes que chega a ele também deve ser par. O resto da divisão das variáveis x_{ik} por dois deve ser igual a zero, tendo como quociente a variável auxiliar q_{ik} que deve ser inteira.

Para a origem IC (i=2), todos os trens saem com dois lotes, independente se eles se dirigem diretamente ao ponto de carga ou se passam em um ponto de transbordo. Como o primeiro caso foi citado anteriormente, a equação a seguir refere-se ao segundo caso. Para isso, o resto da divisão das variáveis x_{ik} por dois deve ser igual a zero, tendo como quociente a variável auxiliar q_{ik} que deve ser inteira:

A equação abaixo abrange os casos citados acima:

$$x_{ik} - 2q_{ik} = 0 \quad \begin{cases} i = 2 \; e \; k = 1, 2, 3, 4 \\ i = 1 \; e \; k = 4 \end{cases} \tag{16}$$

Já para a origem Ouro Branco (i=3) não há a necessidade de que seja par a quantidade de lotes já que todos os trens que saem desse ponto são formados apenas por 1 lote, por restrição operacional.

Quantidade de lotes dos trens que saem de Tubarão

Os trens que saem de Tubarão devem sair com 2 ou 3 lotes, não sendo permitida a formação de trens com 1 só lote. Deve-se aplicar essa restrição à quantidade de lotes que saem de Tubarão com destino aos pontos de transbordo, não sendo necessária para os trens que seguem diretamente aos pontos de carga que obrigatoriamente devem ter uma quantidade par de lotes, conforme item anterior.

$$x_{ik} \neq 1, i = 1 \text{ e } \mathrm{k} = 1, 2 \; e \; 3 \tag{17}$$

Essa restrição só não se aplica ao ponto de transbordo de Engenheiro Bandeira (EB), que também deve receber uma quantidade par de lotes provenientes de Tubarão.

Pontos de transbordo para atendimento aos pontos de carga com capacidade de recebimento e carregamento de até 2 lotes

O ponto de transbordo, no problema em questão, é definido como o local onde ocorrem os desmembramentos de trens maiores em trem menores para que estes possam ser enviados aos pontos de carga. Com exceção dos trens destinados aos pontos de carga Timbopeba, João Paulo e Conceição que precisam ser desmembrados, pois só recebem 1 lote/vez, não há sentido em chegar trens aos pontos de transbordo contendo lotes para um único ponto de carga.

A restrição em questão garante a chegada de uma quantidade de lotes nos pontos de transbordo durante o dia que permita a formação de trens para desmembramentos. Para isso, verifica-se a quantidade de lotes que chega a cada ponto de transbordo de cada origem possível e assim define-se a quantidade de trens que podem ser formados com 2 lotes e 3 lotes nesse trecho:

$$x_{ik} = 2q_{2ik} + 3q_{3ik}, \; i = 1, 2 \; e \; k = 2, 3 \; e \; 4 \tag{18}$$

Onde:

q_{2ik} é quantidade de trens que saem da origem i com dois lotes passando pelo ponto de transbordo k;

q_{3ik} é quantidade de trens que saem da origem i com três lotes passando pelo ponto de transbordo k.

Para que haja desmembramento os trens que chegam com 2 lotes ao ponto de transbordo devem ser destinados a 2 pontos de carga distintos e os trens com 3 lotes para 2 ou 3 pontos de carga distintos, como na Figura 18 apresentado a seguir:

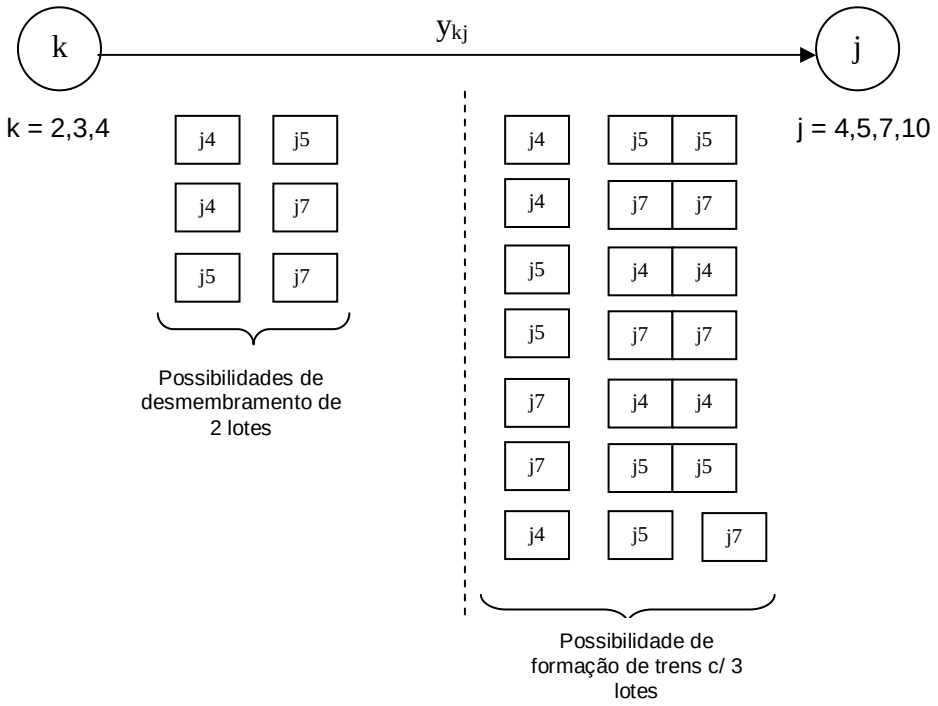

Figura 18 - Exemplo de desmembramentos envolvendo 3 pontos de carga (4, 5 e 7) com capacidade de carregamento de 2 lotes

Dessa forma, tem-se a seguinte restrição:

$$y_{kj} \leq \sum_{i=1,2} q_{2ik} + 2\sum_{i=1,2} q_{3ik}, \quad (19)$$

$$\begin{cases} k = 2 \; e \; j = 4, 5, 7, 10 \\ k = 3 \; e \; j = 7, 10 \\ k = 4 \; e \; j = 10 \end{cases}$$

Pontos de transbordo para atendimento aos pontos de carga com capacidade de recebimento e carregamento de 1 lote/vez

Da mesma forma do item anterior, a restrição deve ser tal que a quantidade de lotes que chega ao ponto de transbordo permita o desmembramento.

Como esses pontos só recebem 1 lote/vez, eles só podem constar em um dos lotes tanto para os trens com 2 lotes, quanto para aqueles com 3 lotes.

Dessa forma, tem-se a seguinte restrição:

$$y_{kj} \leq \sum_{i=1,2} q_{2ik} + \sum_{i=1,2} q_{3ik} \quad (20)$$

$$\begin{cases} k = 2 \; e \; j = 6, 9 \\ k = 3, 4 \; e \; j = 9 \end{cases}$$

Pontos de transbordo para atendimento aos pontos de carga com capacidade de recebimento de 1 lote/vez e carregamento de 2 lotes simultâneos

Os pontos de carga Timbopeba, João Paulo e Conceição podem realizar o carregamento de 2 lotes simultâneos, porém os lotes devem ser desmembrados, uma vez que só recebem 1 lote/vez por restrição operacional.

Quando a quantidade de lotes que chegam ao ponto de transbordo for igual à quantidade enviada do ponto de transbordo ao ponto de carga, essa quantidade deve ser par.

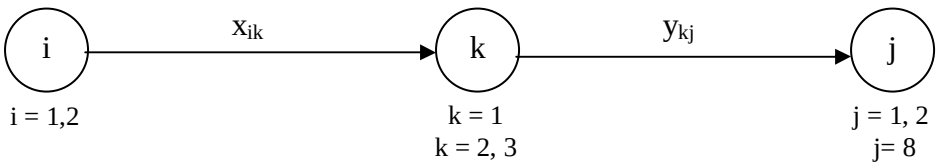

Figura 19 - Fluxo de lotes da origem i ao ponto de transbordo k e do ponto de transbordo ao ponto de carga j

Se $x_{ik} = y_{kj}$ (Figura 19), y_{kj} deve ser par. Para isso, o resto da divisão das variáveis y_{ki} por dois deve ser igual a zero, tendo como quociente a variável auxiliar q_{ik} que deve ser inteira:

$$y_{ki} - 2q_{ik} = 0 \qquad (21)$$
$$\begin{cases} i = 1,\ k = 1\ e\ \ j = 1,\ 2 \\ i = 1,\ k = 2\ e\ \ j = 8 \\ i = 1,\ k = 3\ e\ \ j = 8 \\ i = 2,\ k = 2\ e\ \ j = 8 \\ i = 2,\ k = 3\ e\ \ j = 8 \end{cases}$$

Variáveis inteiras e não negativas

Os trens que saem das origens TU (i=1), IC (i=2) e OB (I=3) são compostos por 1, 2 ou 3 lotes, As variáveis do problema referem-se quantidade de lotes que passam nos arcos da rede em uma distribuição diária e como não há a possibilidade de haver “quebra” desses lotes, essas variáveis devem ser inteiras e, além disso, não negativas.

As variáveis auxiliares q_{ij}, q_{ik} e q_{kj} também devem ser inteiras e positivas:

$$\{x_{ik}, y_{kj}, z_{ij}, q_{ij}, q_{ik}, q_{kj}\} \geq 0 \text{ e inteiros} \qquad (22)$$

Formulação geral da modelagem referente à distribuição diária de lotes vazios para carregamento:

$$\text{Minimize } Z = \left(\sum_{i \in M} \sum_{k \in S} c_{ik} x_{ik} + \sum_{k \in S} \sum_{j \in N} w_{kj} y_{kj} + \sum_{i \in M} \sum_{j \in N} v_{ij} z_{ij} \right)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i \in M} o_i = \sum_{j \in N} d_j$$

$$\sum_{k \in S} x_{ik} + \sum_{j \in N} z_{ij} = o_i, \forall i \in M$$

$$\sum_{k \in S} y_{kj} + \sum_{i \in M} z_{ij} = d_j, \forall j \in N$$

$$\sum_{i \in M} x_{ik} = \sum_{j \in N} y_{kj}, \forall k \in S$$

$$z_{ij} - 2q_{ij} = 0$$
$$\begin{cases} i = 1 \; e \;\; j = 3, 4, 5, 7, 10 \\ i = 2 \; e \;\; j = 3, 4, 5, 7, 10 \end{cases}$$

$$x_{ik} - 2q_{ik} = 0$$
$$\begin{cases} i = 2 \; e \; k = 1, 2, 3, 4 \\ i = 1 \; e \; k = 4 \end{cases}$$

$$x_{ik} \neq 1, i = 1 \text{ e } \mathrm{k} = 1, 2 \; e \; 3$$

$$x_{ik} = 2q_{2ik} + 3q_{3ik}, \; i = 1, 2 \; e \; k = 2, 3 \; e \; 4$$

$$y_{kj} \leq \sum_{i=1,2} q_{2ik} + 2\sum_{i=1,2} q_{3ik},$$
$$\begin{cases} k = 2 \; e \;\; j = 4, 5, 7, 10 \\ k = 3 \; e \;\; j = 7, 10 \\ k = 4 \; e \;\; j = 10 \end{cases}$$

$$y_{kj} \leq \sum_{i=1,2} q_{2ik} + \sum_{i=1,2} q_{3ik}$$
$$\begin{cases} k = 2 \; e \;\; j = 6, 9 \\ k = 3 \; e \;\; j = 9 \\ k = 4 \; e \;\; j = 9 \end{cases}$$

$$y_{ki} - 2q_{ik} = 0$$
$$\begin{cases} i = 1, k = 1 \; e \;\; j = 1, 2 \\ i = 1, k = 2 \; e \;\; j = 8 \\ i = 1, k = 3 \; e \;\; j = 8 \\ i = 2, k = 2 \; e \;\; j = 8 \\ i = 2, k = 3 \; e \;\; j = 8 \end{cases}$$

$\{x_{ik}, y_{kj}, z_{ij}, q_{ij}, q_{ik}, q_{kj}\} \geq 0$ e inteiros

4.2 Modelagem do problema de distribuição horária de lotes vazios: segunda etapa

A segunda parte do problema diz respeito à distribuição horária (nas 24 horas do dia) dos lotes das origens aos destinos passando ou não pelos pontos de transbordo tendo como dados de entrada a solução obtida na primeira etapa do problema, ou seja, a quantidade de lotes que passa em cada arco da rede (x_{ik}, y_{kj} e z_{ij}) para um dia de distribuição.

Para que os lotes sejam distribuídos nas 24 horas, eles devem ser alocados aos trens que partem a cada hora de origens pré-determinadas. Mesmo que o ciclo de algum dos pontos de carga extrapole as 24 horas, na distribuição seguinte será considerada a chegada do último lote enviado na distribuição anterior.

Seguindo a mesma rede de transporte apresentada na primeira etapa (Figura 14) e a mesma definição dos pontos notáveis da ferrovia (origem, formação/desmembramento e pontos de carga), são traçadas algumas diretrizes que devem ser seguidas para a modelagem do problema:

- **Diretriz 1:** Verificar restrições físicas e operacionais da malha que indiquem a quantidade de lotes que cada trem pode transportar. Essas restrições têm relação com a capacidade dos trechos e com a capacidade/forma de carregamento nos pontos de destino.

- **Diretriz 2:** Verificar as possibilidades de formação dos trens (Tabela 4) para que os lotes sejam alocados aos horários de distribuição a partir da solução encontrada na primeira etapa do problema (distribuição diária), observando as restrições citadas na diretriz 1.

Os trens que saem com 3 lotes devem necessariamente passar pelo ponto de transbordo já que não existe nenhum ponto de carga com capacidade de receber e carregar 3 lotes simultaneamente.

Os trens que saem com 2 lotes podem passar pelo ponto de transbordo ou ir diretamente ao ponto de carga, quando este possui capacidade de receber e carregar 2 lotes simultaneamente.

Existem trens que saem somente com 1 lote da sua origem devido às restrições de circulação da via no trecho OB/EB (rampa com alta inclinação). Estes se dirigem diretamente ao ponto de carga.

Tabela 4 - Possibilidades de Formação dos trens

Origem	Formação trem	Qtde lotes vazios	Ponto Transbordo	Formação trem	Ponto de Carga
TU	JP CE JP	3	LB		JP JP CE
	JP CE JP	3			JP CE CE
	BR BR GS	3	CS		BR, BR GS
	GS GS BR	3			GS, GS BR
	BR BR ZU	3			BR,BR ZU
	GS GS ZU	3			GS, GS ZU
	BR BR AL	3			BR, BR AL
	AL AL BR	3			AL, AL BR
	GS GS AL	3			GS, GS AL
	AL AL GS	3			AL, AL GS
	AL AL ZU	3			AL, AL ZU
	BR BR TO	3			BR, BR TO
	GS GS TO	3			GS, GS TO
	BR TO TO	3			BR TO TO
	GS TO TO	3			GS TO TO
	BR BR FA	3			BR, BR FA
	FA FA BR	3			FA, FA BR
	GS GS FA	3			GS, GS FA
	FA FA GS	3			FA, FA GS
	FA FA ZU	3			FA, FA ZU
	BR BR FM	3			BR, BR FM
	GS GS FM	3			GS, GS FM
	AL AL TO	3	CS, FZ		AL, AL TO
	AL TO TO	3			AL TO TO
	AL AL FA	3			AL, AL FA
	FA FA AL	3			FA, FA AL
	AL AL FM	3			AL, AL FM
	FA FA FM	3			FA, FA FM
	TO TO FM	3			TO TO FM

TU, IC	JP CE	2	LB		JP CE
	BR GS	2	CS		BR GS
	BR ZU	2			BR ZU
	BR AL	2			BR AL
	BR TO	2			BR TO
	BR FM	2			BR FM
	BR FA	2			BR FA
	GS ZU	2			GS ZU
	GS AL	2			GS AL
	GS TO	2			GS TO
	GS FM	2			GS FM
	GS FA	2			GS FA
	ZU AL	2			ZU AL
	ZU TO	2			ZU TO
	ZU FM	2			ZU FM
	ZU FA	2			ZU FA
	AL TO	2	CS, FZ		AL TO
	AL FM	2			AL FM
	AL FA	2			AL FA
	TO FM	2			TO FM
	TO FA	2			TO FA
	TO TO	2			TO TO
	BS BS	2			BS BS
	BR BR	2			BR BR
	GS GS	2			GS GS
	AL AL	2			AL AL
	FA FA	2			FA FA
TU, IC	FM FA	2	EB		FM FA
OB	FM	1			FM
	FA	1			FA
	PG	1			PG

Representação de um lote de 84 vagões

- Diretriz 3: O tempo de percurso ou “transit time” somado ao tempo de carregamento e ao tempo gasto nos pontos de transbordo para a manobra totaliza o tempo do lote no circuito de carregamento. Se um lote passa pelo ponto de transbordo ao invés de ir diretamente da origem ao ponto de carga, ao tempo no circuito é somado o tempo de manobra que deve haver no ponto de transbordo.

