

## ARTIGO

# MODELO PARA FORMAÇÃO DE COMPOSIÇÕES FERROVIÁRIAS

**Liége M. S. Firmino Murgel**  
**Nicolau D. Fares Gualda**

Departamento de Engenharia de Transportes  
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

## RESUMO

Este trabalho apresenta um modelo analítico para resolver o problema da formação de trens, o qual consiste na definição de seus itinerários, frequências, tamanhos e perfis de carregamentos e tração, a fim de atender à demanda no período estipulado e sujeito às restrições físicas e operacionais da empresa ferroviária.

A heurística desenvolvida leva em conta aspectos fundamentais, como frota heterogênea e limitada de locomotivas e vagões, variação de bitola na malha e cargas com diferentes prioridades. Inicialmente é obtida uma solução de trens diretos, a qual é em seguida objeto de refinamento, para combinar trens e minimizar a movimentação de vagões vazios.

A heurística incorpora um algoritmo de caminho mínimo e uma estratégia baseada no problema da mochila binário (knapsack Problem). O modelo foi aplicado com sucesso para um caso real de formação de trens da FEPASA.

## ABSTRACT

This work presents an analytical model to solve the train formation problem, which consists of the definition of itineraries, frequencies, sizes, and profiles of shipments and traction of the trains, in order to

meet the demand in the specified period, subject to the physical and operational constraints of the rail company.

The heuristic presented takes into account fundamental aspects such as heterogeneous and limited fleets of locomotives and wagons, gauge variation in the rail network, and cargoes with different priorities. A solution related to direct trains formation is obtained at first, which is then submitted to a refinement procedure, to combine trains and minimize the movement of empty wagons.

The heuristic incorporates a shortest path algorithm and a strategy based on the Knapsack Problem. The model was successfully applied to a real case with data from FEPASA.

## 1. INTRODUÇÃO

A ferrovia caracteriza-se como um modo de transporte capaz de movimentar grandes volumes de carga ou passageiros. Os altos investimentos necessários no que tange à infra-estrutura, equipamentos e mão-de-obra são compensatórios quando as economias de escala, advindas de sua capacidade de movimentação, são aproveitadas.

O modo ferroviário enfrenta forte competitividade com o modo rodoviário. No Brasil, a ferrovia depara-se, desde a década de cinquenta, com um conjunto de dificuldades advindas da escassez de recursos decorrente de uma política de transportes baseada fundamentalmente no modo rodoviário.

Este problema é mundial e a indústria ferroviária vem buscando soluções para reversão deste cenário, através de duas estratégias principais: modernização tecnológica e melhoria dos procedimentos operacionais.

Os modelos analíticos, os modelos de simulação e os sistemas de informações formam um conjunto de instrumentos adotados por empresas ferroviárias e são objeto de estudos e pesquisas. Esses instrumentos constituem, ainda hoje, uma carência das empresas nacionais, cujos processos de planejamento da oferta de serviços

necessitam de ferramentas para apoiar as análises e as avaliações, na busca da melhoria dos procedimentos operacionais.

Este trabalho trata do problema da formação de trens de carga através de modelo analítico. O sistema computacional desenvolvido está baseado em uma heurística e visa apoiar decisões de planejadores, permitindo que diversas análises sejam efetuadas sobre cenários variados, na busca da melhor solução viável na prática.

## **2. O PROBLEMA DE FORMAÇÃO DE COMPOSIÇÕES FERROVIÁRIAS**

A formação das composições é uma das decisões centrais do planejamento dos serviços ferroviários e, como tal, interage diretamente com os diversos componentes do sistema, sendo caracterizada pela importância de um bom plano de formação e pela dificuldade de obtê-lo.

O problema de formação das composições ferroviárias corresponde à determinação dos trens a serem montados, que consiste na definição de seus itinerários, frequências, tamanhos e perfis de carregamentos e tração, a fim de atender à demanda no período estipulado e sujeito às restrições físicas e operacionais da empresa ferroviária.

Uma série de características contribuem para a complexidade do problema, como a flexibilidade que existe para a definição dos tamanhos de trens, isto é, para compor blocos de vagões e locomotivas.

Somado a isso, a infra-estrutura física da malha ferroviária nem sempre é homogênea, principalmente no que diz respeito aos tipos de bitola e à presença ou não de via eletrificada para operação de locomotivas elétricas. Essa é uma realidade para as ferrovias nacionais.

Outra característica relevante diz respeito à heterogeneidade do material rodante, como as capacidades de tração das locomotivas variáveis na malha, o que implica mudanças nos perfis de tração dos trens durante o percurso. A existência de diversos tipos de vagões com

atributos e adequações diferentes em relação às cargas também reflete essa heterogeneidade.

Embora a escassez de recursos seja uma realidade, no caso das empresas nacionais esse fator torna-se ainda mais evidente, posto que a disponibilidade de material rodante fica comprometida pelas condições de manutenção da frota. Outro aspecto que corrobora para o cenário de escassez reside na natureza intrincada das atividades de pátios, cujas operações consomem parte significativa dos tempos de vagões.

O planejamento da formação dos trens interage de forma significativa com todo o planejamento das operações, visto que as atividades classificatórias nos pátios, a programação, o roteamento do tráfego e a redistribuição da frota no caso de desbalanceamento espacial da demanda, são decisões atreladas aos serviços ofertados. A formação de trens é tradicionalmente classificada como um problema de nível tático.

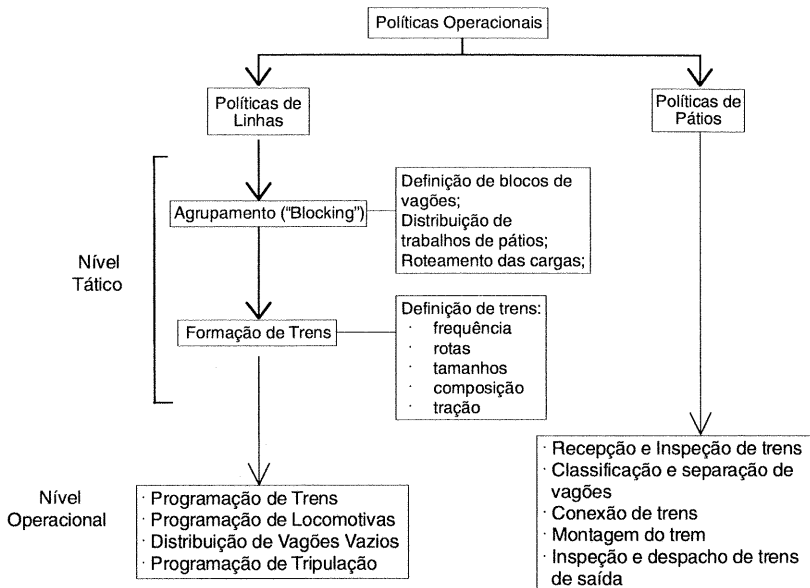
A fim de permitir uma visão mais abrangente das questões envolvidas no transporte ferroviário, e situar o problema da formação das composições nesse contexto, a Figura 1 apresenta alguns exemplos, classificados segundo a hierarquia clássica das decisões.

Nesse trabalho, o problema é enfocado como um problema de dimensionamento de serviços em um cenário de escassez de recursos, onde a utilização racional do material rodante associado ao nível de serviço oferecido ao cliente são aspectos fundamentais.

### **3. MODELOS DE FORMAÇÃO DE COMPOSIÇÕES**

Na literatura, o problema é analisado sob diferentes enfoques no que se refere aos horizontes de planejamento e à interação com outros elementos do planejamento operacional, como: distribuição de vagões vazios, decisões de roteamento, classificação e agrupamento de vagões, entre outros.

A forma de tratar o problema também apresenta um espectro bastante amplo, podendo-se citar: modelos de otimização, heurísticas, e técnicas de inteligência artificial.



**Figura 1:** A Formação de Trens na Estrutura Clássica das Decisões

Os modelos de otimização propostos para abordagem do problema baseiam-se em fluxos de multiprodutos em redes, com escolha discreta de arcos, deste modo caracterizando problemas de programação inteira mista. A linearidade ou não-linearidade desses problemas estão submetidas aos aspectos e objetivos considerados em cada caso e autor, sendo, na maioria das vezes, problemas não lineares de programação. A forma de capturar os aspectos relevantes que influenciam as decisões de formação das composições, bem como a delimitação do problema em si, têm grande variação entre os autores. A Tabela 1 apresenta um quadro resumo dos modelos de formação de trens encontrados na literatura.

