

## MODELO MATEMÁTICO PARA UMA NOVA ESTRATÉGIA DE PLANEJAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO DE VAGÕES VAZIOS

**Matheus Batista Foletto**

Universidade Federal do Espírito Santo – Departamento de Engenharia de Produção  
Av. Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras, Vitória, ES, CEP 29.075-910, Brasil  
matefoletto@gmail.com

**Rodrigo Alvarenga Rosa**

Universidade Federal do Espírito Santo – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil  
Av. Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras, Vitória, ES, CEP 29.075-910, Brasil  
rodrigo.a.rosa@ufes.br

**Patricia Costa Louzada**

Universidade Federal do Espírito Santo – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil  
Av. Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras, Vitória, ES, CEP 29.075-910, Brasil  
patylouzada@hotmail.com

**Lucas de Barros Pimenta**

Universidade Federal do Espírito Santo – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil  
Av. Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras, Vitória, ES, CEP 29.075-910, Brasil  
lucas.barrospimenta@gmail.com

### RESUMO

No transporte ferroviário, o planejamento da distribuição de vagões vazios é importante porque a maioria dos vagões, no Brasil, retornam vazios do pátio de descarga para o pátio de carregamento. Este retorno vazio eleva os custos operacionais da ferrovia, pois um trem formado somente de vagões vazios acarreta custos com maquinista e combustível e não gera receita. Assim, este artigo propõe uma nova estratégia de distribuição de vagões vazios onde eles são distribuídos utilizando a folga na capacidade de tração dos trens que já circulam com vagões carregados. Para tal, elaborou-se um modelo matemático de Programação Inteira executado no CPLEX 12.6. Instâncias com base nos dados da Ferrovia Centro-Atlântica foram criadas e a estratégia proposta apresentou redução na formação de trens exclusivos de vagões vazios quando comparada com o planejamento manual da ferrovia. Estas reduções poderiam levar a uma redução de custos na distribuição de vagões para a ferrovia.

**PALAVRAS CHAVE.** Distribuição de Vagões. Programação Inteira. Vagões Vazios. Transporte Ferroviário.

**Tópicos. L & T – Logística e Transportes.**

### ABSTRACT

The distribution of empty wagons is important in rail transport planning because most of the wagons, in Brazil, returns empty from dump yard to the loading yard. This empty return raises the operating costs of the railway because a train made up of only empty wagons incurs costs with train driver and fuel, and does not generate revenue. Thus, this paper proposes a new empty wagons distribution strategy where they are distributed using the non-used traction capacity of the trains that already circulate with loaded wagons. To this end, it was proposed an Integer Programming mathematical model using CPLEX 12.6 to solve. Instances based on data from *Ferrovia Centro-Atlântica* (FCA) were created and the proposed strategy presented reduction in the making up trains

only with empty wagons compared with the manual planning of the FCA. These reductions lead to a cost reduction in the distribution of wagons to the railroad.

**KEYWORDS. Wagon distribution. Integer Programming. Empty wagons. Rail transport.**

**Paper topics. L & T – Logistics and Transport.**

## 1. Introdução

O transporte ferroviário de cargas cresceu 28,9% entre os anos de 2006 e 2014 no transporte de uma tonelada útil à distância de um quilômetro (TKU), chegando à marca de 307,3 bilhões de TKU em uma extensão total de 29.291 km [ANTT, 2015, CNT, 2013].

O modo ferroviário pode carregar vários tipos de mercadoria, tais como: minério de ferro, grãos, produtos siderúrgicos, cimento e cal, adubos e fertilizantes, derivados de petróleo, calcário, carvão mineral, clínquer e contêineres. Esse tipo de transporte transporta as mercadorias por grandes distâncias, carregando em um pátio de origem (mina, armazém agrícola, entre outros) até um pátio de descarga (mais comumente no Brasil, um porto) [ANTT 2016].

No entanto, a prática do transporte ferroviário no Brasil mostra que a maior parte dos trens retornam vazios do pátio de descarga para o pátio de carregamento. Isso ocorre porque existem poucas cargas de retorno para o transporte ferroviário. Este retorno vazio eleva os custos operacionais da ferrovia, pois um trem exclusivamente formado de vagões vazios acarreta custos com maquinista, combustível, além de não auferir receita para a ferrovia. Assim, o atendimento à solicitação de vagões vazios pelos pátios de carregamento deve ser realizado de tal forma que os vagões vazios circulem minimamente pela ferrovia e que a formação de trens destinados à circulação exclusivamente de vagões vazios seja minimizada. Na literatura científica, a distribuição e entrega de vagões vazios para atender à demanda dos pátios de carregamento é conhecida como distribuição de vagões vazios e, conforme visto anteriormente, é fator chave para garantir a competitividade e a confiabilidade no transporte ferroviário [Melo et al. 2008].