- Diretriz 4: Verificar os horários comprometidos com as manutenções, seja da mina ou de algum ramal da via, pois nestes momentos a circulação é interrompida, restringindo os tempos disponíveis para a distribuição horária.

As manutenções nas minas ocorrem nos silos de carregamento e, quando possível, em horários compatíveis com a circulação. São elas: João Paulo, Conceição, Brucutu, Timbopeba e Fábrica. Nos pontos que contém dois silos, são realizadas manutenções alternadas entre eles para que não haja paralisação no carregamento, reduzindo assim a capacidade de atendimento.

As manutenções na ferrovia são realizadas nos ramais de Fábrica e Belo Horizonte. No ramal de Fábrica ocorre a paralisação do trecho CS (Costa Lacerda) até FA (Fábrica) e até Patrag (PG) onde é interrompido o fluxo de acesso aos pontos de carga Alegria, Timbopeba, Fábrica, Fábrica Muro e Patrag. Já para o ramal de Belo Horizonte o trecho interrompido vai de CS (Costa Lacerda) a ZU (Azurita) não havendo acesso aos pontos de carga Brucutu, Gongo Soco, e Azurita.

Os trens com destino aos pontos de carga afetados pela manutenção deverão ser alocados de forma que cheguem aos mesmos e consigam ser liberados antes do início dela. Caso isso não ocorra, os lotes ficam em fila aguardando a liberação da manutenção para iniciar o carregamento.

Para o problema em questão deve-se levantar os horários de manutenção para o dia da distribuição (D) e para o dia posterior (D+1), já que os trens podem sair em um dia e chegar no dia seguinte ao ponto de carga.

- Diretriz 5: O intervalo entre dois envios consecutivos de trens para um mesmo ponto de carga deve observar a capacidade de carregamento deste (quantidade de lotes/hora), evitando o envio de lotes em intervalos menores e auxiliando assim a não geração de filas desnecessárias para carregamento.

Todos os dados citados nas diretrizes acima foram considerados restrições determinísticas para o problema.

Com as diretrizes traçadas, pode-se então modelar o problema da distribuição horária, conforme a seguir.

4.2.1 Parâmetros

Além dos conjuntos M, N e S da primeira etapa do problema é necessário definir o conjunto dos tempos de saída dos trens das origens com destinos aos pontos de carga necessários à modelagem do problema da distribuição horária de lotes. Assim, seja:

T = {1, 2, 3, 4, ..., 24} o conjunto dos tempos de distribuição dos lotes vazios, onde:

t = 1 – saída do trem para carregamento no horário de 01:00 h
t = 2 – saída do trem para carregamento no horário de 02:00 h
t = 3 – saída do trem para carregamento no horário de 03:00 h
t = 4 – saída do trem para carregamento no horário de 04:00 h
t = 5 – saída do trem para carregamento no horário de 05:00 h
t = 6 – saída do trem para carregamento no horário de 06:00 h
t = 7 – saída do trem para carregamento no horário de 07:00 h
t = 8 – saída do trem para carregamento no horário de 08:00 h
t = 9 – saída do trem par carregamento no horário de 09:00 h
t = 10 – saída do trem para carregamento no horário de 10:00 h
t = 11 – saída do trem para carregamento no horário de 11:00 h
t = 12 – saída do trem para carregamento no horário de 12:00 h
t = 13 – saída do trem para carregamento no horário de 13:00 h
t = 14 – saída do trem para carregamento no horário de 14:00 h

t = 15 – saída do trem para carregamento no horário de 15:00 h
t = 16 – saída do trem para carregamento no horário de 16:00 h
t = 17 – saída do trem para carregamento no horário de 17:00 h
t = 18 – saída do trem para carregamento no horário de 18:00 h
t = 19 – saída do trem para carregamento no horário de 19:00 h
t = 20 – saída do trem para carregamento no horário de 20:00 h
t = 21 – saída do trem para carregamento no horário de 21:00 h
t = 22 – saída do trem para carregamento no horário de 22:00 h
t = 23 – saída do trem para carregamento no horário de 23:00 h
t = 24 – saída do trem para carregamento no horário de 00:00 h

4.2.2 Variáveis

As variáveis de decisão para a distribuição horária representam os destinos j dos lotes que formam os trens a cada saída horária t da origem i, passando ou não pelo ponto de transbordo k, ou seja, são as quantidades de lotes que passam nos arcos da rede a cada trem formado, com o objetivo de atender a demanda diária de carregamento.

x_{ik}^{t} : quantidade de lotes vazios que percorre um arco da origem i até um ponto de transbordo k em cada tempo t, $i \in M$, $k \in S$ e $t \in T$;
z_{ij}^{t}: quantidade de lotes vazios que percorre um arco da origem i até um ponto de carga j em cada tempo t, sem passar por um ponto de transbordo, $i \in M$, $j \in N$ e $t \in T$;
w_{ikj}^{t}: quantidade de lotes vazios que percorre um arco da origem i até um ponto de carga j em cada tempo t, passando por um ponto de transbordo k, $i \in M$, $k \in S$, $j \in N$ e $t \in T$.

Da mesma forma como ocorreu na primeira etapa do problema, houve a necessidade de criar variáveis auxiliares que obrigam a chegada, saída ou passagem, respectivamente de um número par de lotes vazios.

Assim, tem-se:

q_{ij}^{t}: quociente da divisão de z_{ij}^{t} por dois em cada tempo t, $\forall$ i = 1, 2, j = 3, 4 , 5, 7 e 10 e $\forall$ t $\in$ T.

q_{ik}^{t}: quociente da divisão de x_{ik}^{t} por dois em cada tempo t, $\forall$ i = 2 e k = 1, 2 , 3, 4 e $\forall$ i = 1 e k = 4 e $\forall$ t $\in$ T.

4.2.3 Função Objetivo

O problema consiste em:

$$\text{Minimizar } Z = \left(\sum_{i \in M} \sum_{j \in N} tf_{ij}^{t} + \sum_{i \in M} \sum_{k \in S} \sum_{j \in N} tf_{ikj}^{t} \right), \forall t \in T \tag{23}$$

Sendo:

tf_{ij}^{t}: tempo em fila no ponto de carga j do lote que compõe o trem que sai da origem i no tempo t e que não passa pelo ponto de transbordo k;

tf_{ikj}^{t}: tempo em fila no ponto de carga j do lote que compõe o trem que sai da origem i no tempo t, passando pelo ponto de transbordo k.

4.2.4 Equações

Horário de chegada dos lotes aos pontos de carregamento

O horário de chegada é definido como o horário de saída do lote no tempo t somado ao seu tempo de percurso até o ponto de carregamento.

- Para os lotes de trens que saem da origem i diretamente ao ponto de carga j:

$$Se\ z_{ij}^{t} \rangle 0 \Rightarrow tch_{ij}^{t} = t + v_{ij}, \tag{24}$$
$$\begin{cases} i = 1\ e\ \ j = 3, 4, 5, 7, 10 \\ i = 2\ e\ \ j = 3, 4, 5, 7, 10 \\ i = 3\ e\ \ j = 9, 10, 11 \\ \forall\ t \in T \end{cases}$$

Sendo:

tch_{ij}^{t}: horário da chegada do lote no ponto de carga j para cada horário de saída do trem da origem i, sem passar pelo ponto de transbordo k;

v_{ij}: tempo de percurso entre cada ponto de origem i e cada ponto de destino j, para i $\in$ M e j $\in$ N.

- Para os lotes de trens que saem da origem i para o ponto de carga j passando pelo ponto de transbordo k:

$$Se\ w_{ikj}^{\ t} \rangle 0 \Rightarrow tch_{ikj}^{\ t} = t + c_{ik} + w_{kj}, \tag{25}$$

$$\begin{cases} i = 1,\ k = 1\ \ j = 1,\ 2 \\ i = 1,\ k = 2,\ j = 4...10 \\ i = 1,\ k = 3,\ j = 7...10 \\ i = 1,\ k = 4,\ j = 9, 10 \\ i = 2,\ k = 1,\ j = 1,\ 2 \\ i = 2,\ k = 2,\ j = 4...10 \\ i = 2,\ k = 3,\ j = 7...10 \\ i = 2,\ k = 4,\ j = 9, 10 \\ \forall\ t \in T \end{cases}$$

Sendo:

tch_{ikj}^{t}: horário da chegada do lote no ponto de carga j para cada horário de saída do trem da origem i, passando pelo ponto de transbordo k;

c_{ik}: tempo de percurso entre cada ponto de origem i e cada ponto de transbordo k, para i $\in$ M e k $\in$ S;

w_{kj}: tempo de percurso entre cada ponto de transbordo k e cada ponto de destino j, para k $\in$ S e j $\in$ N.

Horário de início de carregamento do lote

O horário de início de carregamento é igual ao horário de chegada do lote ao ponto de carga, caso não haja espera.

Se o ponto de carga já estiver ocupado com algum lote que tenha chegado anteriormente, independente de sua origem, o início de carregamento do lote em questão só iniciará após o término de carregamento desse lote.

Dessa forma, verifica-se, para cada saída de trem, o maior horário entre a chegada do lote ao ponto de carga e o final de carregamento dos lotes que chegam anteriormente a esse ponto de carga, independente da origem, conforme equação a seguir.

- Para os lotes de trens que saem da origem i diretamente ao ponto de carga j:

$$tic_{ij}^{\ t} = \max\,(tch_{ij}^{\ t}, \max\,(tfc_j)_{\forall tch_j < tch_{ij}^{\ t}}) \qquad (26)$$
$$p/\ i \in M,\ j \in N\ e\ \forall\ t \in T$$

Sendo:

tic_{ij}^{t}: horário de início de carregamento no ponto de carga j para o lote que sai no trem no tempo t da origem i, sem passar pelo ponto de transbordo k;

tch_{ij}^{t}: horário da chegada do lote no ponto de carga j para o lote que sai no trem no tempo t da origem i, sem passar pelo ponto de transbordo k;

$(tfc_j)_{\forall tch_j < tch_{ij}}$: horário do final do carregamento no ponto j, independente da origem i, do horário de saída do lote no trem e da passagem ou não pelo ponto de transbordo tal que o horário de chegada nesse ponto (tch_j) seja menor que tch_{ij}^{t}.

- Para os lotes de trens que saem da origem i para o ponto de carga j passando pelo ponto de transbordo k:

$$tic_{ikj}^{\ t} = \max\,(tch_{ikj}^{\ t}, \max\,(tfc_j)_{\forall tch_j < tch_{ikj}^{\ t}}) \qquad (27)$$
$$p/\ i \in M,\ j \in N\ e\ \forall\ t \in T$$

Sendo:

tic_{ikj}^{t}: horário de início de carregamento no ponto de carga j para o lote que sai no trem no tempo t da origem i, passando pelo ponto de transbordo k;

tch_{ikj}^{t}: horário da chegada do lote no ponto de carga j para o lote que sai no trem no tempo t da origem i, passando pelo ponto de transbordo k;

$(tfc_j)_{\forall tch_j < tch_{ikj}}$: horário do final do carregamento no ponto j, independente da origem i, do horário de saída do lote no trem e da passagem ou não pelo ponto de transbordo tal que o horário de chegada nesse ponto (tch_j) seja menor que tch_{ikj}^{t}.

Horário de final de carregamento

É o horário de início de carregamento somado ao tempo de carregamento multiplicado pela quantidade de lotes, conforme equações abaixo.

- Para lotes que saem das origens i diretamente aos pontos de carga j:

$$tfc_{ij}^{\ t} = tic_{ij}^{\ t} + (tc_j \times z_{ij}^{\ t}), \quad (28)$$
$$\begin{cases} i = 1,\ j = 3, 4, 5, 7, 10 \\ i = 2,\ j = 3, 4, 5, 7, 10 \\ i = 3,\ j = 9, 10, 11 \\ \forall\ t \in T \end{cases}$$

Sendo:

tfc_{ij}^{t}: horário de fim de carregamento no ponto de carga j para o lote que sai no trem no tempo t da origem i, sem passar pelo ponto de transbordo k;

tic_{ij}^{t}: horário de início de carregamento no ponto de carga j para o lote que sai no trem no tempo t da origem i, sem passar pelo ponto de transbordo k;

tc_j: tempo de carregamento de um lote no ponto de carga j. O tempo na atividade carregamento é a soma do tempo de manobra do trem antes do início da atividade carregamento para posicionamento do lote e do tempo efetivo de carregamento;

z_{ij}^{t}: quantidade de lotes vazios que percorre um arco da origem i até um ponto de carga j em cada tempo t, sem passar por um ponto de transbordo, i $\in$ M, j $\in$ N e t $\in$ T.

- Para lotes que saem das origens i aos pontos de carga j, passando pelos pontos de transbordo k:

$$tfc_{ikj}{}^{t} = tic_{ikj}{}^{t} + (tc_{j} \times w_{ikj}{}^{t}), \tag{29}$$
$$\begin{cases} i = 1,\ k = 1,\ j = 1,\ 2 \\ i = 1,\ k = 2,\ j = 4,....10 \\ i = 1,\ k = 3,\ j = 7....10 \\ i = 1,\ k = 4,\ j = 9, 10 \\ i = 2,\ k = 1,\ j = 1,\ 2 \\ i = 2\ k = 2,\ j = 4,....10 \\ i = 2,\ k = 3,\ j = 7....10 \\ i = 2,\ k = 4,\ j = 9, 10 \\ \forall\ t \in T \end{cases}$$

Sendo:

$tfc_{ikj}{}^{t}$: horário de fim de carregamento no ponto de carga j para o lote que sai no trem no tempo t da origem i, passando pelo ponto de transbordo k;

$tic_{ikj}{}^{t}$: horário de início de carregamento no ponto de carga j para o lote que sai no trem no tempo t da origem i, passando pelo ponto de transbordo k;

tc_j: tempo de carregamento de um lote no ponto de carga j. O tempo na atividade carregamento é a soma do tempo de manobra do trem antes do início da atividade carregamento para posicionamento do lote e do tempo efetivo de carregamento;

$w_{ikj}{}^{t}$: quantidade de lotes vazios que percorre um arco da origem i até um ponto de carga j em cada tempo t, passando por um ponto de transbordo k, $i \in M$, $k \in S$, $j \in N$ e $t \in T$.

Tempo de fila nos pontos de carga

O tempo de fila é definido como o tempo entre a chegada do lote no ponto de carga e o início de seu carregamento.