#### 4. METODOLOGIA PROPOSTA

As formas de abordagem apresentadas na literatura buscam uma solução sistêmica para o problema e, dada a dificuldade de obtenção desta solução para uma representação mais realista do mesmo, diversos aspectos são desconsiderados, variando de autor para autor.

**Tabela 1:** Quadro Resumo dos Modelos de Formação de Trems

Autor	Função Objetivo	Formulação	Técnica de Solução	Aspectos Enfocados	Abordagem de Pátios
Thomet (1971)	Minimizar Custos	_____	Heurística	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formação</li> <li>• Roteamento</li> <li>• Alocação locom</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• função linear</li> </ul>
Petersen e Fullerton (1975apud Assad)	Minimizar atrasos	Prog.inteira mista não linear	Algoritmo Primal-Dual	_____	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Filas</li> </ul>
Assad (1981)	Minimizar Custos	Prog.inteira mista não linear	não apresentada	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formação</li> <li>• Roteamento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• função linear</li> <li>• desconsidera capacidade dos pátios</li> </ul>
Crainic et al (1984)	Minimizar atrasos	Prog.inteira mista não linear	heurística de decomposição e geração de colunas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formação,</li> <li>• Roteamento</li> <li>• Agrupamento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Filas</li> <li>• limites mínimos em tamanhos de blocos</li> </ul>
Haghani (1989)	Minimizar custos	Prog.inteira mista não linear	heurística de decomposição	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formação,</li> <li>• Roteamento</li> <li>• Distrib.de vazios</li> <li>• Alocação locom</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• função linear</li> <li>• é dinâmico, usa rede espaço-tempo</li> </ul>
Keaton (1989 e 1992)	Minimizar custos	Programação linear inteira mista	Relaxação Lagrangeana	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Roteamento</li> <li>• Agrupamento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• limites na capacidade dos pátios.</li> </ul>
Martinelli e Teng (1994)	Minimizar Custos {modelo de Assad}	Programação inteira mista não linear	Redes Neurais	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formação</li> <li>• Roteamento</li> </ul>	
Martinelli e Teng (1995)	Minimizar atrasos	Programação inteira mista não linear	Algoritmos Genéticos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formação</li> <li>• Roteamento</li> </ul>	
Martinelli e Teng (1996)	Minimizar tempo de ocupação do sistema	Programação inteira mista não linear	Redes Neurais	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formação</li> <li>• Roteamento</li> </ul>	

Neste trabalho, o escopo do problema foi delimitado também a partir de algumas simplificações. Entretanto, elementos que normalmente não são incorporados aos modelos encontrados na literatura foram considerados importantes para obtenção de soluções mais realistas e, portanto, operacionalizáveis, como limites nos tamanhos dos trems, diferenças de bitola, capacidade de tração das locomotivas variáveis na malha e escassez de recursos.

A Tabela 2 apresenta a caracterização do Modelo apresentado segundo a taxonomia da Tabela 1.

**Tabela 2:** Quadro de Caracterização do Modelo Apresentado

<b>Função Objetivo</b>	Maximizar Receita e Minimizar custos associados a movimentação de vagões e locomotivas
<b>Formulação</b>	Programação Inteira não Linear
<b>Técnica de Solução</b>	Heurística – utiliza sub-rotinas de otimização
<b>Aspectos Enfocados</b>	Formação, Distribuição de Vazios, Alocação de Locomotivas, considera heterogeneidade de frota e malha
<b>Abordagem de Pátios</b>	Função linear, limites mínimos e máximos nos tamanhos dos trens

#### 4.1. Modelo simplificado

O modelo a ser apresentado neste item foi denominado de simplificado, por não abranger todas as características do problema tratado, mas permite uma melhor compreensão de algumas das questões envolvidas nas decisões de formação dos trens.

O modelo parte do princípio que cada trem efetua o percurso da origem ao destino sem paradas intermediárias para acoplamento ou desmembramento de vagões. Além disso, para manter o modelo simplificado, adotou-se a hipótese de que os vagões são confinados a circuitos fechados.

Apresenta-se a seguir o modelo simplificado.

Sejam os conjuntos:

$G = (N,A)$  : grafo direcionado que representa a rede física;

$N$  : conjunto de nós do grafo que representam os pátios;

$A$  : conjunto de arcos do grafo que representam as vias;

$G_s = (N_s,A_s)$  : grafo direcionado que representa uma rede de serviços;

$N_s$  = conjunto de nós da rede de serviços, representando origens e destinos de trens;

$A_s$  = conjunto de arcos que representam os trens "k";

$V$  : conjunto de vagões ;

$L$  : conjunto de locomotivas, cujos elementos são indicados pelo índice  $t=1,2,3,\dots,|T|$ .

- R : conjunto de rotas definidas como seqüências ordenadas de nós entre todos os pares origem-destino para os quais exista um tráfego esperado;
- M : conjunto de produtos a serem transportados entre pares origem-destino da rede , onde cada elemento do conjunto é representado pelo índice  $m$  tal que  $m = (O,D,P,Rm)$  com  $O \in N$  ,  $D \in N$  ,  $P$  equivale a um produto e  $Rm$  denota a rota do elemento  $m$ .
- Rm: conjunto formado pela seqüência ordenada de arcos de modo a definir um caminho entre a origem e o destino da carga  $m$ , definida para cada elemento  $m \in M$ .
- $R_\theta$  : conjunto formado pela seqüência de arcos da rede física que compõem o arco " $\theta$ " da rede de serviços  $R_\theta = \{a1,a2,\dots,a_n\}$  , com  $a1 = (i, j) \in A$  ,  $i \in N$  e  $j \in N$ ;

E admitindo-se conhecidos:

- $c_{mv}$  : custo por unidade de vagão para transportar a carga  $m$  no vagão do tipo  $v$  da origem ao destino;
- $p_m$  : receita por unidade de vagão para transportar a carga  $m$  no vagão do tipo  $v$  da origem ao destino;
- $c_{la}$  : custo por unidade de locomotiva do tipo  $l$  no arco " $a$ ";
- $\beta_{la}$  : denota a capacidade de tração da locomotiva " $l$ " no arco " $a$ ";
- $d_m$  : demanda em toneladas úteís da carga  $m$ ;
- $NL_{la}$  : número máximo de locomotivas do tipo " $l$ " no arco " $a$ " alocadas a um único trem;
- $VH_v$  : vagões.horas disponíveis do vagão " $v$ ";
- $LH_l$  : Locomotivas.horas disponíveis da locomotiva " $l$ ";
- TM: menor trem aceitável em toneladas brutas;
- TG: maior trem aceitável em toneladas brutas;
- $u_{vm}$  : capacidade útil do vagão " $v$ " para o produto da carga " $m$ ";
- $pp_v$  : tara do vagão " $v$ ";
- $r_v$  : comprimento do vagão " $v$ ";
- $tj_\theta$  : tempo de percurso do trem " $\theta$ ";
- $tc_m$  : tempo variável associado à carga " $m$ ";

Variáveis de decisão:

- $f^\theta =$  número de viagens do trem " $\theta$ " no período de planejamento;



$x_{mv}^{\theta}$  número de vagões do tipo "v" que transportam a carga "m" no trem " $\theta$ ";

$x_{la}^{\theta}$  = número de locomotivas do tipo "l" no arco "a" alocada ao trem " $\theta$ ";

O objetivo é a maximização do lucro definido pela receita obtida pelo movimento de vagões carregados e os custos associados aos fluxos de vagões e locomotivas.