- Para lotes que saem das origens i diretamente aos pontos de carga j:

$$tf_{ij}^{\ t} = tic_{ij}^{\ t} - tch_{ij}^{\ t}, \quad (30)$$
$$\begin{cases} i = 1,\ j = 3, 4, 5, 7, 10 \\ i = 2,\ j = 3, 4, 5, 7, 10 \\ i = 3,\ j = 9, 10, 11 \\ \forall\ t \in T \end{cases}$$

Sendo:

tf_{ij}^{t}: tempo em fila no ponto de carga j do lote que compõe o trem que sai da origem i no tempo t e que não passa pelo ponto de transbordo k;

tic_{ij}^{t}: horário de início de carregamento no ponto de carga j para o lote que sai no trem no tempo t da origem i, sem passar pelo ponto de transbordo k;

tch_{ij}^{t}: horário da chegada do lote no ponto de carga j para cada horário de saída do trem da origem i, sem passar pelo ponto de transbordo k.

- Para lotes que saem das origens i aos pontos de carga j, passando pelos pontos de transbordo k:

$$tf_{ikj}^{\ t} = tic_{ikj}^{\ t} - tch_{ikj}^{\ t}, \quad (31)$$
$$\begin{cases} i = 1, k = 1,\ j = 1, 2 \\ i = 1, k = 2\ j = 4, ..., 10 \\ i = 1, k = 3\ j = 7, ..., 10 \\ i = 1, k = 4\ j = 9, 10 \\ i = 2, k = 1,\ j = 1, 2 \\ i = 2, k = 2\ j = 4, ..., 10 \\ i = 2, k = 3\ j = 7, ..., 10 \\ i = 2, k = 4\ j = 9, 10 \\ \forall\ t \in T \end{cases}$$

Sendo:

tfikjt: tempo em fila no ponto de carga j do lote que compõe o trem que sai da origem i no tempo t, passando pelo ponto de transbordo k;

ticikjt: horário de início de carregamento no ponto de carga j para o lote que sai no trem no tempo t da origem i, passando pelo ponto de transbordo k;

tch_{ikj}^{t}: horário da chegada do lote no ponto de carga j para o lote que sai no trem no tempo t da origem i, passando pelo ponto de transbordo k.

4.2.5 Restrições

Quantidade de lotes dos trens que saem de Tubarão para o ponto de transbordo: hora x dia

Garante que a soma das quantidades de lotes que sai da origem i ao ponto de transbordo k nas 24 horas de distribuição é igual ao total de lotes da origem i ao ponto de transbordo k da distribuição diária encontrada na primeira parte do problema.

$$\sum_{t \in T} x_{ik}^{\ t} = x_{ik}, \forall i \in M \ e \ \forall k \in S \tag{32}$$

Quantidade de lotes dos trens que saem de Tubarão diretamente para os pontos de carga: hora x dia

Garante que a soma das quantidades de lotes que sai da origem i ao ponto de carga j nas 24 horas de distribuição é igual ao total de lotes da origem i ao ponto de carga j da distribuição diária encontrada na primeira parte do problema.

$$\sum_{t \in T} z_{ij}^{\ t} = z_{ij}, \forall i \in M \ e \ \forall j \in N \tag{33}$$

Quantidade par de lotes em alguns arcos da rede

- Para os lotes de trens que saem da origem i diretamente ao ponto de carga j:

Para as origens Tubarão (i=1) e Intendente Câmara (i=2), quando os trens saem com destino aos pontos de carga, sem passar pelos pontos de transbordo, estes devem levar dois lotes, já que alguns pontos de carga não possuem capacidade de recebimento/carregamento de três lotes simultâneos. Portanto, a quantidade total de lotes que saem dessas origens para esses pontos deve ser par. Para isso, o resto da divisão das variáveis z_{ij} por dois, em qualquer tempo t, deve ser igual a zero, tendo como quociente a variável auxiliar q_{ij} que deve ser inteira:

$$z_{ij}^{\ t} - 2q_{ij}^{\ t} = 0, \forall t \in T \quad (34)$$
$$\begin{cases} i = 1,\ j = 3, 4, 5, 7, 10 \\ i = 2,\ j = 3, 4, 5, 7, 10 \end{cases}$$

Para os lotes de trens que saem da origem i para o ponto de carga j passando pelo ponto de transbordo k:

Todos os pontos de transbordo conseguem receber 3 lotes simultaneamente para desmembramento, com exceção de Engenheiro Bandeira (EB), que não tem capacidade de receber mais de dois lotes ao mesmo tempo. Assim, a quantidade de lotes que chega a ele também deve ser par. Para isso, o resto da divisão das variáveis x_{ik} por dois, em qualquer tempo t, deve ser igual a zero, tendo como quociente a variável auxiliar q_{ik} que deve ser inteira:

$$x_{ik}^{\ t} - 2q_{ik}^{\ t} = 0, \forall t \in T \quad (35)$$
$$\begin{cases} i = 1, k = 4 \\ i = 2, k = 1, 2, 3, 4 \end{cases}$$

Quantidade de lotes por trem e por origem

A cada hora sairá trens de Tubarão (TU) que possuem 2 ou 3 lotes, com destino ao ponto de carga i ou com destino ao ponto de transbordo k:

$$2 \leq (z_{ij}^{\ t} + x_{ik}^{\ t}) \leq 3, i = 1, \forall j \in N\ e\ \forall k \in S \quad (36)$$

Das origens IC e OB não saem, obrigatoriamente, trens em cada tempo t $\in$ T, tanto com destino ao ponto de carga, quanto para aqueles que passam pelo ponto de transbordo. No caso de IC, se houver a saída de trem em determinado horário, este deve ter 2 lotes, conforme equação a seguir:

$$(z_{ij}^{\ t} + x_{ik}^{\ t}) \leq 2, i = 2, \forall j \in N\ e\ \forall k \in S \quad (37)$$

No caso de OB, se houver a saída de trem em determinado horário, este deve ter somente 1 lote:

$$(z_{ij}^{\ t} + x_{ik}^{\ t}) \leq 1,\ i = 3\ , \forall j \in N\ e\ \forall k \in S \tag{38}$$

Fluxo no ponto de transbordo

A quantidade de lotes que chega a cada ponto de transbordo deve ser igual à quantidade de lotes que sai deles, para cada tempo t $\in$ T.

$$x_{ik}^{\ t} = \sum_{j \in N} w_{ikj}^{\ t}, \forall i \in M, \forall k \in S\ e\ \forall t \in T \tag{39}$$

Atendimento dos lotes de um trem de uma mesma origem por um único ponto de transbordo ou para um único ponto de carga

Os lotes dos trens que saem de Tubarão em um mesmo tempo t não podem ser enviados a pontos de transbordo distintos nem a pontos de carga distintos, quando não passam pelos pontos de transbordo.

$$z_{13}^{\ t} \cap z_{14}^{\ t} \cap z_{15}^{\ t} \cap z_{17}^{\ t} \cap z_{1_10}^{\ t} \cap x_{11}^{\ t} \cap x_{12}^{\ t} \cap x_{13}^{\ t} \cap x_{14}^{\ t} = 0, \forall t \in T \tag{40}$$

Essa restrição não precisar ser aplicada às origens Intendente Câmara (IC), já que a cada tempo t essa origem só pode enviar trens com dois lotes para um único ponto de transbordo.

Já para Ouro Branco (OB) essa restrição não se aplica pelo fato de não haver envio para ponto de transbordo.

Pontos de transbordo para atendimento aos pontos de carga com capacidade de recebimento de 1 lote/vez e carregamento de 2 lotes simultâneos

Essa restrição garante que os pontos de carga que possuem capacidade de carregamento de 2 lotes/vez, porém só recebem 1 por vez, passem pelo ponto de transbordo k.

$$w_{ikj}^{\ t} \leq 2,\ i = 1, 2,\ k = 1\ e\ \ j = 1{,}2 /\ i = 1, 2,\ k = 2, 3\ e\ \ j = 8\ , \forall\ t \in T \tag{41}$$

Recebimento no ponto de carga dos lotes desmembrados nos pontos de transbordo

Garante que os pontos se de carga j que possuem capacidade de carregamento e recebimento de 2 lotes/vez poderão receber até 2 lotes, caso o trem saia com 3 lotes da origem i e seja desmembrado no ponto de transbordo k e até 1 lote caso o trem saia da origem i com 2 lotes.

$$w_{ikj}{}^{t} \leq (x_{ik}{}^{t} - 1),\ i = 1, 2,\ k = 2\ e\ \ j = 4, 5, 7, 10 / i = 1, 2,\ k = 3\ e\ \ j = 7, 10\ , \forall\ t \in T \qquad (42)$$

Os pontos de carga j que possuem capacidade de carregamento e recebimento de 1 lotes/vez só recebem 1 lote do ponto de transbordo k.

$$w_{ikj}{}^{t} \leq 1,\ i \in M,\ k \in N\ e\ \ j = 6, 9, 11,\ \forall\ t \in T \qquad (43)$$

Manutenções nos pontos de carga

As manutenções nas minas ocorrem nos silos de carregamento simultaneamente ou não com as manutenções nos trechos.

Os pontos com esse tipo de carregamento possuem dois silos e um deles fica indisponível no período da manutenção. A exceção é Fábrica que só possui um silo, porém existe a opção de carregamento com pá mecânica. Em todos os casos, reduz-se pela metade à capacidade de carregamento.

Se a chegada do lote no ponto de carga para cada saída t do trem estiver entre o início e o final da manutenção, este será atendido por um só silo de carregamento e o tempo de carregamento será multiplicado por dois, conforme as condições a seguir:

$$Se\ \ tfms_{j}\ \ \leq tch_{ikj}{}^{t} \leq tims_{j},\ i = 1, 2,\ j = 1, 2,\ k = 1\ e\ \forall\ t \in T$$

$$tc_{j} = tc_{j}\, x\, 2,\ j = 1, 2; \qquad (44)$$

caso contrário,

tc_j é o tempo de carregamento médio por lote considerando todos os silos operando.

Sendo:

$tims_j$: horário de início da manutenção no silo para o ponto de carga j;

$tfms_j$: horário de término da manutenção no silo para o ponto de carga j.

Manutenções no trecho

As manutenções nos trechos de Fábrica e Belo Horizonte interditam a ferrovia a partir do ponto de CS (Costa Lacerda), já que esses trechos são singelos. Dessa forma, para cada lote que sai em um trem no tempo t, deve-se verificar se o mesmo chegará a esse ponto dentro do período da manutenção. Caso positivo, o trem aguardará nesse ponto para só circular após o final da manutenção, atrasando assim a chegada dos lotes aos pontos de carregamento.

Chegada a Costa Lacerda dos lotes que saem da origem direto ao ponto de carga:

$$tchcs_{i\,j}^{\;t} = t + tp_{i-cs}, \forall i \in M \;, j \neq 1,2 \; e \; \forall t \in T \tag{45}$$

Chegada a Costa Lacerda dos lotes que saem da origem ao ponto de carga, passando pelo ponto de transbordo:

$$tchcs_{ik\,j}^{\;t} = t + tp_{i-cs}, \forall i \in M \;, j \neq 1,2 \;, k \neq 1 \; e \; \forall t \in T \tag{46}$$

Sendo:

$tp_{i\text{-}cs}$: tempo de percurso da origem i a Costa Lacerda (CS);

Chegada ao ponto de carga para os lotes que saem da origem i direto ao ponto de carga j e que chegam a Costa Lacerda dentro do horário da manutenção do ramal:

$$\begin{aligned} &Se\; timr \leq tchcs_{ij}^{\;t} \leq tfmr; \\ &\qquad tch_{ij}^{\;t} = tch_{ij}^{\;t} + tfmr - tchcs_{ij}^{\;t}; \end{aligned} \tag{47}$$

Chegada ao ponto de carga para os lotes que saem da origem i ao ponto de carga j, passando pelo ponto de transbordo k, e que chegam a Costa Lacerda dentro do horário da manutenção do ramal:

$$Se\ timr \leq tchcs_{ikj}{}^{t} \leq tfmr,$$
$$tch_{ikj}{}^{t} = tch_{ikj}{}^{t} + tfmr - tchcs_{ikj}{}^{t} \quad (48)$$

Sendo:

timr: horário de início da manutenção nos ramais de Fábrica e Belo Horizonte;

tfmr: horário de término da manutenção nos ramais de Fábrica e Belo Horizonte.

Variáveis inteiras e não negativas

Assim como na distribuição diária, os trens que saem a cada tempo t das origens TU, IC e OB podem ser formados por 1, 2 ou 3 lotes. Portanto, a quantidade de lotes que passa em cada arco da rede deve ser inteira e não negativa.

Dessa forma:

$$\left\{x_{ik}{}^{t}, y_{kj}{}^{t}, z_{ij}{}^{t}, w_{ikj}{}^{t}, q_{ij}{}^{t}, q_{ik}{}^{t}\right\} \geq 0 \quad \text{e inteiros.} \quad (49)$$

No capítulo a seguir será apresentado um estudo de caso de forma a mostrar a aplicabilidade das modelagens para a distribuição diária seguida pela distribuição horária de lotes, seguindo as diretrizes descritas neste capítulo.

Formulação geral da modelagem referente à distribuição horária de lotes vazios para carregamento:

Minimize $Z = \left(\sum_{i \in M} \sum_{j \in N} tf_{ij}^{t} + \sum_{i \in M} \sum_{k \in S} \sum_{j \in N} tf_{ikj}^{t} \right), para \forall t \in T$

Sujeito a:

$$\sum_{t \in T} x_{ik}{}^{t} = x_{ik}, \forall i \in M \ e \ \forall k \in S$$

$$\sum_{t \in T} z_{ij}{}^{t} = z_{ij}, \forall i \in M \ e \ \forall j \in N$$

$$z_{ij}^{\ t} - 2q_{ij}^{\ t} = 0, \forall t \in T$$
$$\begin{cases} i = 1,\ j = 3, 4, 5, 7, 10 \\ i = 2,\ j = 3, 4, 5, 7, 10 \end{cases}$$

$$x_{ik}^{\ t} - 2q_{ik}^{\ t} = 0, \forall t \in T$$
$$\begin{cases} i = 2, k = 1 \\ i = 1, k = 4 \end{cases}$$

$$2 \le (z_{ij}^{\ t} + x_{ik}^{\ t}) \le 3, i = 1, \forall j \in N\ e\ \forall k \in S$$

$$(z_{ij}^{\ t} + x_{ik}^{\ t}) \le 2, i = 2, 3, \forall j \in N\ e\ \forall k \in S$$

$$x_{ik}^{\ t} = \sum_{j \in N} w_{ikj}^{\ t}, \forall i \in M, \forall k \in S\ e\ \forall t \in T$$

$$z_{13}^{\ t} \cap z_{14}^{\ t} \cap z_{15}^{\ t} \cap z_{17}^{\ t} \cap z_{1_10}^{\ t} \cap x_{11}^{\ t} \cap x_{12}^{\ t} \cap x_{13}^{\ t} \cap x_{14}^{\ t} = 0, \forall t \in T$$

$$w_{ikj}^{\ t} \le 2, i = 1, 2, k = 1\ e\ j = 1,2 / i = 1, 2, k = 2, 3\ e\ j = 8, \forall\ t \in T$$

$$w_{ikj}^{\ t} \le (x_{ik}^{\ t} - 1), i = 1, 2, k = 2\ e\ j = 4, 5, 7, 10 / i = 1, 2, k = 3\ e\ j = 7, 10, \forall\ t \in T$$

$$w_{ikj}^{\ t} \le 1, i \in M, k \in N\ e\ j = 6, 9, 11, \forall\ t \in T$$

$$Se\ \ tfms_j \le tch_{ikj}^{\ t} \le tims_j, i = 1, 2, j = 1, 2, k = 1\ e\ \forall\ t \in T$$

$$tc_j = tc_j x\, 2,\ j = 1, 2;$$

caso contrário,

tc_j é o tempo de carregamento médio por lote considerando todos os silos operando.

$$tchcs_{ij}^{\ t} = t + tp_{i-cs}, \forall i \in M\ , j \ne 1, 2\ e\ \forall t \in T$$

$$tchcs_{ik\,j}{}^{t} = t + tp_{i-cs}, \forall i \in M\ , j \neq 1,2\ , k \neq 1\ e\ \forall t \in T$$

$$Se\ timr \leq tchcs_{ij}{}^{t} \leq tfmr;$$

$$tch_{ij}{}^{t} = tch_{ij}{}^{t} + tfmr - tchcs_{ij}{}^{t};$$

$$Se\ timr \leq tchcs_{ikj}{}^{t} \leq tfmr,$$

$$tch_{ikj}{}^{t} = tch_{ikj}{}^{t} + tfmr - tchcs_{ikj}{}^{t}$$

$$\left\{x_{ik}{}^{t}, y_{kj}{}^{t}, z_{ij}{}^{t}, w_{ikj}{}^{t}, q_{ij}{}^{t}, q_{ik}{}^{t}\right\} \geq 0\ e\ inteiros.$$

5 APLICAÇÃO DO ALGORITMO DE RESOLUÇAO

5.1 Descrição do Algoritmo

Pára a resolução do problema de otimização da distribuição horária de lotes para carregamento foi utilizado o software *What'sBest* da *Lindo Systems* (LINDO SYSTEMS, acesso em 01 de ago. 2009). É disponibilizada uma versão livre na página da empresa podendo ser testado com vários exemplos disponibilizados. Como essa versão possui uma limitação na quantidade de variáveis e restrições, foi solicitada a versão completa do programa para que pudesse ser testado e aplicado a esse trabalho.

O programa *What'sBest* utiliza o Excel como interface de resolução e é desenvolvido para otimizar problemas lineares e não lineares de difícil solução. Além disso, ainda contempla a necessidade de se encontrar soluções inteiras para o problema.

De acordo com o manual do programa *What'sBest* (LINDO SYSTEMS, acesso em agosto de 2009) o método de solução para problemas lineares é o Simplex (Primal e Dual) e para não lineares utiliza o método do Gradiente Reduzido.

Para os problemas que devem ter solução inteira *What'sBest* começa resolvendo o problema com a aproximação progressiva, ou seja, a solução inicial sem a restrição de inteiro. Em seguida, o software utiliza o método *Branch and Bound* o turno 1 – opara encontrar a solução ótima inteira. Todas as possíveis soluções inteiras são enumeradas de forma inteligente, reduzindo a quantidade de soluções que devem ser verificadas. Porém, a quantidade de soluções viáveis cresce exponencialmente para problemas com um grande número de inteiros, podendo levar muito tempo para o processamento.

A seguir será apresentada a aplicação do What's Best nas duas etapas do problema, na distribuição horária, com a otimização do tempo de percurso na rede e o da distribuição horária com a minimização do tempo em fila no ponto de carga.

‘

5.2 Aplicação ao problema de distribuição diária

Nas Figura 20 e 21, é mostrada a planilha em Excel, que utilizando o *What'sBest* e baseado no modelo de transporte com transbordo, realiza a otimização da distribuição de lotes com a minimização do tempo na rede. É um problema com 55 variáveis (sendo 19 delas auxiliares) e 71 restrições.

Os dados de entrada consistem nas demandas nos pontos de carga, em um dia qualquer, nos tempos de percurso entre cada origem/destino e nas ofertas por origem.

Os dados de demanda utilizados nesta aplicação foram os obtidos da malha da rede referentes a um dia de distribuição, conforme modelo apresentado no Anexo 1, acordada entre a programação da mina e a operação da ferrovia. Além de respeitar as capacidades por ponto de carga, a programação também obedece às manutenções que ocorrem nos silos de carregamento das minas e na ferrovia.

O tempo de percurso é o "transit-time" médio em minutos praticado em cada trecho levantado junto ao Centro de Controle Operacional da EFVM. Foi considerado o tempo em minutos para a aplicação. Para os lotes que passam pelo ponto de transbordo foi acrescentado a esse tempo um tempo de manobra (40 minutos) para a operação de desmembramento.

Toda a demanda acordada entre programação da mina e CCO é atendida pela oferta de lotes nas origens, respeitando as seguintes regras:

- De TU (Tubarão) deve sair 1 trem por hora, com dois ou três lotes;

- De IC (Intendente Câmara) saem no máximo quatro lotes por dia devido à restrição de lotes da descarga de minério do cliente Usiminas;
- O mesmo acontece com OB (Ouro Branco) de onde saem no máximo quatro lotes por dia devido à restrição de lotes da descarga de minério do cliente Açominas.

Barros (2008) em seu trabalho resolve esse mesmo problema de otimização diária de lotes para a EFVM com o modelo de transporte com transbordo, porém utilizando o Solver como método de resolução. No entanto, a distribuição horária foi realizada manualmente, sem otimizar o tempo de fila nos pontos de carga, o que o diferencia do trabalho em questão. Para esse trabalho algumas restrições foram adicionadas a esse modelo para a posterior distribuição horária de lotes.

O resultado fornecido pela otimização é a quantidade de lotes alocada a cada arco que obedece às restrições impostas pelo problema, que são aquelas citadas no item 4.1.4 e que minimizam o tempo total na rede, de acordo com a Figura 22.

DADOS DE ENTRADA

DEMANDA	**53**
JP	10
CE	7
BS	2
BR	13
GS	4
ZU	1
AL	6
TO	6
FM	1
FA	2
PG	1
OFERTA	**53**
TU	50
IC	2
OB	1

CUSTO TOTAL 47.922

VARIÁVEIS

DE	PARA	TEMPO (MIN)	QTDE LOTES
TU	LB	802	**17**
TU	CS	877	**7**
TU	FZ	901	**2**
TU	EB	985	**0**
TU	BS	822	**2**
TU	BR	911	**10**
TU	GS	965	**4**
TU	AL	912	**6**
TU	FA	1016	**2**
IC	LB	180	**0**
IC	CS	255	**0**
IC	FZ	279	**0**
IC	EB	363	**0**
IC	BS	200	**0**
IC	BR	289	**2**
IC	GS	343	**0**
IC	AL	290	**0**
IC	FA	394	**0**
LB	JP	120	**10**
LB	CE	125	**7**
CS	BR	74	**1**
CS	GS	128	**0**
CS	ZU	729	**1**
CS	AL	75	**0**
CS	TO	98	**5**
CS	FM	163	**0**
CS	FA	179	**0**
FZ	AL	51	**0**
FZ	TO	74	**1**
FZ	FM	139	**1**
FZ	FA	155	**0**
EB	FM	55	**0**
EB	FA	71	**0**
OB	PG	70	**1**
OB	FM	111	**0**
OB	FA	127	**0**
qij	q13 (TU/BS)		**1**
	q14 (TU/BR)		**5**
	q15 (TU/GS)		**2**
	q17 (TU/AL)		**3**
	q1-10 (TU/FA)		**1**
	q23 (IC/BS)		**0**
	q24 (IC/BR)		**1**
	q25 (IC/GS)		**0**
	q27 (IC/AL)		**0**
	q2-10 (IC/FA)		**0**
qik	q21 (IC/LB)		**0**
	q22 (IC/CS)		**0**
	q23 (IC/FZ)		**0**
	q24 (IC/EB)		**0**
	q14 (TU/EB)		**0**
qjp			**0**
qce			**0**
qcs-to			**0**
qfz-to			**0**

RESTRIÇÕES

TU	SAÍDA TU	50	=	50
IC	SAÍDA IC	2	=	2
OB	SAÍDA OB	1	=	1
BS	CHEGADA BS	2	=	2
BR	CHEGADA BR	13	=	13
GS	CHEGADA GS	4	=	4
AL	CHEGADA AL	6	=	6
TO	CHEGADA TO	6	=	6
FM	CHEGADA FM	1	=	1
FA	CHEGADA FA	2	=	2
ZU	CHEGADA ZU	1	=	1
JP	CHEGADA JP	10	=	10
CE	CHEGADA CE	7	=	7
PG	CHEGADA PG	1	=	1
LB	CHEGADA LB/SAÍDA LB	17	=	17
CS	CHEGADA CS/SAÍDA CS	7	=	7
FZ	CHEGADA FZ/SAÍDA FZ	2	=	2
EB	CHEGADA EB/SAÍDA EB	0	=	0
TU/BS PAR		0	=	0
TU/BR PAR		0	=	0
TU/GS PAR		0	=	0
TU/AL PAR		0	=	0
TU/FA PAR		0	=	0
IC/BS PAR		0	=	0
IC/BR PAR		0	=	0
IC/GS PAR		0	=	0
IC/AL PAR		0	=	0
IC/FA PAR		0	=	0
IC/LB PAR		0	=	0
IC/CS PAR		0	=	0
IC/FZ PAR		0	=	0
IC/EB PAR		0	=	0
TU/EB PAR		0	=	0
TU/LB	>1	17	>=	2
TU/CS	>1	7	>=	2
TU/FZ	>1	2	=>=	2
TU/EB PAR		0	=	0
q13 (TU/BS)		1	=<=	1
q14 (TU/BR)		5	<=	6,5
q15 (TU/GS)		2	=<=	2
q17 (TU/AL)		3	=<=	3
q1-10 (TU/FA)		1	=<=	1
q23 (IC/BS)		0	<=	1
q24 (IC/BR)		1	<=	6,5
q25 (IC/GS)		0	<=	2
q27 (IC/AL)		0	<=	3
q2-10 (IC/FA)		0	<=	1
q21 (IC/LB)	LB	0	<=	9
q22 (IC/CS)	CS	0	<=	4
q23 (IC/FZ)	FZ	0	<=	1
q24 (IC/EB)	EB	0	=<=	0
q14 (TU/EB)	EB	0	=<=	0
qjp (LB/JP)	JP	0	<=	5
qce (LB/CE)	CE	0	<=	4
qcs-to (CS/TO)	TO	0	<=	3
qfz-to (FZ/TO)	TO	0	<=	3

Figura 20 – Otimização da distribuição diária de lotes – dados de entrada e variáveis

Possíveis formações dos trens com origem TU

Para os pontos de transbordo	trens com 2 lotes	trens com 3 lotes
CS	2	1
FZ	1	0
EB	0	0

Possíveis formações dos trens com origem IC

Para os pontos de transbordo	trens com 2 lotes	trens com 3 lotes
CS	0	0
FZ	0	0
EB	0	0

				1 lote no trem com 2 lotes	2 lotes no trem com 3 lotes	qtde máxima nos trens
PONTOS QUE PODEM RECEBER DIRETO DO PONTO DE CARGA	CS/BR	1	<=	2	2	4
	CS/GS	0	<=	2	2	4
	CS/AL	0	<=	2	2	4
	CS/FA	0	<=	2	2	4
	FZ/AL	0	<=	1	0	1
	FZ/FA	0	<=	1	0	1
	EB/FA	0	=<=	0	0	0

Pontos que só recebem 1 lote

CS/FM	0	<=	3
FZ/FM	1	=<=	1
EB/FM	0	=<=	0
CS/ZU	1	<=	3

Se do ponto de transbordo só houver lotes para os pontos TO, JP e CE, a demanda deve ser par

PONTOS QUE O LOTE DEVE PASSAR NO PONTO DE TRANSBORDO	LB/JP	17	0	0	=	0
	LB/CE	17	0	0	=	0
	CS/TO	7	0	0	=	0
	FZ/TO	2	0	0	=	0

Figura 21 – Otimização da distribuição diária de lotes - restrições

Ao gerar o resultado o programa, adicionalmente, gera um relatório (Anexo 2) com as características do problema (quantidade de restrições, quantidade de variáveis etc.), com alguns parâmetros que foram utilizados para o programa, o tipo de solução encontrada, o valor da solução encontrada, o tempo de solução e os erros encontrados, caso haja.

O tempo de solução foi muito bom (menos de um segundo) e foi encontrado um ótimo global, otimizando assim o problema. Na Figura 22 apresenta-se a distribuição obtida para o dia analisado.

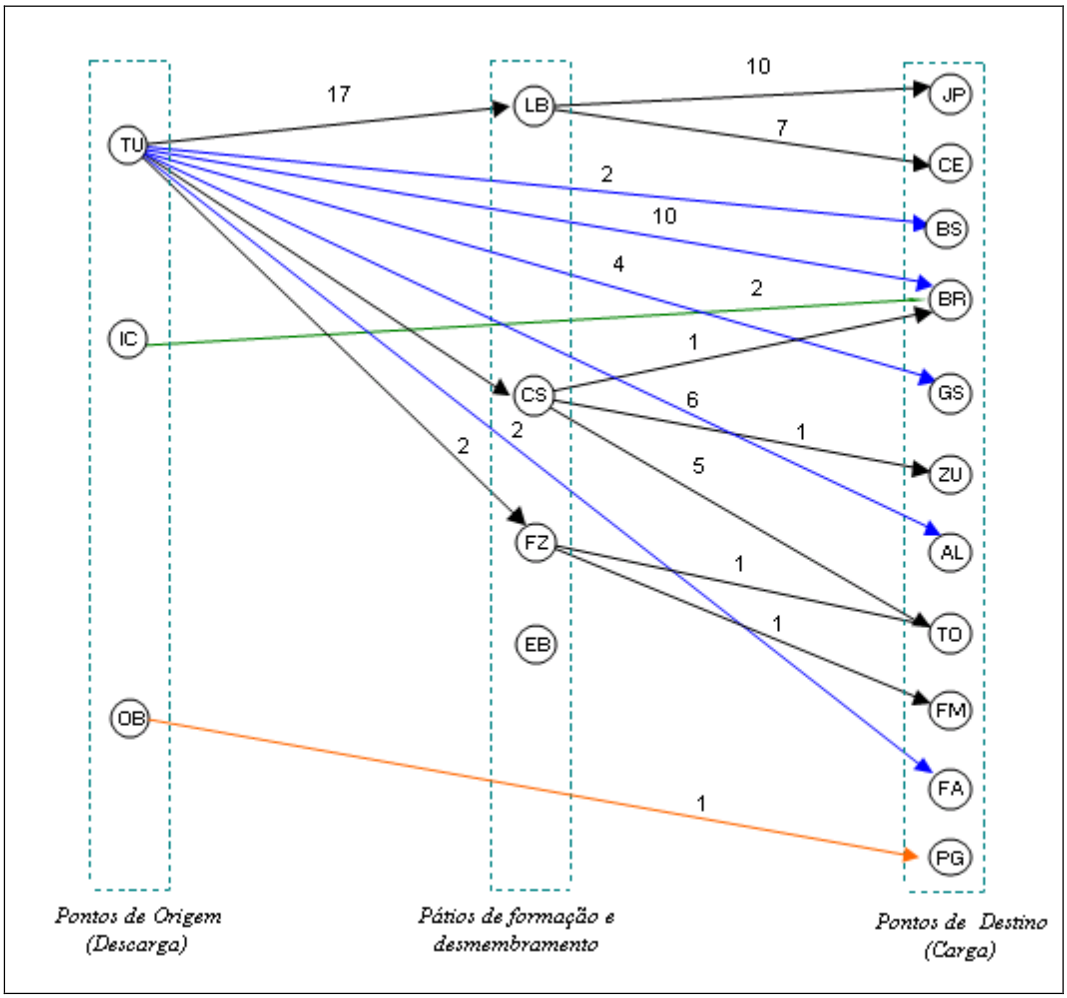

Figura 22 – Rede otimizada de transporte origem/destino

5.3 Aplicação ao problema de distribuição horária

O objetivo dessa etapa é utilizar o resultado obtido na distribuição diária de lotes e aplicar à distribuição horária dos trens com seus lotes considerando as particularidades operacionais da malha da EFVM e assim ter um resultado que traduza em um menor tempo parado do ativo, com uma melhor utilização do recurso.

Deve-se ressaltar que não foram considerados, como impacto na circulação dos trens até os pontos de carga, os tempos de paradas não programadas, provocadas por acidentes, problemas operacionais, cruzamento entre trens etc.