### FUNÇÃO OBJETIVO: MAX Z

$$Z = \sum_{m=1}^{[M]} p_m \cdot \left[ \sum_{\theta=1}^{[\theta]} f^{\theta} \left( \sum_v x_{mv}^{\theta} \right) \right] - \left[ \sum_{\theta=1}^{[\theta]} f^{\theta} \left( \sum_{l=1}^{[L]} \sum_{a \in R_{\theta}} c_{la} y_{la}^{\theta} \right) \right] + \sum_{\theta=1}^{[\theta]} f^{\theta} \left( \sum_{m=1}^{[M]} \sum_{v=1}^{[V]} c_{mv} x_{mv}^{\theta} \right) \quad (1)$$

sujeito às restrições:

$$\sum_{\theta=1}^{[\theta]} \sum_{v=1}^{[V]} f^{\theta} \cdot x_{mv}^{\theta} (u_{mv}) \leq d_m \quad p/ \text{ todo } m; \quad (2)$$

$$\sum_{v=1}^{[V]} \sum_{m=1}^{[M]} x_{mv}^{\theta} (u_{mv} + pp_v) \leq TG \quad p/ \text{ todo } \theta; \quad (3)$$

$$\sum_{v=1}^{[V]} \sum_{m=1}^{[M]} x_{mv}^{\theta} (u_{mv} + pp_v) \geq TM \quad p/ \text{ todo } \theta; \quad (4)$$

$$\sum_{\theta=1}^{[\theta]} \sum_{m=1}^{[M]} x_{mv}^{\theta} [tj_{\theta} + x_{mv}^{\theta} (tc_m)] \leq VH_v \quad p/ \text{ todo } v; \quad (5)$$

$$\sum_{m=1}^{[M]} \sum_{v=1}^{[V]} x_{mv}^{\theta} (u_{mv} + pp_v) \leq \beta_{la} \cdot y_{la}^{\theta} \quad p/ \text{ todo } \theta \text{ e para todo "a" de } R_{\theta}; \quad (6)$$

$$y_{la}^{\theta} \leq NL_{la} \quad p/ \text{ todo } \theta \text{ e para todo "a" de } R_{\theta}; \quad (7)$$

$$\sum_{\theta=1}^{[\theta]} \sum_{a \in R_{\theta}} f^{\theta} \cdot y_{la}^{\theta} \cdot tj_a \leq LH_l \quad p/ \text{ todo } l; \quad (8)$$

$$y_{la}^{\theta} \geq 0 \text{ e inteiro} \quad p/ \text{ todo } \theta \text{ e para todo "a" de } R_{\theta}; \quad (9)$$

$$f^{\theta} \geq 0 \text{ e inteiro } \quad p/ \text{ todo } \theta; \quad (10)$$

$$x_{mv}^{\theta} \geq 0 \text{ e inteiro } \quad p/ \text{ todo } \theta, \text{ todo } m \text{ e todo } v; \quad (11)$$

A restrição (2) impõe que a quantidade de carga do tipo  $m$  transportada pelos trens  $\theta$  não ultrapasse a demanda. As restrições (3) e (4) impõem limites mínimos e máximos aos tamanhos dos trens. O limite mínimo está associado aos custos de formação de um trem, de modo que abaixo deste limite a formação não é atraente financeiramente. Os limites máximos estão associados às restrições operacionais.

A restrição (5) não é linear, pois os tempos em pátios e terminais dos clientes dependem do número de vagões processados. Esta restrição impõe que a utilização dos vagões em vagões.horas seja menor que a disponibilidade para cada tipo de vagão.

A restrição (6) impõe que a quantidade, em toneladas brutas, alocadas a cada trem, não ultrapasse a capacidade de tração do conjunto de locomotivas designadas para aquele trem.

A restrição (7) impõe um número máximo de locomotivas por trem em cada arco; esta restrição representa uma prática nas empresas ferroviárias, e está fundamentada em questões operacionais e de segurança. A restrição (8), como a (6), obriga que a utilização das locomotivas não ultrapasse a disponibilidade em locomotivas.horas. As restrições (9), (10) e (11) garantem a não negatividade, além de imporem que o número de viagens, o número de locomotivas e o número de vagões transportados sejam variáveis inteiras.

O modelo captura parte das especificidades da empresa ferroviária, como: o material rodante heterogêneo e a escassez de recursos. Entretanto, as dificuldades causadas pela não linearidade, e pela imposição de integralidade em algumas restrições, somadas a um conjunto de aspectos que não são representados no modelo, levaram à adoção de uma heurística. Um aspecto importante que não está representado no modelo é a possibilidade de existirem diferentes bitolas na malha, o que implica uma adequação dos vagões não somente ao produto, mas também às

vias da rede e leva, conseqüentemente, à consideração de pontos de transbordo para troca de material rodante.

Outra questão relevante diz respeito ao fluxo de vagões vazios, que não são considerados explicitamente no modelo simplificado, não permitindo, assim, decisões que melhorem a sua distribuição, nem mesmo no que se refere aos fluxos de retorno. Um modelo mais abrangente deveria considerar de forma explícita os fluxos de vagões carregados, vazios e locomotivas.

Finalmente, as medidas em vagões.horas e locomotivas.horas para a consideração de disponibilidade e uso de material rodante não representam adequadamente a questão e podem levar a uma alocação irreal de material rodante.

Incorporar estas questões ao modelo aumenta ainda mais a sua complexidade, dificultando tanto a sua formulação como a sua solução, o que induziu à adoção de uma heurística, que apesar de não levar a uma solução necessariamente ótima, permite tratar os diversos detalhes do problema.

Posto isto, apresenta-se no item seguinte a heurística proposta.

#### **4.2. Heurística para a formação das composições**

A estratégia de abordagem adotada na heurística busca incorporar a multiplicidade de objetivos existentes no problema real, pois deseja-se obter a máxima receita oriunda do transporte de cargas, salvaguardadas as prioridades relativas de cargas e clientes. Somado a isso, objetiva-se fornecer os serviços com mínimo custo associado ao fluxo de vagões e locomotivas e sujeitos às restrições físicas e operacionais apresentadas a seguir:

restrições impostas pelos recursos:

- \* limites no número e horas disponíveis de locomotivas de cada tipo;
- \* limites no número e horas disponíveis de vagões de cada tipo;
- \* limites no número de viagens nos links;

restrições impostas pelos trechos das vias:

- \* comprimentos máximos de trens nos pátios;
- \* limites nos carregamentos dos vagões impostos pela infraestrutura da via (t/eixo);
- \* vagões e locomotivas alocados de forma adequada às vias (bitola e via aérea);

restrições impostas pelas características da demanda:

- \* vagões com diferentes adequações para cada produto;

restrições impostas pela operação:

- \* limites máximos e mínimos nos tamanhos dos trens;
- \* alocação de um único tipo de locomotiva por trem por trecho;
- \* limite máximo no número de locomotivas por trem;

A heurística parte da formação de trens diretos que viajam de origem a destino carregados e retornam vazios sendo, então, submetidos a um processo de refinamento da solução obtida, que visa um melhor aproveitamento do material rodante.

Conforme mostrado na Figura 2, a heurística desenvolvida é composta por três módulos principais: um módulo de Processos Auxiliares para a formação; um módulo associado ao Modelo Direto, e um outro relacionado ao Modelo de Refinamento por Combinação de Fluxos, ou seja:

#### **\* Módulo 1: Processos Auxiliares**

Os processos de priorização, agregação e determinação dos atributos espaço-temporais das cargas compõem os processos auxiliares, cuja finalidade é o tratamento e a organização dos dados de modo a “alimentar” o modelo direto. A heurística formulada estabelece inicialmente uma priorização e uma agregação das cargas em função

dos atributos das mesmas, definindo-se, deste modo, uma ordenação que determinará a seqüência de execução do modelo direto.

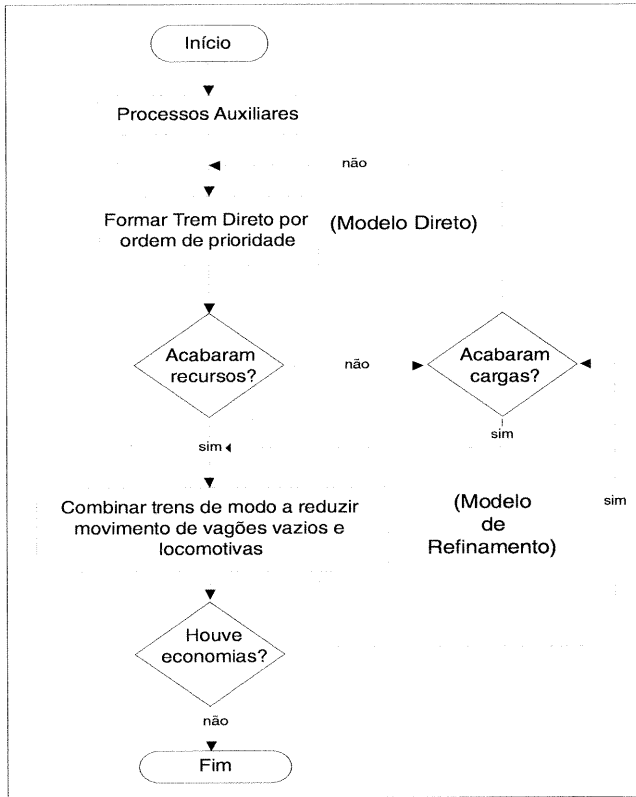


Figura 2 - Estrutura da Heurística Proposta

### \* Módulo 2: Modelo Direto

Este modelo é responsável pela formação de trens diretos, que viajam carregados da origem ao destino e que retornam vazios, sendo observadas as restrições físicas e operacionais definidas, fornecendo, assim, uma primeira solução viável. A alocação de locomotivas é efetuada para cada trem direto, de modo a obter o mínimo custo

associado à tração. O modelo é seqüencial e iterativo, obedecendo à ordenação definida previamente nos processos de priorização e agregação das cargas.