Para atendimento ao programa de carregamento (Anexo 1), estipulou-se um período de distribuição para um dia, baseado nos tempos totais de percurso entre as origens e os pontos de carga.

A rede utilizada nessa segunda etapa será a mesma daquela utilizada na primeira, só que agora adicionando-se a variável tempo na modelagem, já que a distribuição passa a ser horária. A quantidade de lotes fornecida na primeira parte do problema subsidia a formação dos trens e seus lotes a partir de cada origem e assim é possível saber como eles chegarão a seus destinos finais com a menor formação possível de fila para carregamento.

As figuras 23, 24, 25 e 26 apresentam modelo gerado em planilha Excel para aplicação do programa *What'sBest* da *Lindo Systems.* São mostrados apenas 10 horas de distribuição para uma melhor visualização, porém o problema foi modelado para as 24 horas do dia de distribuição.

A Figura 23 apresenta os dados de entrada e a formulação para obtenção da fila de carregamento em cada ponto de carga, para cada hora de saída de trem.

Os dados de entrada incluem a demanda em cada arco da rede obtida na primeira parte do problema (distribuição diária de lotes), os tempos de percurso, os tempos de atendimento de cada ponto de carga e os tempos de manutenções nas minas e nos trechos da ferrovia.

Para a obtenção da fila nos pontos de carga o problema foi dividido em duas partes: a distribuição dos lotes da origem aos pontos de carga, sem a passagem pelo ponto de transbordo e a distribuição dos lotes que passam pelo ponto de transbordo.

A Figura 24 apresenta a alocação de lotes para todas as formações possíveis dos trens, ou seja, as variáveis de decisão, a partir das quais é calculada a fila total nos pontos de carga, apresentada na Figura 25.

Já na Figura 26 é apresentado um exemplo de restrição do modelo.

DADOS DE ENTRADA

DE	PARA	Demanda	Tempo de
TU	LB	17	13,4
TU	CS	7	14,6
TU	FZ	2	15,0
TU	EB	0	16,4
TU	BS	2	13,7
TU	BR	10	15,2
TU	GS	4	16,1
TU	AL	6	15,2
TU	FA	2	16,9
IC	LB	0	3,0
IC	CS	0	4,3
IC	FZ	0	4,7
IC	EB	0	6,1
IC	BS	0	3,3
IC	BR	2	4,8
IC	GS	0	5,7
IC	AL	0	4,8
IC	FA	0	6,6
LB	JP	10	2,0
LB	CE	7	2,1
CS	BR	1	1,2
CS	GS	0	2,1
CS	ZU	1	12,2
CS	AL	0	1,3
CS	TO	5	1,6
CS	FM	0	2,7
CS	FA	0	3,0
FZ	AL	0	0,9
FZ	TO	1	1,2
FZ	FM	1	2,3
FZ	FA	0	2,6
EB	FM	0	0,9
EB	FA	0	1,2
OB	PG	1	1,2
OB	FM	0	1,9
OB	FA	0	2,1
OB	EB		1,6

Tempo de atendimento por	
JP	1,23
CE	1,33
BS	3,33
BR	1,65
GS	4,67
ZU	5,67
AL	3,08
TO	1,42
FA	1,73
FM	4,50
PG	5,33

Manutenções

D

	Início	Fim
JP		
CE	10,0	14,0
BR		
TO		
FA		
Ramal FA		
Ramal BH		

D+1

	Início	Fim
JP		
CE		
BR	32	48
TO		
FA		
Ramal FA	34	38
Ramal BH		

Primeira Parte: Origem até o ponto de carga ou até o ponto de transbordo

Origem	**TU**	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0
Destino	**BS**	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Chegada no ponto de carga		14,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
início do carregamento		14,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Final de carregamento (considerando a fila)		21,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Tempo de fila (Custo)		**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**

Origem	**TU**	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0
Destino	**BR**	0	0	2	0	0	0	2	0	0	0
Chegada no ponto de carga		0,0	0,0	18,2	0,0	0,0	0,0	22,2	0,0	0,0	0,0
Chegada em CS		0,0	0,0	17,6	0,0	0,0	0,0	21,6	0,0	0,0	0,0
Chegada com manut		0,0	0,0	18,2	0,0	0,0	0,0	22,2	0,0	0,0	0,0
Tempo carreg com manut		1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
início do carregamento		0,0	0,0	18,2	0,0	0,0	0,0	22,2	0,0	0,0	0,0
Final de carregamento (considerando a fila)		0,0	0,0	21,5	0,0	0,0	0,0	25,5	0,0	0,0	0,0
Tempo de fila (Custo)		**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**

Segunda parte: do ponto de transbordo até o ponto de carga

Saindo de TU

		1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0
Destino	**LB-JP**	0	2	0	0	2	0	0	2	0	0
Chegada no ponto de carga		0,0	17,4	0,0	0,0	20,4	0,0	0,0	23,4	0,0	0,0
Tempo carreg com manut		1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23
início do carregamento		0,0	17,4	0,0	0,0	20,4	0,0	0,0	23,4	0,0	0,0
Final de carregamento (considerando a fila)		0,0	20,3	0,0	0,0	23,3	0,0	0,0	26,3	0,0	0,0
Tempo de fila (Custo)		**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**
Destino	**LB-CE**	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Chegada no ponto de carga		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Tempo carreg com manut		1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33
início do carregamento		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Final de carregamento (considerando a fila)		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Tempo de fila (Custo)		**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**

Figura 23 - Otimização da distribuição horária de lotes: Dados de Entrada e Formulação Auxiliar

Variáveis de Decisão		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Primeira parte do problema	TU/BS	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	TU/BR	0	0	2	0	0	0	2	0	0	0
	TU/GS	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0
	TU/AL	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0
	TU/FA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	TU/LB	0	2	0	0	2	0	0	2	0	0
	TU/CS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
	TU/FZ	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
	TU/EB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	IC/BS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	IC/BR	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
	IC/GS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	IC/AL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	IC/FA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	IC/LB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	IC/CS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	IC/FZ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	IC/EB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	OB/PG	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	OB/FM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	OB/FA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Segunda parte do problema	TU/LB/JP	0	2	0	0	2	0	0	2	0	0
	TU/LB/CE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	TU/CS/BR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	TU/CS/GS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	TU/CS/ZU	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	TU/CS/AL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	TU/CS/TO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
	TU/CS/FM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	TU/CS/FA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	TU/FZ/AL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	TU/FZ/TO	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	TU/FZ/FM	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	TU/FZ/FA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	TU/EB/FM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	TU/EB/FA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	IC/LB/JP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	IC/LB/CE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	IC/CS/BR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	IC/CS/GS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	IC/CS/ZU	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	IC/CS/AL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	IC/CS/TO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	IC/CS/FM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	IC/CS/FA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	IC/FZ/AL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	IC/FZ/TO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	IC/FZ/FM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	IC/FZ/FA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	IC/EB/FM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	IC/EB/FA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Variáveis auxiliares para que a quantidade de lotes que saem direto de TU/IC ou que chegam ao ponto de transbordo sejam pares	qtu-bs	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	qtu-br	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
	qtu-gs	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	qtu-al	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	qtu-fa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	qtu-eb	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	qic-bs	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	qic-br	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	qic-gs	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	qic-al	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	qic-fa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	qic-lb	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	qic-cs	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	qic-fz	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	qic-eb	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 24 - Otimização da distribuição horária de lotes: Variáveis

Matriz de Fila											
Origem	**Rota**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Saída de TU	TU/BS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	TU/BR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	TU/GS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	TU/AL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	TU/FA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	TU/LB/JP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	TU/LB/CE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	TU/CS/BR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	TU/CS/GS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	TU/CS/ZU	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	TU/CS/AL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	TU/CS/TO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	TU/CS/FM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	TU/CS/FA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	TU/FZ/AL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	TU/FZ/TO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	TU/FZ/FM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	TU/FZ/FA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	TU/EB/FM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	TU/EB/FA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Saída de IC	IC/BS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	IC/BR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	IC/GS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	IC/AL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	IC/FA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	IC/LB/JP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	IC/LB/CE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	IC/CS/BR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	IC/CS/GS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	IC/CS/ZU	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	IC/CS/AL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	IC/CS/TO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	IC/CS/FM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	IC/CS/FA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	IC/FZ/AL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	IC/FZ/TO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	IC/FZ/FM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	IC/FZ/FA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	IC/EB/FM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	IC/EB/FA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Saída de OB	OB/PG	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	OB/FM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	OB/FA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Função Objetivo - Tempo total em fila em horas	**0,00**
Tempo Máximo de fila	**0**

Figura 25 - Otimização da distribuição horária de lotes: Função Objetivo

Soma dos pontos de transbordo - primeira parte do problema igual a segunda parte										
TU										
O que chega em LB, sai de LB	0	2	0	0	2	0	0	2	0	0
	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
	0	2	0	0	2	0	0	2	0	0
O que chega em CS, sai de CS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
O que chega em FZ, sai de FZ	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
O que chega em EB, sai de EB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 26 - Otimização da distribuição horária de lotes: Exemplo de Restrição

A princípio tentou-se rodar o modelo para as 24 horas de distribuição, porém o programa *What'sBest* rodou por mais de 24 horas, sem obter solução. Isso pode ser explicado pela não linearidade do modelo, pela quantidade de variáveis (1.584) e restrições (1.800) e pela obrigatoriedade de todas as variáveis serem inteiras. Além disso, o tempo de processamento varia também com a configuração do computador no qual é rodado o programa. O computador utilizado foi um Servidor IBM System X3650, Model/Type 7979-A1U com 08 processadores Intel Xeon E5310 1,60 GHz, 16 GB de memória RAM PC2-5300, rodando o Windows 2003 Server, Service Pack 2. Como o Excel não utiliza todos os processadores disponíveis para execução dos cálculos, não ocorre melhoria no tempo de processamento para uma configuração de 8 processadores.

Para resolver esse problema, optou-se em um primeiro passo retirar as restrições ligadas às manutenções, para reduzir a quantidade de equações relacionadas ao problema. Porém, ainda assim, o programa não forneceu nenhuma solução.

Uma segunda tentativa foi dividir o problema, sem as manutenções, em 4 turnos de 6 horas. Assim, foi possível obter uma solução viável com resultados ótimos em cada um dos turnos e com tempo de resposta bem razoável, em torno de 25 minutos para os dois primeiros turnos, 5 minutos para o terceiro turno e 1 minuto para o último turno. Uma vez que o problema é dividido em turnos, a cada um deles a demanda é gradativamente absorvida até sua nulidade, restando para o último turno poucas opções de escolha para a distribuição. Isso aumenta a probabilidade da geração de filas nos últimos turnos, uma vez que o programa foi configurado para em cada turno buscar sempre um ótimo global.

Os Anexos 3, 4, 5 e 6 apresentam os relatórios fornecidos pelo programa What'sBest após a obtenção da solução em cada turno. Com isso, gera-se a matriz de saída de trens com o destino de seus lotes nas 24 horas de distribuição, conforme Tabela 5.

Na Tabela 5 apresenta-se para cada ponto de carga a chegada do lote (c), seu início (i) e final de carregamento (f) e o tempo de fila. O tempo total de fila para a distribuição dos 53 lotes para carregamento foi de 1,9 horas.

Tabela 5 - Distribuição horária de trens em 4 turnos de 6 h, sem manutenção

Saída TU	Formação	PT	JP				CE				BS				BR				GS				ZU				AL				TO				FM				FA				PG				
			c	i	f	Fila	c	i	f	Fila	c	i	f	Fila	c	i	f	Fila	c	i	f	Fila	c	i	f	Fila	c	i	f	Fila	c	i	f	Fila	c	i	f	Fila	c	i	f	Fila	c	i	f	Fila	
01:00	TO TO																														17,3	17,3	20,6	**0,0**													
02:00	AL AL																										17,2	17,2	23,4	**0,0**																	
03:00	JP JP	LB	18,4	18,4	21,3	**0,0**																																									
04:00	FA FA																																						20,9	20,9	24,4	**0,0**					
05:00	GS GS																		21,1	21,1	30,4	**0,0**																									
06:00	TO TO	CS																													22,3	22,3	25,6	**0,0**													
07:00	JP CE	LB	22,4	22,4	23,6	**0,0**	22,5	22,5	23,8	**0,0**																																					
08:00	BR BR														23,2	23,2	26,5	**0,0**																													
09:00	CE CE	LB					24,5	24,5	27,6	**0,0**																																					
10:00	TO FM	FZ																													26,3	26,3	27,7	**0,0**	27,3	27,3	31,8	**0,0**									
11:00	JP JP	LB	26,4	26,4	29,3	**0,0**																																									
12:00	BR BR														27,2	27,2	30,5	**0,0**																													
13:00	AL AL																										28,2	28,2	34,4	**0,0**																	
14:00	BS BS										27,7	27,7	34,4	**0,0**																																	
15:00	BR ZU TO														30,9	30,9	32,5	**0,0**					41,8	41,8	47,4	**0,0**					31,3	31,3	32,7	**0,0**													
16:00	CE CE	LB					31,5	31,5	34,6	**0,0**																																					
17:00	JP JP	LB	32,4	32,4	35,3	**0,0**																																									
18:00	GS GS																		34,1	34,1	43,4	**0,0**																									
19:00	BR BR														34,2	34,2	37,5	**0,0**																													
20:00	AL AL																										35,2	35,2	41,4	**0,0**																	
21:00	CE CE JP	LB	36,4	36,4	37,6	**0,0**	36,5	36,5	39,6	**0,0**																																					
22:00	BR BR														37,2	37,5	40,8	**0,3**																													
23:00	JP JP	LB	38,4	38,4	41,3	**0,0**																																									
24:00	BR BR														39,2	40,8	44,1	**1,6**																													
total de lotes origem TU			**10,0**				**7,0**				**2,0**				**11,0**				**4,0**				**1,0**				**6,0**				**6,0**				**1,0**				**2,0**				**0,0**				
Saída IC	**Formação**	**PT**																																													
`07:00	BR BR														11,8	11,8	15,1	**0,0**																													
total de lotes origem IC			**0,0**				**0,0**				**0,0**				**2,0**				**0,0**				**0,0**				**0,0**				**0,0**				**0,0**				**0,0**				**0,0**				
Saída IC	**Formação**	**PT**																																													
24:00	PG																																										25,2	25,2	30,5	**0,0**	
total de lotes origem OB			**0,0**				**0,0**				**0,0**				**0,0**				**0,0**				**0,0**				**0,0**				**0,0**				**0,0**				**0,0**				**1,0**				
TOTAL GERAL LOTES			**10,0**				**7,0**				**2,0**				**13,0**				**4,0**				**1,0**				**6,0**				**6,0**				**1,0**				**2,0**				**1,0**				**53,0**
TOTAL GERAL FILA (HORAS)			**0,0**				**0,0**				**0,0**				**1,9**				**0,0**				**0,0**				**0,0**				**0,0**				**0,0**				**0,0**				**0,0**				**1,9**

Como os tempos de resposta do programa na divisão de turnos foram bem razoáveis tentou-se rodar o problema, ainda em 4 turnos, agora considerando as manutenções como parâmetro de entrada. Obteve-se uma solução também viável e sem aumento dos tempos de processamento. O primeiro turno rodou em aproximadamente 13 minutos, o segundo em 7 minutos, o terceiro em 8 minutos e o quarto em 1 minuto.

Em ambos os casos o tempo de processamento do primeiro turno foi maior, pois existem mais possibilidades de alocações já que se tem a demanda cheia.

Os Anexos 7, 8, 9 e 10 apresentam os relatórios fornecidos pelo programa What'sBest após a obtenção da solução em cada turno, com as manutenções. Com isso, gera-se a matriz de saída de trens com o destino de seus lotes nas 24 horas de distribuição, conforme Tabela 6.

Na Tabela 6 apresenta-se para cada ponto de carga a chegada do lote (c), seu início (i) e final de carregamento (f) e o tempo de fila. O tempo total de fila para a distribuição dos 53 lotes para carregamento foi de 5,9 horas.

Tabela 6 - Distribuição horária de trens em 4 turnos de 6 h, com manutenção

Saída TU	Formação	PT	JP				CE				BS				BR				GS				ZU				AL				TO				FM				FA				PG				
			c	i	f	Fila	c	i	f	Fila	c	i	f	Fila	c	i	f	Fila	c	i	f	Fila	c	i	f	Fila	c	i	f	Fila	c	i	f	Fila	c	i	f	Fila	c	i	f	Fila	c	i	f	Fila	
01:00	BS BS										14,7	14,7	21,4	**0,0**																																	
02:00	JP JP	LB	17,4	17,4	20,3	**0,0**																																									
03:00	BR BR														18,2	18,2	21,5	**0,0**																													
04:00	GS GS																		20,1	20,1	29,4	**0,0**																									
05:00	JP JP	LB	20,4	20,4	23,3	**0,0**																																									
06:00	TO FM	FZ																													22,3	22,3	23,7	**0,0**	23,3	23,3	27,8	**0,0**									
07:00	BR BR														22,2	22,2	25,5	**0,0**																													
08:00	JP JP	LB	23,4	23,4	26,3	**0,0**																																									
09:00	AL AL																										24,2	24,2	30,4	**0,0**																	
10:00	TO TO																														26,3	26,3	29,6	**0,0**													
11:00	JP JP	LB	26,4	26,4	29,3	**0,0**																																									
12:00	BR BR														27,2	27,2	30,5	**0,0**																													
13:00	TO TO ZU	CS																					39,8	39,8	45,4	**0,0**					29,3	29,6	32,9	**0,3**													
14:00	JP CE	LB	29,4	29,4	30,6	**0,0**	29,5	29,5	30,8	**0,0**																																					
15:00	FA FA																																						31,9	31,9	35,4	**0,0**					
16:00	CE CE JP	LB	31,5	31,5	34,6	**0,0**	31,4	31,4	32,6	**0,0**																																					
17:00	BR TO	CS													32,9	32,9	36,2	**0,0**													33,3	33,3	34,7	**0,0**													
18:00	GS GS																		34,1	34,1	43,4	**0,0**																									
19:00	AL AL																										34,2	34,2	40,4	**0,0**																	
20:00	CE CE	LB					35,5	35,5	38,6	**0,0**																																					
21:00	BR BR														36,2	36,2	42,8	**0,0**																													
22:00	AL AL																										38,6	40,4	46,5	**1,8**																	
23:00	CE CE	LB					38,5	38,6	41,8	**0,2**																																					
24:00	BR BR														39,2	42,8	49,4	**3,6**																													
total de lotes origem TU			**10,0**				**7,0**				**2,0**				**11,0**				**4,0**				**1,0**				**6,0**				**6,0**				**1,0**				**2,0**				**0,0**				
Saída IC	**Formação**	**PT**																																													
06:00	BR BR														10,8	10,8	14,1	**0,0**																													
total de lotes origem IC			**0,0**				**0,0**				**0,0**				**2,0**				**0,0**				**0,0**				**0,0**				**0,0**				**0,0**				**0,0**				**0,0**				
Saída IC	**Formação**	**PT**																																													
09:00	PG																																										10,2	10,2	15,5	**0,0**	
total de lotes origem OB			**0,0**				**0,0**				**0,0**				**0,0**				**0,0**				**0,0**				**0,0**				**0,0**				**0,0**				**0,0**				**1,0**				
TOTAL GERAL LOTES			**10,0**				**7,0**				**2,0**				**13,0**				**4,0**				**1,0**				**6,0**				**6,0**				**1,0**				**2,0**				**1,0**				**53,0**
TOTAL GERAL FILA (HORAS)			**0,0**				**0,2**				**0,0**				**3,6**				**0,0**				**0,0**				**1,8**				**0,3**				**0,0**				**0,0**				**0,0**				**5,9**

Como forma de se chegar a um resultado melhor e de se ter uma distribuição mais próxima das 24 horas, o problema foi dividido em dois turnos de 12 horas.

Para as 12 primeiras horas, o programa rodou também por mais de 24 horas sem fornecer solução. Para contornar esse problema, foi utilizada uma solução inicial para o problema, considerando aquela fornecida nos dois primeiros turnos de 6 horas incluindo as manutenções. O problema confirmou essa solução como a ótima, já que não houve geração de fila para esse período. Nas outras 12 horas, não foi sugerida nenhuma solução inicial e o problema conseguiu obter um ótimo global para esse período com o um tempo de processamento de 27 minutos.

Os Anexos 11 e 12 apresentam os relatórios fornecidos pelo programa What'sBest após a obtenção da solução dos dois turnos de 12 horas, com as manutenções. Com isso, gera-se a matriz de saída de trens com o destino de seus lotes nas 24 horas de distribuição, conforme Tabela 7.

Na Tabela 7 apresenta-se para cada ponto de carga a chegada do lote (c), seu início (i) e final de carregamento (f) e o tempo de fila. O tempo total de fila para a distribuição dos 53 lotes para carregamento foi de 4,8 horas.

Tabela 7 - Distribuição horária de trens em 2 turnos de 12 h, com manutenção

Saída TU	Formação	PT	JP				CE				BS				BR				GS				ZU				AL				TO				FM				FA				PG				
			c	i	f	Fila	c	i	f	Fila	c	i	f	Fila	c	i	f	Fila	c	i	f	Fila	c	i	f	Fila	c	i	f	Fila	c	i	f	Fila	c	i	f	Fila	c	i	f	Fila	c	i	f	Fila	
01:00	BS BS										14,7	14,7	21,4	**0,0**																																	
02:00	JP JP	LB	17,4	17,4	20,3	**0,0**																																									
03:00	BR BR														18,2	18,2	21,5	**0,0**																													
04:00	GS GS																		20,1	20,1	29,4	**0,0**																									
05:00	JP JP	LB	20,4	20,4	23,3	**0,0**																																									
06:00	TO FM	FZ																													22,3	22,3	23,7	**0,0**	23,3	23,3	27,8	**0,0**									
07:00	BR BR														22,2	22,2	25,5	**0,0**																													
08:00	JP JP	LB	23,4	23,4	26,3	**0,0**																																									
09:00	AL AL																										24,2	24,2	30,4	**0,0**																	
10:00	TO TO																														26,3	26,3	29,6	**0,0**													
11:00	JP JP	LB	26,4	26,4	29,3	**0,0**																																									
12:00	BR BR														27,2	27,2	30,5	**0,0**																													
13:00	ZU TO	CS																					39,8	39,8	45,4	**0,0**					29,3	29,6	31,0	**0,3**													
14:00	JP CE	LB	29,4	29,4	30,6	**0,0**	29,5	29,5	30,8	**0,0**																																					
15:00	CE CE	LB					30,5	30,8	34,0	**0,3**																																					
16:00	TO TO BR	CS													31,9	31,9	33,5	**0,0**													32,3	32,3	35,6	**0,0**													
17:00	AL AL																										32,2	32,2	38,4	**0,0**																	
18:00	CE CE	LB					33,5	34,0	37,1	**0,5**																																					
19:00	GS GS																		35,1	35,1	44,4	**0,0**																									
20:00	FA FA	LB																																					40,3	40,3	43,8	**0,0**					
21:00	BR BR														36,2	36,2	42,8	**0,0**																													
22:00	AL AL																										38,6	38,6	44,8	**0,0**																	
23:00	CE CE JP	LB	38,4	38,4	39,6	**0,0**	38,5	38,5	39,6	**0,0**																																					
24:00	BR BR														39,1	42,8	49,4	**3,7**																													
total de lotes origem TU			**10,0**				**7,0**				**2,0**				**11,0**				**4,0**				**1,0**				**6,0**				**6,0**				**1,0**				**2,0**				**0,0**				
Saída IC	**Formação**	**PT**																																													
06:00	BR BR														10,8	10,8	14,1	**0,0**																													
total de lotes origem IC			**0,0**				**0,0**				**0,0**				**2,0**				**0,0**				**0,0**				**0,0**				**0,0**				**0,0**				**0,0**				**0,0**				
Saída IC	**Formação**	**PT**																																													
09:00	PG																																										10,2	10,2	15,5	**0,0**	
total de lotes origem OB			**0,0**				**0,0**				**0,0**				**0,0**				**0,0**				**0,0**				**0,0**				**0,0**				**0,0**				**0,0**				**1,0**				
TOTAL GERAL LOTES			**10,0**				**7,0**				**2,0**				**13,0**				**4,0**				**1,0**				**6,0**				**6,0**				**1,0**				**2,0**				**1,0**				**53,0**
TOTAL GERAL FILA (HORAS)			**0,0**				**0,8**				**0,0**				**3,7**				**0,0**				**0,0**				**0,0**				**0,3**				**0,0**				**0,0**				**0,0**				**4,8**

Na Tabela 8 é apresentado um resumo de todos os testes realizados com o programa What'sBest.

Tabela 8 - Resultados dos Cenários de Distribuição

Distribuição	Horários		Qtde Variáveis	Qtde Inteiros	Qtde Restrições	Tempo de Processamento	Tipo de Solução	Tempo fila (h)	Fila máxima (h)
Sem manutenções	Turno 1 (00:00 h às 06:00 h)	Sem solução inicial	409	409	541	00:23:26	Ótimo Global	0,0	0,0
	Turno 2 (06:00 h às 12:00 h)	Sem solução inicial	409	409	541	00:28:38	Ótimo Global	0,0	0,0
	Turno 3 (12:00 h às 18:00 h)	Sem solução inicial	409	409	541	00:05:00	Ótimo Global	0,0	0,0
	Turno 4 (18:00 h às 24:00 h)	Sem solução inicial	396	396	504	00:01:04	Ótimo Global	1,9	1,6
Total						**0:58:08**		**1,9**	**1,6**
Com manutenções	Turno 1 (00:00 h às 06:00 h)	Sem solução inicial	409	409	541	00:13:24	Ótimo Global	0,0	0,0
	Turno 2 (06:00 h às 12:00 h)	Sem solução inicial	409	409	541	00:06:51	Ótimo Global	0,0	0,0
	Turno 3 (12:00 h às 18:00 h)	Sem solução inicial	409	409	541	00:08:10	Ótimo Global	0,3	0,3
	Turno 4 (18:00 h às 24:00 h)	Sem solução inicial	396	396	504	00:01:26	Ótimo Global	5,6	3,6
Total						**0:29:51**		**5,9**	**3,9**
Com manutenções	Turno 1 (00:00 h às 12:00 h)	Com solução inicial	805	805	973	00:21:11	Ótimo Global	0,0	0,0
	Turno 2 (12:00 às 24:00 h)	Sem solução inicial	792	792	936	00:27:06	Ótimo Global	4,8	3,6
Total						**0:48:17**		**4,8**	**3,6**

Em todos os cenários apresentados na Tabela 8 a tolerância máxima de violação de restrições parametrizada no programa *What's Best* é de 0,01%.

Analisando os resultados obtidos verifica-se que o tempo de fila no cenário de 4 turnos com as manutenções é maior do que o cenário de 4 turnos sem as manutenções, o que já era esperado, uma vez que no primeiro caso existem menos opções de distribuição sem a geração de filas.

Já a solução encontrada para os dois turnos de 12 horas foi melhor do que aquela para os quatro turnos de 6 horas, ambas com manutenções, pois otimizou um maior tempo de distribuição (12 horas finais).

Apesar do cenário sem manutenções ter fornecido um menor tempo de fila, não é interessante implementá-lo na distribuição, pois despreza as perdas pela indisponibilidade do sistema e que hoje é de extrema relevância.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O problema de alocação de lotes vazios é extremamente complexo, especialmente pela quantidade de variáveis existentes e pela série de restrições físicas e operacionais apresentadas na malha ferroviária.

Uma dificuldade encontrada é a inserção da variável tempo na resolução deste problema. Na literatura estudada, vários autores utilizam o conceito de rede espaço/tempo e desenvolvem heurísticas próprias para a resolução do problema, sempre considerando o tempo como uma variável dinâmica. Não foi encontrada nenhuma abordagem na literatura que pudesse ser aplicada ao problema em questão, uma vez que cada sistema possui características específicas. Assim, optou-se por modelar o problema e utilizar um aplicativo de otimização para resolvê-lo.

Neste trabalho foi apresentado um estudo de caso para o problema de alocação horária de vagões vazios na Estrada de Ferro Vitória a Minas da Vale. Conceituou-se o problema com suas restrições operacionais e as variáveis envolvidas.

Em um primeiro passo o problema foi modelado e resolvido como uma rede de transportes com transbordo e a distribuição diária de lotes vazios foi otimizada, considerando as origens, pontos de transbordo e destino dos lotes para carregamento, sem envolvimento da variável tempo. Em uma segunda etapa, foi utilizado o resultado dessa distribuição diária para a alocação de lotes a trens, especificando suas origens/destinos, horários de chegada no ponto de carga e fim de carregamento, obtendo-se um plano de trens (Tabelas 5, 6 e 7) para atendimento a um programa diário de carregamento.

Apesar de não ter sido possível otimizar o problema como um todo, devido à grande quantidade de variáveis e restrições, foi possível otimizar o tamanho da fila nos pontos de carga em dois turnos de 12 horas em um tempo de aproximada 1 hora, o que é razoável se considerarmos que o plano de distribuição é realizado no dia anterior ao envio dos trens. Esse já é um bom cenário de distribuição, já que se

aproxima da realidade de distribuição nas 24 horas e pode balizar os programadores na melhor alternativa para evitar a formação de filas.

Reduzir o tempo de fila no ponto de carga reflete positivamente no ciclo, já que o tempo despendido na atividade de carregamento faz parte do tempo total do ciclo de vagões.

Isso é de relevante importância, tendo em vista que a realização de ciclos cada vez maiores significa maior tempo de ativo parado e redução de produtividade. A cada hora de acréscimo no ciclo médio mensal, há uma redução em média no transporte de 140.000 toneladas de minério ao mês, ou seja, 21 lotes deixam de ser carregados, considerando que cada vagão possui capacidade para 79 toneladas líquidas de minério. Isso representa cerca de 1,5% do programa de transporte mensal de minério da companhia e uma perda mensal de receita de aproximadamente US$ 10.000.000,00, considerando que cada tonelada de minério é vendida no mercado por US$ 70,00 (FOLHA ONLINE, acesso em 28 jul. 2009). Com a aplicação do algoritmo proposto a cada hora de redução no ciclo na distribuição diária, essa perda se converte em ganho para o sistema.

Além dos ganhos de volume com diminuição do ciclo na malha, aumento da produtividade e redução da quantidade de ativos, o trabalho contribui para padronizar e agilizar a distribuição de lotes para carregamento pelos programadores e para reduzir o congestionamento na malha ferroviária.

O conhecimento obtido para realização da modelagem do problema é uma outra contribuição do trabalho realizado que pode ser expandido para analisar outros problemas existentes na ferrovia, tais como produtividade das minas, gargalos operacionais, produtividade das manutenções entre outros.

Para dar seguimento ao trabalho recomenda-se testar a aplicação do software de otimização em um computador com maior performance de processamento para as 24 horas de distribuição, sem que haja a necessidade de dividir o problema em turnos. Outra sugestão é pesquisar um aplicativo computacional que realize a

otimização usando outros algoritmos de solução, como por exemplo, o Algoritmo Genético.

No presente trabalho foram consideradas somente as atividades relacionadas com o movimento de subida dos trens, no sentido origem/ponto de carregamento, verificando os impactos no ciclo do vagão. Recomenda-se como estudo futuro que seja realizada também a distribuição no sentido ponto de carregamento/cliente, ou seja, a distribuição dos lotes carregados. Assim, poderá ser avaliado o impacto em todas as atividades que compõem o ciclo, fechando-se o circuito.