**\* Módulo 3 : Modelo de refinamento por combinação de fluxos**

O modelo de refinamento por combinação é responsável pela redistribuição de vagões vazios. Uma vez que a solução obtida no modelo direto prevê o retorno vazio dos trens, o refinamento efetua uma combinação de trens diretos, dois a dois, de modo a suprimir ou reduzir as viagens vazias, baseado numa heurística de ganhos.

Os modelos de formação de trens diretos e de refinamento são iterativos. Os modelos são executados para um cenário pré-definido, composto por informações sobre demanda, material rodante e malha ferroviária, além de parâmetros para a formação. Cada um desses módulos é apresentado mais detalhadamente a seguir.

*4.2.1. Processos auxiliares*

Os processos auxiliares correspondem à priorização, agregação e determinação dos atributos espaço-temporais das cargas.

O processo de priorização consiste na ordenação das cargas em função dos atributos das mesmas, como a ordenação em função da contribuição da carga na receita total. A função de priorização definida no modelo, é uma função linear que deve ser calibrada de modo a refletir a seqüência de execução desejada pelo tomador de decisão.

O processo de agregação consiste numa combinação de cargas a serem alocadas a um mesmo trem, definindo um grupo de conjuntos combinados. Um conjunto combinado ( $w$ ) consiste num grupo de cargas que viajam em um mesmo trem. A quantidade que justifica a formação de um trem unitário e os coeficientes da função de priorização são os parâmetros utilizados.

A combinação de cargas para formar os denominados conjuntos combinados ( $w$ ) obedece às seguintes premissas:

- \* cargas de mesmas origens e destinos;
- \* cargas compatíveis entre si, ou seja, produtos que podem ser alocados a um mesmo trem e cujas quantidades não justificam a formação de trens unitários;

No processo de determinação dos atributos espaço - temporais das cargas são determinados, para todos os elementos de cada conjunto informações de bitola, extensões, tempos, etc. Os tempos de viagem são os mesmos para todos os elementos do conjunto, enquanto os

tempos variáveis com o número de vagões são específicos para cada carga. Isto porque os tempos de carga e descarga dependem do produto e do processo de carregamento no terminal do cliente, fazendo com que cargas do mesmo conjunto apresentem tempos de ciclo diferentes entre si.

Tendo em vista que o modelo parte da hipótese de que os trens percorrem um ciclo completo, os tempos variáveis são calculados levando-se em conta os tempos de carga e descarga nos terminais dos clientes, bem como os tempos nos pátios de origem e destino. Nos casos em que existem mudanças de bitola no percurso da carga, são considerados os tempos associados ao evento a que o tráfego se submete: troca de truques de vagões ou transbordo.

#### *4.2.2. Modelo direto*

O modelo de formação de trens diretos é composto por procedimentos iterativos que buscam maximizar a receita a um mínimo custo para alocação de locomotivas. O modelo é sequencial e em cada iteração é formado o trem para o conjunto de maior nota no passo (nota em função da sua prioridade relativa). A Figura 3 apresenta a estrutura do processo principal do modelo direto.

O dimensionamento da frota e as avaliações de viabilidade em termos de recursos disponíveis e demais restrições requerem a definição da

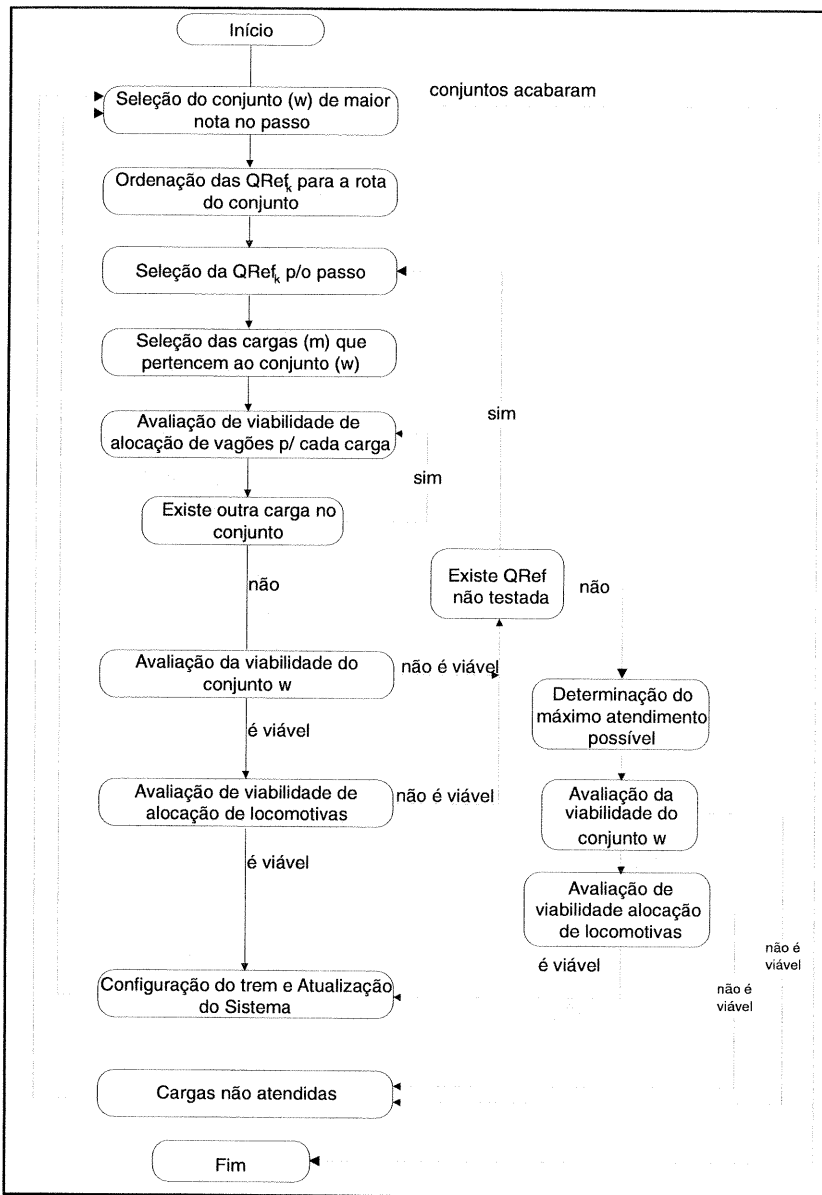


Figura 3: Estrutura do Processo Principal do Modelo Direto



capacidade do trem em cada viagem. Adotou-se como critério de decisão a capacidade do trem (em toneladas) que leva ao menor custo médio de alocação das unidades tratoras (vide item 4.2.2.1). Estas capacidades são denominadas quantidades de referência e denotadas por  $QRef_k$ .

Entretanto, em decorrência das restrições existentes, como limite de disponibilidade de material rodante ou mesmo restrições de pátios e vias, a alocação da frota baseada na quantidade de referência que implica o menor custo de tração pode ser inviável. Portanto, são efetuados pré-dimensionamentos e avaliações de viabilidade para várias capacidades dos trens.

A fim de avaliar a viabilidade da formação do trem, no que se refere à disponibilidade de recursos, e tendo em vista que o modelo é seqüencial, é necessário estabelecer um controle sobre os mesmos, para que a cada iteração os recursos já alocados sejam debitados. Nos casos de locomotivas e vagões, o controle é efetuado por quantidade e tempo disponível de cada tipo de equipamento e o controle de viagens alcançadas monitora a quantidade de viagens ainda permitidas em cada arco da rede.

#### 4.2.2.1. Ordenação das Quantidades de Referência $k$

No processo de ordenação das quantidades de referência (Figura 3), para cada conjunto de cargas combinadas ( $w$ ), são determinados o número de viagens necessárias para transportar a quantidade bruta do conjunto  $w$  ( $NV_w^k$ ), e o número de locomotivas do tipo  $l$  em cada trecho de tração  $t$  ( $n_{lt}^k$ ), admitindo-se que em cada viagem é transportado  $QRef_k$ , para todo  $k$  que atenda às seguintes condições:

$$\left[ NV_w^k \right] \leq \eta_{ac}^w \quad (12)$$

$$\left[ n_{lt}^k \right] \leq \gamma_{lt}; \quad (13)$$

A condição (12) garante que o número de viagens não supere o limite de viagens ainda permitidas no arco crítico, isto é, no arco com menor capacidade disponível; e a condição (13) impõe que o número de locomotivas necessárias no trem em cada trecho não supere o limite

máximo permitido para o tipo de locomotiva no trecho, onde:

- $\lceil \cdot \rceil$  : indica arredondamento para cima para o inteiro mais próximo.  
 $\eta_{ac}^w$  : limite de viagens ainda permitidas no no arco com menor capacidade disponível na rota do conjunto  $w$ ;  
 $NV_w^k$  : número de viagens necessárias para transportar a quantidade bruta total do conjunto  $w$  com  $Q_{refk}$  por viagem;  
 $n_{lt}^k$  : número de locomotivas do tipo  $l$  necessárias no trecho  $t$  para tracionar  $Q_{refk}$ ;  
 $\gamma_{lt}$  : número máximo permitido de locomotivas do tipo  $l$  no trecho  $t$  em um único trem;

A medida adotada como critério de ordenação das quantidades de referência é dada pela média dos custos na rota, ou seja:

$$c_w^k = \frac{1}{|L_w|} \cdot \sum_{l \in L_w} \sum_{t \in T_w} \lceil n_{lt}^k \rceil \lceil NV_w^k \rceil \cdot c_{lt} \quad , \quad p/ k=1,2,..n \quad (14)$$

onde:

- $c_{it}$  : custo de alocar a locomotiva do tipo  $l$  no trecho de tração  $t$ ;  
 $cv_{lt}^k$  : custo de tração por viagem para transportar  $Q_{refk}$  com locomotivas do tipo  $l$  no trecho de tração  $t$ ;  
 $cf_{lt}^k$  : custo de tração do fluxo, ou seja, considerando-se todas as viagens efetuadas;  
 $|L_w|$  : número de elementos do conjunto  $L_w$ , ou seja, o número de locomotivas aptas a trafegar na rota do conjunto  $w$ .  
 $T_w$  : trechos de tração presentes na rota do conjunto  $w$ .

Os custos de alocação de tração estão associados ao nível de decisão, ou seja, se o modelo estiver trabalhando no nível operacional, estes custos referem-se aos custos variáveis, e no nível estratégico devem ser considerados também os custos fixos.

#### 4.2.2.2. Viabilidade de Alocação de Vagões para Cada Carga do Conjunto $w$

A avaliação da viabilidade para alocação de vagões a uma carga (Figura 3) significa averiguar a disponibilidade de vagões para efetuar o

transporte da mesma e, nos casos em que existem diferentes bitolas no percurso, garantir que a quantidade de carga que deixa a origem atinja seu destino final. O processo de avaliação de alocação de vagões é efetuado para cada carga "m" e quantidade de referência "k" a ser testada para o conjunto "w".

O máximo atendimento da carga constitui uma premissa no processo, o que muitas vezes implica a troca do vagão mais adequado por aquele que, devido à disponibilidade, permite atender a maiores quantidades de carga. A carga é alocada somente a um tipo de vagão, não sendo considerado o atendimento complementar a partir do uso de outros tipos de vagão, e admite-se que um trem completo deve ser homogêneo em todas as viagens, ou seja, a quantidade útil de cada carga (m) a ser transportada ( $QC_m^k$ ) é a mesma em todas as viagens.

A frota de vagões necessária para o transporte da carga e o tempo de utilização desses vagões são as variáveis relevantes para aferir a viabilidade. Para a obtenção destas, determinam-se a capacidade útil dos vagões (respeitando limite de via em t/eixo), o número de vagões por viagem, o tempo de ciclo e o número de blocos de vagões para efetuar as viagens dentro do período de planejamento.

Os vagões  $v_b$  (do tipo v de bitola b) poderão estar disponíveis por diferentes intervalos de tempo  $td_{v_b}$ . Isso leva à consideração de p grupos de vagões de um mesmo tipo  $v_b$  com disponibilidade de tempo  $td_{v_b}$ , ou seja,  $td_{v_b}^p$ . Consequentemente, a quantidade de vagões do tipo  $v_b$  com disponibilidade de tempo  $td_{v_b}^p > 0$  corresponde a  $q_{v_b}^p$ . Deste modo, define-se o conjunto  $P_{v_b}$ , onde cada grupo p corresponde a um elemento  $(td_{v_b}^p, q_{v_b}^p)$  pertencente a  $P_{v_b}$ .

Quanto à viabilidade, existem três situações possíveis, para alocação do vagão  $V_b$  à carga na referida bitola:

I. Existe disponibilidade de vagão  $V_b$  para atendimento completo da carga nesta bitola, ou seja :

$$\sum_{p \in P_{v_b}} q_{v_b}^p \geq F_{v_b}^{mk} \quad p / \text{todo } p \mid td_{v_b}^p \geq TU_{v_b}^{mk} ; \quad (15)$$

II. Existe disponibilidade de vagão  $V_b$  para atendimento parcial da carga nesta bitola, ou seja:

$$\sum_{p \in P_{v_b}} q_{v_b}^p > 0 \quad p / \text{ todo } p \mid td_{v_b}^p \geq TU_{v_b}^{mk}; \quad (16)$$

III. não existe disponibilidade de vagão  $V_b$  :

$$\sum_{p \in P_{v_b}} q_{v_b}^p = 0 \quad p / \text{ todo } p \mid td_{v_b}^p \geq TU_{v_b}^{mk}; \quad (17)$$

onde:

$TU_{V_b}^{mk}$  : tempo de utilização de cada bloco de vagões  $V_b$  que carregam a carga  $m$ , associado a uma quantidade de referência  $QRef_k$ ;

$F_{V_b}^{mk}$  : frota de vagões do tipo  $V_b$  necessários para transportar a carga  $m$  associada a uma quantidade de referência  $QRef_k$ ;

O dimensionamento e a avaliação de viabilidade do vagão são procedimentos efetuados em seqüência para cada sub-rotas (caminho com bitola específica) da carga em análise.

Nos casos em que o vagão  $V_b$  mais adequado à carga não está disponível em quantidade suficiente para o atendimento completo da mesma, estes procedimentos são repetidos até que se determine o tipo de vagão  $V_b$  que permita o máximo atendimento da carga. Destaque-se que para cada carga tem-se uma lista de vagões alternativos ordenados de forma decrescente segundo a adequação.

#### 4.2.2.3. Avaliação da Viabilidade do Conjunto $w$

Uma vez analisada a viabilidade de cada carga do conjunto, pode-se avaliar a viabilidade do conjunto como um todo, onde são verificados o atendimento às restrições de tamanhos mínimos e máximos de trens em toneladas brutas e de comprimento de trens.

#### 4.2.2.4. Avaliação da Viabilidade de Alocação de Locomotivas

Quando comprovada a viabilidade do conjunto para uma determinada capacidade do trem com um número de viagens associado, estes

parâmetros são submetidos ao processo de avaliação de viabilidade de alocação de locomotivas .

A existência de tipos distintos de locomotivas que trafegam em um mesmo trecho de tração, e a presença de vários trechos em cada rota, possibilitam diversas alternativas para o perfil de tração do trem. A escolha do perfil consiste na determinação do conjunto de locomotivas que apresente o menor custo, para a quantidade de carga a transportar. É importante também que o número de trocas de tipos de locomotivas no percurso seja o mínimo necessário.

Admite-se que as locomotivas percorrem ciclos, porém não ficam paradas nos pátios, apenas deixam os vagões e retornam ao ponto de origem. A viabilidade em termos de disponibilidade de locomotivas é controlada a partir da quantidade e do tempo disponíveis de cada equipamento.

A abordagem do problema de alocação de locomotivas está fundamentada na geração de um grafo para cada par origem-destino, de modo que os nós representem a utilização de um determinado tipo de locomotiva num dado trecho. Os custos dos arcos consistem no custo das locomotivas e penalidades são impostas às trocas das mesmas.

A formulação matemática do modelo, relaxadas as restrições de viabilidade, é a mesma de um problema de determinação do caminho mínimo entre um nó fonte e um nó sorvedouro.

Uma vez impostas as restrições de viabilidade, a resolução do modelo é feita através de uma variação de um algoritmo de caminho mínimo. Considerando-se uma alteração no algoritmo de Dijkstra, para cada nó candidato a ser expandido averigua-se a viabilidade do caminho até aquele ponto. O nó deve apresentar não somente o menor custo acumulado, mas também ser viável para a expansão. Como no caso de vagões, a viabilidade é aferida a partir do tempo de utilização e a frota necessária, comparada com a disponibilidade de locomotivas.