Outra recomendação é a inserção de parâmetros probabilísticos, no que diz respeito aos tempos do ativo parado na ferrovia, devido às ocorrências ferroviárias (acidentes, problemas operacionais etc) e às paradas nos cruzamentos de trens, que afetam diretamente nos tempos de percurso dos trem e que não foram considerados nesse trabalho.

7 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT). **Concessões Ferroviárias.** Disponível em: <http://www.antt.gov.br/> Acesso em: 12 fev. 2008.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTADORES FERROVIÁRIOS (ANTF). **Informações do Setor/ Cronologia Histórica Ferroviária**. Disponível em: <http://www.antf.org.br/> Acesso em: 15 jun. 2008.

ASSAD, A. A. Models for rail transportation. **Transportation Research – A**:, s.l.: v. 14A, p.205-220, 1980.

BANDEIRA, D. L. **Alocação e movimentação de contêineres vazios e cheios – um modelo integrado e sua aplicação**. 2005. 134 p. – Tese - Programa de Pós-Graduação em Administração - Grupo de Estudos em Sistemas de Informação e de Apoio à Decisão, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS.

BARROS, A. L. M. **Distribuição Horária de Lotes de Vagões GDE para Carregamento de Minério na EFVM.** 2008. 53 p. – Monografia – Curso de Especialização de Transporte Ferroviário de Carga, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro – RJ.

BUENO, C. **Planejamento Operacional de Refinarias.** 2003. 126 p. – Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC.

CALDARA, A. **Um sistema de Otimização para Alocação de Vagões Vazios em Ferrovias.** 1996. 117 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória - ES.

CIRILO, J. A., Programação Linear Aplicada a Recursos Hídricos, In: PORTO, R.L.L. et al., **Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos**. ABRH, 1ª edição, pp. 305-356, Editora da Universidade – UFRGS, 1997.

CRAINIC, T.G. **A Survey of optimization models for long-haul freight transportation.** CRT-2002-05. Montreal: 2002. Disponível em: <http://www.crt.umontreal.ca/~theo/cours/longhaul.pdf>. Acesso em: 21 fev. 2008. 82 p.

EHRLICH, P. J., **Pesquisa Operacional: curso introdutório**, 7ª edição, 322 p., Editora Atlas S.A, 1991.

FOLHA ONLINE. **Notícias/ Dinheiro**. Disponível em: <http://www.folha.com..br/> Acesso em: 28 jul. 2009.

GOLDBARG, M.C.; LUNA, H.P.L. **Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos**. 5ª tiragem, Rio de Janeiro: Ed. Campus, 2000.

GRAIN, M. T. F. **Otimização da Distribuição de Vagões**. 1985. 98 p. Dissertação (Mestrado em Ciências e Transporte) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro – RJ.

HAFFNER, S. Programação Inteira e Inteira Mista. Disponível em <http://slhaffner.phpnet.us/introducao_a_otimizacao/io5.pdf>. Acesso em: 24 out 2009.

HAGHANI, A. E. Rail Freight Transportation: A Review of Recent Optimization Models for Train Routing and Empty Car Distribution, **Journal of Advanced Transportations**, 21:2., 1987.

HAMACHER, F. C. Logística Ferroviária: Resolução do Problema de Alocação Ótima de Vagões e Locomotivas. 2005. 58 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ.

JORDAN, W. C. ; TURNQUIST, M. A. A Stochastic Dynamic Network Model for Railroad Car Distribution. **Transportation Science**, 17:123-145, 1983.

LINDO SYSTEMS. **What'sBest User's Manual** > Disponível em: http://www.lindo.com/ > Acesso em: 01 ago 2009.

MATEUS, G.R.; LUNA, H.P.L. **Programação Não Linear.** Escola de Computação - Belo Horizonte: 1986.

MELO, M. C. V. de; **Programação Linear Inteira aplicada no Planejamento da Alocação de Vagões de Carga.** 2008. 94 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza – CE.

NOVAES, A. G., **Métodos de Otimização: Aplicação aos Transportes**. São Paulo: Ed. Edgard Blücher Ltda, 1978.

PLANO NACIONAL DE LOGÍSTICA E TRANSPORTES (PNLT) – Relatório Executivo, Abril 2007 > Disponível em http://www.transportes.gov.br/PNLT/CD_RE/Index.htm > Acesso em 20 ago 2008.

ROSAL, M. C. F.; **Programação não-linear aplicada à otimização de redes pressurizadas de distribuição de carga.** 2007. 118 p. Dissertação (Mestrado em em Ciência em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE.

VALE. **Nossos Negócios/ Logística/ Histórico de Ferrovias**. Disponível em: http://www.vale.com >. Acesso em: 15 jun. 2008.

WHITE, W. W.; BOMBERAULT, A. M. A Network Algorithm for Empty Freight Car Allocation. **IBM Syst. Journal 8**, p. 147-169, 1969.

ZHANG, X.; FENG, M.; ZHANG, Z. Study on an optimized modeland and algorithm of railway empty wagon distribution in China. **Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies**, Beijing, v. 5, p.277-291, 2003.

ANEXOS

ANEXO 1 – Programa D+1 de carregamento nas minas

Em destaque: quantidade de lotes programados por Ponto de Carga

GEPQS/GAPGS - PROGRAMAÇÃO DIÁRIA DE CARREGAMENTOS SISTEMA SUDESTE — segunda-feira — 21/07/2008

TURNO	ETA	R	Nº	MINÉRIO	PRODUTO	PILHA	PLP	EVENTOS DE PARADAS
				CAUÊ				
00/06	03:00	1	1,00	SECA	SSFT	804395	23:40	Carreg. em lote
								META
	05:00	V	1,00	PECA	ITB	2296	01:40	B.Log
06/12	07:00	N	1,00	PCCA	KBC	1060	03:40	
	09:00	V	1,00	PECA	USV	2461	05:40	
	11:00	1	1,00	SECA	SFIT	804441	07:40	
12/18	13:00	1	1,00	PCCA	SFOT	804471	09:40	
	15:00	1	1,00	FSCA	SFIT	804392	11:40	
18/24	18:00	V	1,00	PECA	USV	3714	14:40	
	20:00	1	1,00	SECA	SFIT	804392	16:40	
	21:00	N	1,00	PCCA	NIB	2170	17:40	
00/06								
06/12				NBCA	CIG/IBI			
12/18								
18/24								

TURNO	ETA	R	Nº	MINÉRIO	PRODUTO	PILHA	PLP	EVENTOS
				TIMBOPEBA/FAB. NOVA				
00/06								Carreg. em lote
	01:00	1	1,00	SFFN	SSFT	804352	05:40	META
								B.Log
	05:00	22	1,00	SFFN	SSFT	804349	09:40	
06/12								
	11:00	1	1,00	PXFN	PFIT	804354	15:40	
	04:00	V	1,00	PEFN	HIS	2461	08:40	
12/18								
	16:00	N	1,00	PXFN	NIB	2170	20:40	
18/24								
00/06	00:00		1,00	NPFN	CST		04:40	
06/12								
12/18								
18/24	19:00		1,00	SFFN	USM		14:40	

TURNO	ETA	R	Nº	MINÉRIO	PRODUTO	PILHA	PLP	EVENTOS
				GONGO SOCO				
00/06								Carreg. em lote
	05:00	1	1,00	FCGS	SSFT	804352	13:50	META
06/12	06:00	1	0,50	FCGS	SFOT	804499	14:50	B.Log
	06:00	1	0,50	SCGS	SFOT	804499	14:50	
12/18	CARREGAR SCGS 0,5 LOTE POR VEZ							
	17:00	1	0,50	SCGS	SFOT	804318	01:50	
18/24	18:00	1	0,50	FCGS	SFOT	804318	02:50	
	18:00	1	1,00	FCGS	SSFT	804395	02:50	
00/06								
06/12								
12/18								
18/24								

TURNO	ETA	R	Nº	MINÉRIO	PRODUTO	PILHA	PLP	EVENTOS
				ALEGRIA				
00/06	01:00	1	1,00	SHAL	SSFT	804395	06:50	Carreg. em lote
	03:00	1	1,00	SIAL	SSFT	804395	08:50	META
06/12								B.Log
12/18	12:00	V	1,00	PEAL	USV	3714	17:50	
	15:00	P2	1,00	NPAL	LOBT	80449O	20:50	
18/24								
00/06								
06/12	12:00		0,50	SIAL	CST		17:50	
12/18	12:00		0,50	SHAL	CST		17:50	
18/24								

TURNO	ETA	R	Nº	MINÉRIO	PRODUTO	PILHA	PLP	EVENTOS
				FABRICA				
00/06								Carreg. em lote
	03:00	22	1,00	AF52	AF52	804487	11:45	META
06/12	TENTAR CARREGAR MAIS AF52							B.Log
	11:00	22	1,00	AF52	AF52	804487	19:45	
12/18								
18/24	18:00	21	1,00	FA 5,5	SBB	807HFB	02:45	
00/06								
06/12	11:00		1,00	SFFA	ACO		20:45	
12/18								
18/24								

TURNO	ETA	R	Nº	MINÉRIO	PRODUTO	PILHA	PLP	EVENTOS
				AZURITA				
00/06								Carreg. em lote
06/12	BUSCAR 2 LOTES NO DIA							META
12/18	15:00	22	1,00	SFJS	SSFT	804396	20:00	B.Log
18/24								

ETA	Nº	MINÉRIO	PRODUTO	PILHA	R	PLP	EVENTOS DE PARADAS
		CONCEIÇÃO					
							Carreg. em lote
02:00	1,00	PECE	HIS	2451	V	22:50	META
							B.Log
05:00	1,00	SECE	SSFT	804352	1	01:50	
07:00	1,00	PECE	KBC	1060	N	03:50	21/jul
15:00	1,00	PECE	KBC	1060	N	11:50	
17:00	1,00	PRCE	SSFT	804395	1	13:50	06:00 ÀS 20:00
18:00	1,00	PECE	USV	3714	V	14:50	EMP 6701
00:00	1,00	SMCE	USM			14:50	
16:00	1,00	STCE	CST			12:50	
19:00	1,00	SMCE	USM			09:50	

ETA	Nº	MINÉRIO	PRODUTO	PILHA	R	PLP	EVENTOS
		BRUCUTU					
02:00	1,00	FSBR	KBC	1060	N	07:30	Carreg. em lote
02:00	1,00	FSBR	SFOT	804471	1	07:30	META
							B.Log
06:00	1,00	FSBR	SFOT	804318	1	11:30	
06:00	1,00	FSBR	SFOT	804318	1	11:30	
10:00	1,00	SFBR	SSFT	804395	1	15:30	21/jul
16:00	1,00	PEBR	PFIT	804354	1	21:30	
16:00	1,00	PEBR	NIB	2170	N	21:30	
18:00	1,00	SFBR	SSFT	804393	21	23:30	
18:00	1,00	SFBR	SFIT	804441	1	23:30	07:00 AS 19:00
	1,00	STBR	CST			05:30	SILO 1 E BW 9819

ETA	Nº	MINÉRIO	PRODUTO	PILHA	R	PLP	EVENTOS
		BICAS					
							Carreg. em lote
							META
							B.Log
		VERIFICAR ESTOQUES					
16:00	1,00	SFMA	SSFT	804394	1	16:50	
18:00	1,00	PCMA	SSFT	804349	22	18:50	

ETA	Nº	MINÉRIO	PRODUTO	PILHA	R	PLP	EVENTOS
		FÁBRICA MURO/PIRES					
							Carreg. em lote
							META
							B.Log

ETA	Nº	MINÉRIO	PRODUTO	PILHA	R	PLP	EVENTOS
		PATRAG					
							Carreg. em lote
							META
							B.Log

ETA	Nº	MINÉRIO	PRODUTO	PILHA	R	PLP	EVENTOS
16:00	1,00	NPSZ	USM			16:00	

LOTES ALÉM DO PROGRAMA			LOTES AQUÉM DA OFERTA		
1º	FA	SF52	1º	-	-
2º	BR	SFBR	2º	-	-
3º			3º	-	-

		TURNO
CAUÊ		00 / 06
MI	0,00	06 / 12
POT	10,00	12 / 18
CA	10,00	18 / 24
CONCEIÇÃO		00 / 06
MI	3,00	06 / 12
POT	6,00	12 / 18
CE	9,00	18 / 24

TURNO	T1
00 / 06	7,00
06 / 12	6,00
12 / 18	5,50
18 / 24	3,50
TOTAL	22,00

		TURNO
TIMBOPEBA		00 / 06
MI	2,00	06 / 12
POT	5,00	12 / 18
TO	7,00	18 / 24
BRUCUTU		00 / 06
MI	1,00	06 / 12
POT	9,00	12 / 18
BR	10,00	18 / 24
GONGO SOCO		00 / 06
MI	0,00	06 / 12
POT	4,00	12 / 18
GS	4,00	18 / 24
ÁGUA LIMPA		00 / 06
MI	0,00	06 / 12
POT	2,00	12 / 18
BS	2,00	18 / 24
ALEGRIA		00 / 06
MI	1,00	06 / 12
POT	4,00	12 / 18
AL	5,00	18 / 24
FÁBRICA		00 / 06
MI	1,00	06 / 12
POT	3,00	12 / 18
FA	4,00	18 / 24
PIRES		00 / 06
MI	0,00	06 / 12
POT	0,00	12 / 18
FM	0,00	18 / 24
PATRAG		00 / 06
MI	1,00	06 / 12
POT	0,00	12 / 18
PG	1,00	18 / 24
AZURITA		00 / 06
MI	0,00	06 / 12
POT	1,00	12 / 18
ZU	1,00	18 / 24

	TOTAL	AMANHÃ
MI	9,00	9,00
POT	44,00	46,00
TOT	53,00	55,00

ANEXO 2 – Relatório do programa What'sBest para a distribuição diária

```
What'sBest!® 9.0.4.1 (Jul 01, 2009) - Library 5.0.1.411 - Status Report -

DATE GENERATED:       nov 08, 2009          10:21 PM


MODEL INFORMATION:

  CLASSIFICATION DATA            Current   Capacity Limits
  ---------------------------------------------------------
  Numerics                          559
  Variables                         243
  Adjustables                        55         Unlimited
  Constraints                        71         Unlimited
  Integers/Binaries                55/0         Unlimited
  Globals                             8         Unlimited
  Coefficients                      695

  Minimum coefficient value:        0.33333333333333  on Dist_diaria!E22
  Minimum coefficient in formula:   Dist_diaria!K79
  Maximum coefficient value:        1016  on Dist_diaria!E29
  Maximum coefficient in formula:   Dist_diaria!H2

MODEL TYPE:              Mixed Integer / Nonlinear

SOLUTION STATUS:         GLOBALLY OPTIMAL

OPTIMALITY CONDITION:    SATISFIED

OBJECTIVE VALUE:         47922

DIRECTION:               Minimize

SOLVER TYPE:             Global

TRIES:                   18

INFEASIBILITY:           4.4408920985006e-016

BEST OBJECTIVE BOUND:    47922

STEPS:                   0

ACTIVE:                  0

SOLUTION TIME:           0 Hours  0 Minutes  0 Seconds

NON-DEFAULT SETTINGS:

  General Options / Warning Infeasible Constraint:   On
  General Options / Warning Support Lookup Functions:   Off
  Global Solver Options / Strategy Global Solver:   On
```