Uma vez concluída a viabilidade de alocação de locomotivas para o conjunto de vagões, configura-se o trem e atualiza-se a configuração do sistema. Caso contrário, se ainda houver quantidade de referência a ser testada, dimensiona-se para esta quantidade; se não, o conjunto  $w$  não é atendido, e passa-se para o próximo conjunto na ordem de prioridades, vide Figura 3.

#### 4.2.2.5. Configuração do Trem e Atualização do Sistema

A configuração dos trens corresponde à definição de sua frequência e dos perfis de carregamento e tração, obtidos em processos anteriores. Uma vez que a hipótese básica do modelo direto é que os trens retornam vazios, para cada trem carregado forma-se também o trem vazio correspondente.

Seja  $\theta = (i, j, w, b)$  o índice que denota um trem com origem em "i", destino em "j" e que transporta o conjunto de cargas "w" na bitola b. Denota-se por  $\theta_f$ , com  $f = 1, 2, 3$ , o tipo do trem montado, ou seja, tipo carregado, tipo vazio e tipo misto, respectivamente. Cabe esclarecer que o modelo direto só produz trens carregados ( $\theta_1$ ) e vazios ( $\theta_2$ ); os trens mistos ( $\theta_3$ ) são formados no modelo de refinamento.

Os principais atributos determinados são o número de vagões no trem, as quantidades úteis e brutas por viagem, e o número de viagens do trem, ou seja:

$$Z^{\theta_f} = \sum_{m \in w} z_{v_b}^m ; \quad (18)$$

$$QVU^{\theta_f} = \sum_{m \in w} z_{v_b}^m \cdot u_{v_b}^{m'} ; \quad (19)$$

$$QVB^{\theta_f} = \sum_{m \in w} z_{v_b}^m \cdot (u_{v_b}^{m'} + pp_{v_b}) ; \quad (20)$$

$$NV^{\theta_f} = NV_w^{k'} ; \quad (21)$$

Onde:

$Z^{\theta_f}$  : número total de vagões de cada um dos  $f$  trem  $\theta$ ;

- $NV^{\theta_f}$  : número total de viagens de cada um dos  $f$  trem  $\theta$ ;  
 $QVU^{\theta_f}$  : quantidade útil transportada em cada um dos  $f$  trem  $\theta$ ;  
 $QVB^{\theta_f}$  : quantidade bruta transportada em cada um dos  $f$  trem  $\theta$ ;  
 $z_{v_b}^m$  : número de vagões  $V_b$  que transportam a carga  $m$ ;  
 $u_{v_b}^m$  : capacidade em peso útil do vagão  $V_b$ ;  
 $pp_{v_b}$  : tara do vagão  $V_b$  ;

Para o trem  $\theta_f$  há também as informações relativas às respectivas locomotivas, como o número de locomotivas do tipo  $l$  no trecho  $t$ , denotado por  $n_{lt}^{\theta_f}$ . Os resultados imediatos do modelo direto são então os trens formados, as locomotivas alocadas, as cargas transportadas em cada trem e também as cargas não atendidas.

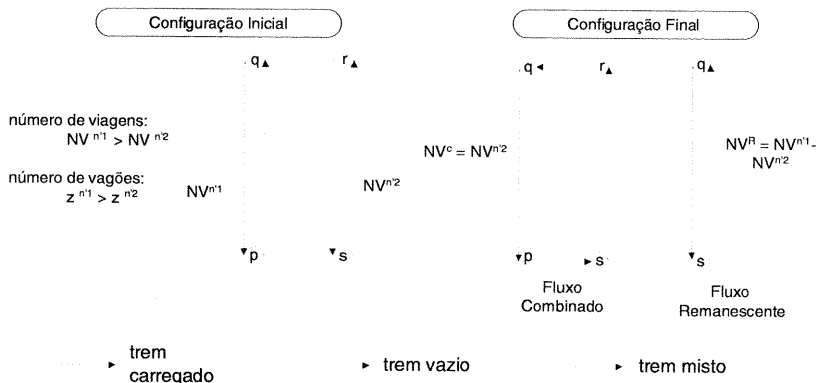
#### 4.2.3. Modelo de refinamento por combinação de fluxos

O modelo de refinamento por combinação de fluxos efetua a combinação de trens vazios associados aos trens diretos, dois a dois, buscando reduzir o número de viagens vazias e propiciar um reaproveitamento da frota, aprimorando assim a solução obtida pelo modelo direto.

Embora o processo leve a um redimensionamento de alguns serviços, pois trens que retornavam vazios podem ser total ou parcialmente suprimidos e novos fluxos podem ser estabelecidos, a premissa básica adotada nesta heurística é que os trens carregados formados pelo modelo direto não são redimensionados; assim, são mantidos todos os atributos referentes aos perfis de tração, bem como a frequência dos mesmos.

O modelo limita-se a combinar trens vazios compostos por uma única carga, pois combinar trens com mais de uma carga destruiria a solução inicial e tornaria a solução do refinamento muito difícil.

A Figura 4 ilustra a configuração obtida após a combinação de dois trens, podendo-se observar o fluxo combinado com a substituição de dois trens vazios e a configuração de um trem misto.



**Figura 4:** Ilustração de Configuração Obtida Após Combinação

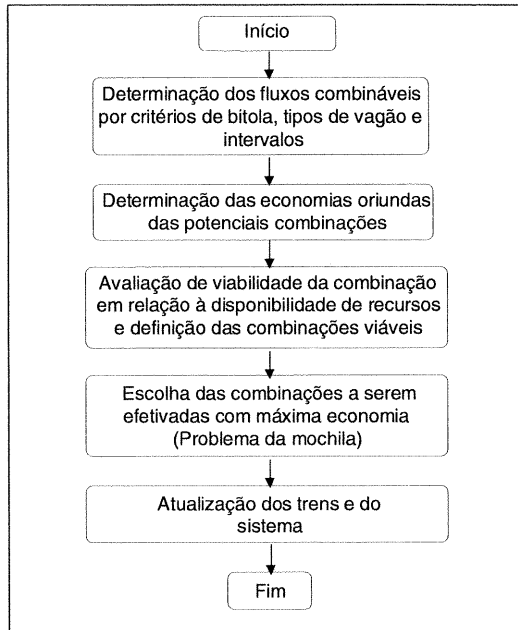
Nesta heurística são consideradas como medidas de economia os vagões.horas vazios em movimento e locomotivas de referência.horas. A locomotiva de referência é tomada como a locomotiva de menor custo.

Na combinação dois a dois, a nova configuração pode implicar a utilização de caminhos distintos e as locomotivas aptas a trafegarem nessas rotas podem ser completamente diferentes das utilizadas originalmente. Assim, ao se estabelecer a figura da locomotiva de referência é possível estimar, a partir de sua capacidade de tração e custo, a relação entre as locomotivas utilizadas na configuração inicial e na configuração combinada, a partir de uma base de comparação adequada. A Figura 5 apresenta a estrutura do modelo de refinamento por combinação de fluxos.

#### 4.2.3.1. Determinação dos fluxos potencialmente combináveis

Uma combinação viável é efetivada quando são reduzidos movimentos vazios. A determinação dos fluxos combináveis depende da existência de compatibilidade quanto aos tipos de vagões, bitola, capacidade de tração e disponibilidade de material rodante, além de restrições temporais existentes, como frequência com que os vagões são solicitados.





**Figura 5: Estrutura do Modelo de Refinamento por Combinação de Fluxos**

#### 4.2.3.2. Determinação das Economias oriundas das Potenciais Combinações

São determinadas as economias obtidas para cada combinação. A definição das combinações a serem executadas é feita de modo a obter a máxima economia em vagões vazios.horas, e para tanto, fez-se uma analogia ao problema clássico da mochila (knapsack problem), onde cada combinação potencial representa um elemento a ser colocado na mochila.

As economias são calculadas em vagões vazios.horas e locomotivas de referência.horas, obtidas a partir da diferença entre os consumos anteriores à combinação e os pós-combinação. Em termos de vagões vazios.horas, os consumos da configuração inicial ( $CVVH_{inicial}$ ) e da configuração final ( $CVVH_{final}$ ) são dados por:

$$CVVH_{\text{inicial}} = NV^{n'1} \cdot z^{n'1} \cdot tp_{pq} + NV^{n'2} \cdot z^{n'2} \cdot tp_{rs} \quad (22)$$

$$CVVH_{\text{final}} = NV^C \cdot z^C \cdot (tp_{ps} + tp_{rq}) + NV^R \cdot z^R \cdot tp^R + NV^M \cdot |z^{n'1} - z^{n'2}| \cdot tp^M \quad (23)$$

onde:

$NV^{n'1}, NV^{n'2}$ : número de viagens dos trens vazios que transportam a carga  $n'1$  e  $n'2$ , respectivamente;

$z^{n'1}, z^{n'2}$ : número de vagões vazios associados às cargas  $n'1$  e  $n'2$ , respectivamente;

$p, q$ : nós de origem e destino da carga  $n'1$ ;

$r, s$ : nós de origem e destino da carga  $n'2$ ;

$tp$ : denota os tempos de percurso dos trens;

$C, R, M$ : índices que denotam fluxos combinados, remanescentes e trem misto respectivamente.

Deste modo, a economia é obtida a partir da expressão:

$$ecov^C = CVVH_{\text{inicial}} - CVVH_{\text{final}} \quad (24)$$

Uma vez determinadas as economias de vagões vazios.horas, calculam-se as economias relativas às locomotivas de referência.horas.

Definindo-se a capacidade de tração equivalente ( $\beta_{eq}$ ) como a menor capacidade da locomotiva equivalente na malha, são calculados para os trens vazios ( $\theta_2$ ) o número de locomotivas de referência.horas de cada um, ou seja:

$$NLH_{eq}^t = \frac{n_{lt} \cdot \beta_{lt}}{\beta_{eq}} \cdot tp_t; \quad (25)$$

$$NLH_{eq} = \sum_{t \in T} NLH_{eq}^t; \quad (26)$$

onde:

$T$ : conjunto de trechos de tração que pertencem à rota do trem;

$n_{lt}$ : número de locomotivas  $l$  no trecho  $t$ ;

$\beta_{lt}$ : capacidade de tração da locomotiva  $l$  no trecho  $t$ ;

$tp_t$ : tempo de percurso no trecho  $t$ ;

$NLH_{eq}^t$  : locomotivas de referência.horas no trecho t;  
 $NLH_{eq}$  : locomotivas de referência.horas do trem;

Deste modo, a economia em locomotivas de referência.horas é dada por:

$$ecoleq = NLH_{eq}^{\theta z(n'1)} + NLH_{eq}^{\theta z(n'2)} - \frac{pp_{vb}}{\beta_{eq}} \cdot [z^c \cdot NV^c (tp_{ps} + tp_{rq}) + z^R \cdot NV^R \cdot tp^R]; \quad (27)$$

onde:  $NLH_{eq}^{\theta z(n'1)}$  corresponde às locomotivas de referência.horas do trem vazio que carrega a carga  $n'_1$  e  $NLH_{eq}^{\theta z(n'2)}$  onde corresponde às locomotivas de referência.horas do trem vazio que carrega a carga  $n'_2$ .

#### 4.2.3.3. Determinação das Combinações Viáveis

Uma vez determinadas as economias positivas de cada combinação, é feita a avaliação de viabilidade em termos de vagões disponíveis para efetuar o fluxo combinado e disponibilidade de tempo dos mesmos para efetuar ciclos maiores decorrentes da combinação, definindo-se, assim, as combinações viáveis.

#### 4.2.3.4. Escolha das Combinações a serem efetivadas

A escolha das combinações que levam à maior economia é feita a partir de uma analogia com o problema da mochila binária, com uma pequena variação. Isto porque, para cada fluxo  $n'$ , existem diversas possibilidades de agrupamento, e como a combinação é efetuada duas a duas, as várias alternativas de agrupamento que contém o fluxo  $n'$  são mutuamente exclusivas, ou seja, apenas uma única combinação que contém o fluxo  $n'$  pode ser efetivada. A analogia efetuada considera cada combinação como um elemento a ser inserido na mochila, e o "lucro" obtido com a entrada do elemento corresponde à economia em vagões vazios.horas.

A diferença existente entre o modelo adotado e o modelo clássico da mochila binário é que os pesos de cada elemento variam de acordo com o que já foi colocado na mochila, deste modo garantindo que os fluxos associados à cada combinação apareçam uma única vez. A

resolução do modelo foi feita a partir da utilização de um algoritmo de "Backtracking".

## 5. APLICAÇÃO FEPASA

O modelo foi aplicado para uma base de dados da Fepasa. A falta de informações relativas aos custos não só prejudicou as decisões tomadas pelo modelo, mas também a análise final para avaliar se os ganhos obtidos nas várias etapas do processo (formar trens diretos e refinamento) são significativos.

Uma tentativa de minimizar os impactos gerados por esta lacuna de dados levou à adoção de uma estimativa de custo operacional em função do trem.km fornecida pela própria empresa.

Uma análise macro do comportamento do modelo executado, onde avaliou-se a variação percentual acumulada entre a receita e os custos operacionais em função de trem.km e variações de horas de uso de vagões, é apresentada na Figura 6.

As sub-iterações mostradas na Figura 6 representam a execução de um modelo direto (sub-iterações ímpares) e o refinamento (sub-iterações pares). Os gráficos permitem a visualização da cinética do processo executado, ora pelo modelo direto, ora pelo modelo de refinamento. Enquanto o modelo direto gera um acréscimo de receita via incorporação de novas cargas, o refinamento atua sobre a redução dos custos, através de uma economia no uso do material rodante.

Assim, no Gráfico 1 observa-se que a sub-iteração 1 que representa a formação dos primeiros trens diretos leva a aproximadamente 97% do total da diferença ao final do processamento. O ganho demonstrado na sub-iteração 2, de aproximadamente 0,5%, é proveniente da redução de trem.km obtida com o refinamento. Na sub-iteração 3, o ganho decorre do aumento de receita proveniente de novos trens carregados formados, e assim sucessivamente.

O Gráfico 4 mostra o comportamento dos vagões.horas nas sub-iterações em relação aos valores obtidos para os primeiros trens diretos formados. É interessante notar que à medida que o refinamento amplia o ciclo dos vagões, ocorre, em paralelo, um aumento nos tempos de pátios. O modelo aqui implementado não considera os custos deste aumento. Assim, durante a análise deve ser avaliado se as alterações são compensatórias.

A partir dos resultados, pode-se obter também informações diversas como a distribuição dos tempos de viagem, tempos nos pátios, ou mesmo a distribuição do número de locomotivas por trem.

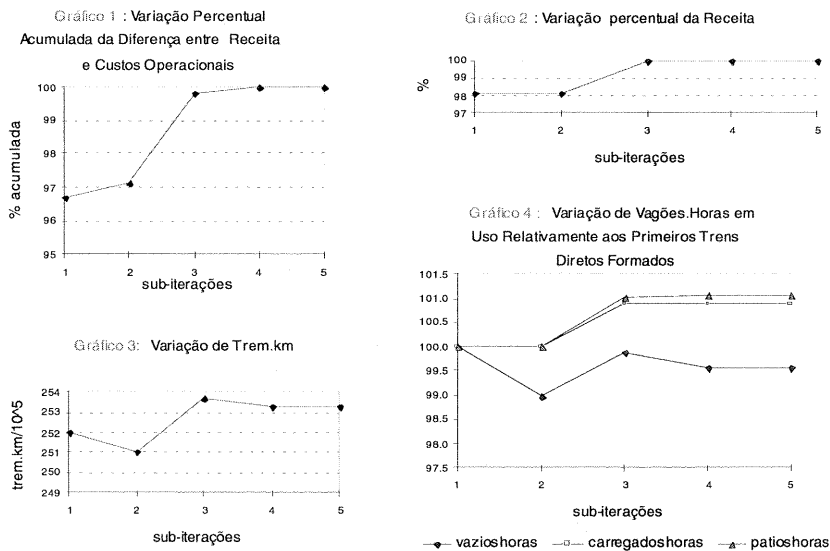


Figura 6 - Gráficos ilustrativos do comportamento do modelo

## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Foi apresentada uma metodologia que buscou incorporar diversas condicionantes do problema visando a sua aplicabilidade prática. A abordagem utilizada procurou levar em conta especificidades da malha ferroviária e do material rodante, além de considerar um grande número de restrições operacionais.

O modelo forneceu uma solução inicial viável, respeitando todas as restrições, e demonstrou a capacidade de melhoria com o refinamento proposto. O sistema computacional desenvolvido a partir desta modelagem mostrou-se capaz de auxiliar a tomada de decisão, por lidar com um conjunto de elementos de difícil consideração no dimensionamento dos serviços, quando efetuado manualmente, e por fornecer uma descrição detalhada e de fácil reconhecimento dos resultados.