ANEXO 3 – Relatório do programa What'sBest para o turno 1 – sem manutenção

```
What'sBest!® 9.0.4.1 (Jul 01, 2009) - Library 5.0.1.411 - Status Report -

DATE GENERATED:       nov 26, 2009          11:44 PM


MODEL INFORMATION:

  CLASSIFICATION DATA            Current   Capacity Limits
  ---------------------------------------------------------
  Numerics                         2016
  Variables                        3084
  Adjustables                       409         Unlimited
  Constraints                       541         Unlimited
  Integers/Binaries                409/0         Unlimited
  Globals                           876         Unlimited
  Coefficients                    11345

  Minimum coefficient value:        0.5  on Dist1!E790
  Minimum coefficient in formula:   Dist1!M459
  Maximum coefficient value:        54  on <RHS>
  Maximum coefficient in formula:   Dist1!I773

MODEL TYPE:             Mixed Integer / Nonlinear

SOLUTION STATUS:        GLOBALLY OPTIMAL

OPTIMALITY CONDITION:   SATISFIED

OBJECTIVE VALUE:        -3.9883651936638e-012

DIRECTION:              Minimize

SOLVER TYPE:            Global

TRIES:                  1645058

INFEASIBILITY:          0

BEST OBJECTIVE BOUND:   -3.9883651936638e-012

STEPS:                  6179

ACTIVE:                 0

SOLUTION TIME:          0 Hours 23 Minutes 26 Seconds

NON-DEFAULT SETTINGS:

  General Options / Solver Feasibility Tolerance:   1.000000e-004
  General Options / Warning Infeasible Constraint:   On
  Global Solver Options / Strategy Global Solver:   On
```

ANEXO 4 – Relatório do programa What'sBest para o turno 2 – sem manutenção

```
What'sBest!® 9.0.4.1 (Jul 01, 2009) - Library 5.0.1.411 - Status Report -

DATE GENERATED:       nov 27, 2009          12:50 AM


MODEL INFORMATION:

  CLASSIFICATION DATA            Current   Capacity Limits
  ---------------------------------------------------------
  Numerics                         1797
  Variables                        3084
  Adjustables                       409         Unlimited
  Constraints                       541         Unlimited
  Integers/Binaries               409/0         Unlimited
  Globals                           875         Unlimited
  Coefficients                    11325

  Minimum coefficient value:        0.5  on Dist2!E790
  Minimum coefficient in formula:   Dist2!M459
  Maximum coefficient value:        36  on <RHS>
  Maximum coefficient in formula:   Dist2!I773

MODEL TYPE:             Mixed Integer / Nonlinear

SOLUTION STATUS:        GLOBALLY OPTIMAL

OPTIMALITY CONDITION:   SATISFIED

OBJECTIVE VALUE:        -4.4977355173618e-012

DIRECTION:              Minimize

SOLVER TYPE:            Global

TRIES:                  1521072

INFEASIBILITY:          0

BEST OBJECTIVE BOUND:   -4.4977355173618e-012

STEPS:                  5764

ACTIVE:                 0

SOLUTION TIME:          0 Hours 28 Minutes 38 Seconds

NON-DEFAULT SETTINGS:

  General Options / Solver Feasibility Tolerance:   1.000000e-004
  General Options / Warning Infeasible Constraint:   On
  Global Solver Options / Strategy Global Solver:   On
```

ANEXO 5 – Relatório do programa What'sBest para o turno 3 – sem manutenção

```
What'sBest!® 9.0.4.1 (Jul 01, 2009) - Library 5.0.1.411 - Status Report -

DATE GENERATED:       nov 30, 2009          06:33 PM


MODEL INFORMATION:

  CLASSIFICATION DATA            Current   Capacity Limits
  ---------------------------------------------------------
  Numerics                         1784
  Variables                        2956
  Adjustables                       396         Unlimited
  Constraints                       504         Unlimited
  Integers/Binaries               396/0         Unlimited
  Globals                           856         Unlimited
  Coefficients                    11062

  Minimum coefficient value:        1  on Dist4!C392
  Minimum coefficient in formula:   Dist4!C45
  Maximum coefficient value:        6  on <RHS>
  Maximum coefficient in formula:   Dist4!J393

MODEL TYPE:              Mixed Integer / Nonlinear

SOLUTION STATUS:         GLOBALLY OPTIMAL

OPTIMALITY CONDITION:    SATISFIED

OBJECTIVE VALUE:         1

DIRECTION:               Minimize

SOLVER TYPE:             Global

TRIES:                   41177

INFEASIBILITY:           0

BEST OBJECTIVE BOUND:    1.8999999998028

STEPS:                   186

ACTIVE:                  0

SOLUTION TIME:           0 Hours  1 Minutes  4 Seconds

NON-DEFAULT SETTINGS:

  General Options / Solver Feasibility Tolerance:   1.000000e-004
  General Options / Warning Infeasible Constraint:   On
  Global Solver Options / Strategy Global Solver:   On
```

ANEXO 6 – Relatório do programa What'sBest para o turno 4 – sem manutenção

```
What'sBest!® 9.0.4.1 (Jul 01, 2009) - Library 5.0.1.411 - Status Report -

DATE GENERATED:       nov 30, 2009          04:06 PM


MODEL INFORMATION:

  CLASSIFICATION DATA            Current   Capacity Limits
  ---------------------------------------------------------
  Numerics                         1889
  Variables                        3071
  Adjustables                       409         Unlimited
  Constraints                       541         Unlimited
  Integers/Binaries               409/0         Unlimited
  Globals                           876         Unlimited
  Coefficients                    11318

  Minimum coefficient value:        1  on Dist3!C392
  Minimum coefficient in formula:   Dist3!C45
  Maximum coefficient value:        18  on <RHS>
  Maximum coefficient in formula:   Dist3!I773

MODEL TYPE:             Mixed Integer / Nonlinear

SOLUTION STATUS:        GLOBALLY OPTIMAL

OPTIMALITY CONDITION:   SATISFIED

OBJECTIVE VALUE:        -2.3856472353148e-012

DIRECTION:              Minimize

SOLVER TYPE:            Global

TRIES:                  36719

INFEASIBILITY:          0

BEST OBJECTIVE BOUND:   -4.6807002718202e-012

STEPS:                  0

ACTIVE:                 0

SOLUTION TIME:          0 Hours  5 Minutes  0 Seconds

NON-DEFAULT SETTINGS:

  General Options / Solver Feasibility Tolerance:   1.000000e-004
  General Options / Warning Infeasible Constraint:   On
  Global Solver Options / Strategy Global Solver:   On
```

ANEXO 7 – Relatório do programa What'sBest para o turno 1 – com manutenção

```
What'sBest!® 9.0.4.1 (Jul 01, 2009) - Library 5.0.1.411 - Status Report -

DATE GENERATED:       nov 26, 2009          04:31 PM


MODEL INFORMATION:

  CLASSIFICATION DATA            Current   Capacity Limits
  ---------------------------------------------------------
  Numerics                         2210
  Variables                        3638
  Adjustables                       409         Unlimited
  Constraints                       541         Unlimited
  Integers/Binaries               409/0         Unlimited
  Globals                          1430         Unlimited
  Coefficients                    13007

  Minimum coefficient value:        0.5  on Dist1!E814
  Minimum coefficient in formula:   Dist1!M482
  Maximum coefficient value:        54  on <RHS>
  Maximum coefficient in formula:   Dist1!I797

MODEL TYPE:              Mixed Integer / Nonlinear

SOLUTION STATUS:         GLOBALLY OPTIMAL

OPTIMALITY CONDITION:    SATISFIED

OBJECTIVE VALUE:         -5.3212989570289e-012

DIRECTION:               Minimize

SOLVER TYPE:             Global

TRIES:                   452314

INFEASIBILITY:           0

BEST OBJECTIVE BOUND:    -5.3212989570289e-012

STEPS:                   1278

ACTIVE:                  0

SOLUTION TIME:           0 Hours 13 Minutes 24 Seconds

NON-DEFAULT SETTINGS:

  General Options / Solver Feasibility Tolerance:   1.000000e-004
  General Options / Warning Infeasible Constraint:   On
  Global Solver Options / Strategy Global Solver:   On
  Global Solver Options / Tolerance Optimality:   1.000000e-003
  Integer Solver Options / Optimality Relative:   5.000000e-003
```

ANEXO 8 – Relatório do programa What'sBest para o turno 2 – com manutenção

```
What'sBest!® 9.0.4.1 (Jul 01, 2009) - Library 5.0.1.411 - Status Report -

DATE GENERATED:       nov 26, 2009          05:58 PM


MODEL INFORMATION:

  CLASSIFICATION DATA            Current   Capacity Limits
  ---------------------------------------------------------
  Numerics                         2157
  Variables                        3638
  Adjustables                       409         Unlimited
  Constraints                       541         Unlimited
  Integers/Binaries               409/0         Unlimited
  Globals                          1430         Unlimited
  Coefficients                    12989

  Minimum coefficient value:        0.5  on Dist2!E814
  Minimum coefficient in formula:   Dist2!M482
  Maximum coefficient value:        36  on <RHS>
  Maximum coefficient in formula:   Dist2!I797

MODEL TYPE:              Mixed Integer / Nonlinear

SOLUTION STATUS:         GLOBALLY OPTIMAL

OPTIMALITY CONDITION:    SATISFIED

OBJECTIVE VALUE:         -4.2472692030064e-012

DIRECTION:               Minimize

SOLVER TYPE:             Global

TRIES:                   100377

INFEASIBILITY:           0

BEST OBJECTIVE BOUND:    -4.2472692030064e-012

STEPS:                   1215

ACTIVE:                  0

SOLUTION TIME:           0 Hours  6 Minutes 51 Seconds

NON-DEFAULT SETTINGS:

  General Options / Solver Feasibility Tolerance:   1.000000e-004
  General Options / Warning Infeasible Constraint:   On
  Global Solver Options / Strategy Global Solver:   On
```

ANEXO 9 – Relatório do programa What'sBest para o turno 3 – com manutenção

```
What'sBest!® 9.0.4.1 (Jul 01, 2009) - Library 5.0.1.411 - Status Report -

DATE GENERATED:       nov 26, 2009          06:28 PM


MODEL INFORMATION:

  CLASSIFICATION DATA            Current   Capacity Limits
  ---------------------------------------------------------
  Numerics                         2200
  Variables                        3638
  Adjustables                       409         Unlimited
  Constraints                       541         Unlimited
  Integers/Binaries               409/0         Unlimited
  Globals                          1430         Unlimited
  Coefficients                    13019

  Minimum coefficient value:        0.5  on Dist1!E814
  Minimum coefficient in formula:   Dist1!M482
  Maximum coefficient value:        18  on <RHS>
  Maximum coefficient in formula:   Dist1!I797

MODEL TYPE:              Mixed Integer / Nonlinear

SOLUTION STATUS:         GLOBALLY OPTIMAL

OPTIMALITY CONDITION:    SATISFIED

OBJECTIVE VALUE:         0

DIRECTION:               Minimize

SOLVER TYPE:             Global

TRIES:                   395802

INFEASIBILITY:           0

BEST OBJECTIVE BOUND:    0.33333333332772

STEPS:                   71

ACTIVE:                  0

SOLUTION TIME:           0 Hours  8 Minutes 10 Seconds

NON-DEFAULT SETTINGS:

  General Options / Solver Feasibility Tolerance:   1.000000e-004
  General Options / Warning Infeasible Constraint:   On
  Global Solver Options / Strategy Global Solver:   On
```

ANEXO 10 – Relatório do programa What'sBest para o turno 4 – com manutenção

```
What'sBest!® 9.0.4.1 (Jul 01, 2009) - Library 5.0.1.411 - Status Report -

DATE GENERATED:       dez 10, 2009          12:39 AM


MODEL INFORMATION:

  CLASSIFICATION DATA            Current   Capacity Limits
  ---------------------------------------------------------
  Numerics                          2036
  Variables                         3510
  Adjustables                        396         Unlimited
  Constraints                        504         Unlimited
  Integers/Binaries                396/0         Unlimited
  Globals                           1405         Unlimited
  Coefficients                     12709

  Minimum coefficient value:        1  on Dist1!C415
  Minimum coefficient in formula:   Dist1!C45
  Maximum coefficient value:        5.6666666666667  on Dist1!C217
  Maximum coefficient in formula:   Dist1!C222

MODEL TYPE:              Mixed Integer / Nonlinear

SOLUTION STATUS:         GLOBALLY OPTIMAL

OPTIMALITY CONDITION:    SATISFIED

OBJECTIVE VALUE:         5

DIRECTION:               Minimize

SOLVER TYPE:             Global

TRIES:                   83296

INFEASIBILITY:           0

BEST OBJECTIVE BOUND:    5.5499999994435

STEPS:                   166

ACTIVE:                  0

SOLUTION TIME:           0 Hours  1 Minutes 26 Seconds

NON-DEFAULT SETTINGS:

  General Options / Solver Feasibility Tolerance:   1.000000e-004
  General Options / Warning Infeasible Constraint:   On
  Global Solver Options / Strategy Global Solver:   On
```

ANEXO 11 – Relatório do programa What'sBest para o turno 1 de 12 horas – com manutenção

```
What'sBest!® 9.0.4.1 (Jul 01, 2009) - Library 5.0.1.411 - Status Report -

DATE GENERATED:       dez 01, 2009          07:25 PM


MODEL INFORMATION:

  CLASSIFICATION DATA            Current   Capacity Limits
  ---------------------------------------------------------
  Numerics                         2720
  Variables                        7004
  Adjustables                       805         Unlimited
  Constraints                       973         Unlimited
  Integers/Binaries                805/0        Unlimited
  Globals                          2870         Unlimited
  Coefficients                    33632

  Minimum coefficient value:        0.5  on Dist1!E814
  Minimum coefficient in formula:   Dist1!S482
  Maximum coefficient value:        36  on <RHS>
  Maximum coefficient in formula:   Dist1!I797

MODEL TYPE:              Mixed Integer / Nonlinear

SOLUTION STATUS:         GLOBALLY OPTIMAL

OPTIMALITY CONDITION:    SATISFIED

OBJECTIVE VALUE:         -1.5172751943737e-011

DIRECTION:               Minimize

SOLVER TYPE:             Global

TRIES:                   216

INFEASIBILITY:           0

BEST OBJECTIVE BOUND:    -2.2249091458097e-011

STEPS:                   0

ACTIVE:                  0

SOLUTION TIME:           0 Hours 21 Minutes 11 Seconds

NON-DEFAULT SETTINGS:

  General Options / Solver Feasibility Tolerance:   1.000000e-004
  General Options / Warning Infeasible Constraint:   On
  Global Solver Options / Strategy Global Solver:   On
```

ANEXO 12 – Relatório do programa What'sBest para o turno 2 de 12 horas – com manutenção

```
What'sBest!® 9.0.4.1 (Jul 01, 2009) - Library 5.0.1.411 - Status Report -

DATE GENERATED:       dez 10, 2009          12:23 AM


MODEL INFORMATION:

  CLASSIFICATION DATA            Current   Capacity Limits
  ---------------------------------------------------------
  Numerics                         2582
  Variables                        6876
  Adjustables                       792         Unlimited
  Constraints                       936         Unlimited
  Integers/Binaries                792/0        Unlimited
  Globals                          2845         Unlimited
  Coefficients                    33404

  Minimum coefficient value:        1  on Dist1!C415
  Minimum coefficient in formula:   Dist1!C45
  Maximum coefficient value:        9  on <RHS>
  Maximum coefficient in formula:   Dist1!P420

MODEL TYPE:              Mixed Integer / Nonlinear

SOLUTION STATUS:         GLOBALLY OPTIMAL

OPTIMALITY CONDITION:    SATISFIED

OBJECTIVE VALUE:         4

DIRECTION:               Minimize

SOLVER TYPE:             Global

TRIES:                   578946

INFEASIBILITY:           0

BEST OBJECTIVE BOUND:    4.7666619004578

STEPS:                   52

ACTIVE:                  0

SOLUTION TIME:           0 Hours 27 Minutes  6 Seconds

NON-DEFAULT SETTINGS:

  General Options / Solver Feasibility Tolerance:   1.000000e-004
  General Options / Warning Infeasible Constraint:   On
  Global Solver Options / Strategy Global Solver:   On
```