Na aplicação Fepasa, o fato de os ganhos obtidos com o refinamento em termos de diferenças percentuais de receitas e custos terem sido pequenos, leva a crer que a formação de trens diretos é uma boa solução para um cenário com as características do da Fepasa, vindo ao encontro da prática da empresa, cujos trens unitários representam mais de 60% dos trens formados. Os aspectos que contribuem para este comportamento são os tempos relativamente altos nos pátios e, portanto, de ciclo, que quando associados a um grande número de viagens decorrentes das quantidades de carga a serem transportadas, tornam difícil respeitar o critério dos intervalos (janelas de tempo) para atendimento das cargas.

A heurística formulada apresenta limitações decorrentes da própria estratégia adotada, pois as decisões são tomadas no modelo de forma seqüencial, não garantindo a obtenção de uma solução global ótima. O seqüenciamento das decisões do modelo permite, por outro lado, tratar o problema de heterogeneidade da frota, obter soluções inteiras para o número de vagões no trem, número de viagens e número de locomotivas, de forma relativamente simplificada, além de propiciar a consideração do consumo de material rodante, através do controle

efetuado pelas quantidades e tempo utilizados de cada equipamento, à medida que cada trem é formado, retratando de forma eficaz uma restrição tipicamente operacional .

Possíveis expansões vislumbradas para a heurística estão associadas a um aprofundamento de elementos pouco explorados, como os listados a seguir.

- \* Expandir as possibilidades de combinações para trens com vagões alternativos;
- \* Explorar a combinação das locomotivas, de modo que as mesmas possam ampliar os serviços e não fiquem confinadas aos ciclos originais;
- \* Explorar estratégias alternativas de agrupamento de cargas;
- \* Avaliar funções alternativas que possam ser calibradas de modo a representar melhor os tempos despendidos nos pátios, e que sejam capazes de representar filas e fatores aleatórios para conexões.

### **Agradecimentos**

Ao CNPQ, pela Bolsa de Mestrado concedida.

À FEPASA pelo fornecimento de dados e informações e pelo apoio através do projeto FEPASA - LPT/EPUSP para desenvolvimento de Modelos Computacionais para Planejamento da Operação Ferroviária.

### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Assad, A. A. (1980a) Models for Rail Transportation; Transportation Research; v.14A, pg.205-220.
- Assad, A. A. (1980b) Modelling of Rail Networks: Toward a Routing/ Makeup Model; Transportation Research; v.14B; pg.101-114.
- Beckmann, M.; C.B. McGuire e C.B Winsten (1955) Studies in the Economics of Transportation; Yale University Press; New Haven.
- Bodin L. D.; B. L. Golden; A. D. Schuster e W. Romig (1980) A Model for the Blocking of Trains; Transportation Research; v.14B; pg.115-120.

- Brown, D. G. (1992) Freight Service Quality Cost Economics and a Hypothetical Railroad Example; *Transportation Research Record*; n.1341; pg.39-52.
- Crainic, T. e J.-M. Rousseau (1986) Multicommodity, Multimode Freight Transportation: A General Modeling and Algorithmic Framework for the Service Network Design Problem; *Transportation Research*; v.20B; n.3; pg.225-242.
- Crainic, T.; J. A. Ferland e J.-M. Rousseau (1984) A Tactical Planning Model for Rail Freight Transportation; *Transportation Science*; v.18; pg.165-184.
- FEPSA (1995) Relatório Diretoria de Logística.
- Glickman, T. S. e H. Sherali (1985) Large-Scale Network Distribution of Pooled Empty Freight Cars Over Time, with Limited Substitution and Equitable Benefits; *Transportation Research*; v.19B; n.2; pg. 85-94.
- Goldberg, D. E. (1989) *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*; Addison Wesley.
- Haghani, A. E. (1989) Formulation and Solution of a Combined Train Routing and Makeup, and Empty Car Distribution Model; *Transportation Research*; v.23B; n.6; pg. 433-452.
- Haghani, A. E. (1987) Rail Freight Transportation : A Review of Recent Optimization Models for Train Routing and Empty Car Distribution; *Journal of Advanced Transportation*; v.21; n.2; pg. 147-172.
- Hillier, F. S. e G. J. Lieberman (1988) *Introdução à Pesquisa Operacional*; 3a.Ed; Editora Campus; São Paulo.
- Horowitz, E. e S. Sahni (1978). *Fundamentals of Computer Algorithms*; Computer Science Press; USA.
- Keaton, M. H. (1992) Designing Railroad Operating Plans: A Dual Adjustment Method for Implementing Lagrangian Relaxation; *Transportation Science*; v.26; n.4; pg.263-278.
- Keaton, M. H. (1989) Designing Optimal Railroad Operating Plans: Lagrangian Relaxation an Heuristic Approaches; *Transportation Research*; v.23B; n.6; pg.415-431.
- Keaton, M. H. (1991) Service-Cost Tradeoffs for Carload Freight Traffic in the U.S.Rail Industry; *Transportation Research*; v.25A; pg.363-374.



- Kwon, O. K.; C. D. Martland; J. M. Sussman e P. Little (1995) Origin-to-Destination Trip Times and Reliability of Rail Freight Services in North American Railroads; *Transportation Research Record*; n. 1489; pg. 1-8.
- Lansdowne, Z. F. (1981) Rail Freight Traffic Assignment; *Transportation Research*; v.15A; pg. 183-190.
- Magnanti, T.L. e R.T Wong (1984) Network Design and Transportation Planning : Models and Algorithms; *Transportation Science*; v.18; n.1; pg.1-55.
- Martinelli, D. e H. Teng (1995) A Genetic Algorithm Approach for Solving the Train Formation Problem; *Transportation Research Record*; n.1497; pg.62-69.
- Martinelli, D. e H. Teng (1994) Neural Network Approach for Solving the Train Formation Problem; *Transportation Research Record*; n.1470; pg.38-46.
- Martinelli, D. e H. Teng. (1994) Optimization of Railway Operations Using Neural Networks; *Transportation Research* ,v.4C; n.1; pg.33-49.
- Martland, C. D. e M. McCord. (1983) Railroad Car Distribution Performance: Conceptual Framework and Underlying Mathematical Relationships; *Transportation Research Record*; n.917, pg.43-49.
- Martland, C. D. (1982) PMAKE Analysis: Predicting Rail Yard Time Distributions Using Probabilistic Train Connection Standards; *Transportation Science*; v.16; n.1; pg.476-506.
- Mendiratta, V. B. e M. A. Turnquist (1982) Model for Management of Empty Freight Cars; *Transportation Research Record*; n.838; pg.50-55.
- Murgel, L. M. S. F. (1998) Modelo para Formação de Composições Ferroviárias; *Dissertação de Mestrado*; Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Nascimento, E. P. (1995) Programação de Locomotivas; *Anais IX ANPET- Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*; pg.953-961.
- Oliveira, R.C. (1993) Optimization of Rail System Operations: Contribution of Computational Models and Instruments; *Rail International*; v.10; pg.58-63.

- Petersen, E. R. (1977a) Railyard Modeling: Part I. Prediction of Put-Through Times; *Transportation Science*; v.11; n.1; pg.37-49.
- Petersen, E. R. (1977b) Railyard Modeling: Part II. The Effect of Yard Facilities on Congestion; *Transportation Science*; v.11; n.1; pg.50-59.
- Phillips, D. T. e A Garcia-Diaz (1981) *Fundamentals of Network Analysis*; Prentice Hall; USA.
- Rossetto, C. F. (1997) *Modelo para Programação de Trens em Vias Singelas*; Dissertação de Mestrado; Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Siddiquee, W. e D. A. D'Esopo (1977) *Computer Methods in Blocking and Train Operations Strategies*; *Transportation Research Record*; n.656; pg.45-52.
- Sussman, J. M. e C. E. Philip (1977) *Inventory Model of the Railroad Empty-Car Distribution Process*; *Transportation Research Record*; n.656; pg.52-60.
- Thomet, M. A. A (1971) *User-Oriented Freight Railroad Operating Policy*; *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*; v.1; n.4; pg.349-356.
- Turnquist, M. A. e W. C. Jordan. (1983) *A Stochastic, Dynamic Network Model for Rail Car Distribution*; *Transportation Science*; v.17; n.2; pg.123-145.

**Endereço dos autores:**

Laboratório de Planejamento e Operações de Transportes  
Departamento de Engenharia de Transportes - Escola Politécnica da USP  
Av. Prof. Almeida Prado travessa 2 - Cidade Universitária  
05508-900 São Paulo - SP - Brasil  
Fax (0xx) 11 818 5716  
e-mail: liege@lpt.ptr.usp.br  
ngualda@usp.br