Atualmente, a maior parte das ferrovias utiliza como estratégia para distribuir vagões vazios a formação de trens que transportam exclusivamente vagões vazios. Este artigo propõe um modelo matemático de Programação Linear Inteira para uma nova proposta de estratégia de distribuição de vagões vazios. Esta nova proposta visa aproveitar a folga de tração dos trens carregados. Por exemplo, para formar um trem que demanda 6.000HP de potência para deslocar o peso dos vagões carregados a ferrovia só dispõe de locomotivas de 4.000HP e, assim, deve-se acoplar duas locomotivas que somadas entregam 8.000HP de potência, gerando, assim, uma folga de tração de 2.000HP. Desta forma, poder-se-ia acoplar um conjunto de vagões vazios que demandasse até os 2.000HP de folga de tração na cauda do trem, evitando assim, a formação de um trem exclusivamente de vagões vazios.

Para testar esta nova estratégia, o modelo matemático proposto foi aplicado à Ferrovia Centro Atlântica (FCA) e foi comparado o número de trens formados pela FCA exclusivamente com vagões vazios para fazer a distribuição de vagões com o número de trens formados exclusivamente de vagões de vagões vazios gerados pelo modelo matemático para a nova estratégia de distribuição de vagões vazios. Além disso, testes teóricos para avaliar a eficiência do modelo foram realizados.

Este trabalho foi estruturado em seis seções, esta seção apresenta a introdução do artigo. Na Seção 2, é apresentado o Problema de Distribuição de Vagões Vazios e é realizada uma revisão bibliográfica sobre o tema. A Seção 3 apresenta o modelo matemático proposto. Na Seção 4, são apresentados os resultados e as análises. Por fim, na Seção 5 é feita a conclusão do artigo.

## 2. O Problema da Distribuição de Vagões Vazios

O problema da distribuição de vagões vazios consiste em alocar os vagões atribuídos pelo método de distribuição aos trens contidos na grade, de modo que estes vagões sejam transportados dos pátios onde existe oferta para pátios onde existe demanda [Costa, 2010].

A abordagem mais tradicional para tratar o problema de distribuição de vagões vazios é a utilização de uma rede espaço-tempo para representar a operação de trens, entre pátios, em certo horizonte de tempo [Crainic e Laporte, 1997].

Na rede espaço-tempo, o horizonte de planejamento é dividido em tempos discretizados que podem ser um dia ou um turno de trabalho ou mesmo de hora em hora. Cada pátio ocorre na rede-espaço tempo tantas vezes quantas forem os períodos de tempo analisados. O fluxo nesta rede representa o movimento de vagões vazios de um pátio para outro ou estoque de vagões vazios em

um mesmo pátio [Joborn et al., 2004], como representado na Figura 1. Cada nó na rede espaço-tempo representa um pátio em um certo momento de tempo e pode ocorrer neste nó uma oferta de ou uma demanda por vagões vazios.

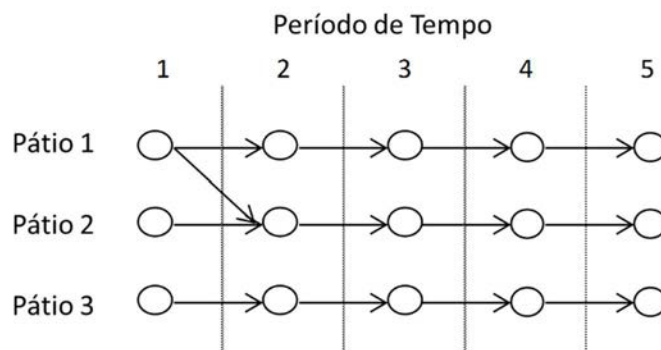


Figura 1 - Rede Espaço-Tempo

A Figura 1 ilustra o fluxo de vagões entre os diversos pátios, em uma ferrovia. O arco entre o (pátio 1, tempo 1) e o (pátio 2, tempo 2) representa um trem iniciando sua circulação no pátio 1 no tempo 1 com destino ao pátio 2 no tempo 2, com sua respectiva folga de capacidade de tração. Na matriz que representa a rede espaço-tempo, o número de colunas é igual ao limite do tempo discretizado no problema e o número de linhas é igual à quantidade de pátios envolvidos no modelo. Os nós representam, em conjunto, os pátios e o tempo, respectivamente, de saída e chegada dos trens, ou seja, trens que saem de um pátio de origem em certo tempo, para um pátio de destino em outro tempo subsequente. Deste modo, tal modelo representaria os movimentos dos trens na forma de uma sequência origem-destino, por meio de um par ordenado, indicando respectivamente: pátio de origem e tempo de origem, bem como pátio de destino e tempo de destino.

Dentro do contexto da distribuição de vagões vazios, vários trabalhos foram encontrados na literatura. Um dos primeiros trabalhos na área de gestão dos vagões vazios foi desenvolvido por White e Bomberault [1969], que considera o problema da distribuição de vagões vazios em toda a rede, dada à previsão de demanda. Um modelo de programação linear de fluxo de rede global é proposto para reposicionar este recurso, a um custo mínimo, para os locais onde eles são necessários para atender a demanda. Vários estudos sobre a confiabilidade da estrada de ferro e a utilização dos vagões foram realizados na década de 1970 pela Associação Americana de Estradas de Ferro junto com a Massachusetts Institute of Technology.

Misra [1972] estudou a distribuição estática e considerou a questão como um problema de transporte, porém não considerava o fator tempo e assumia o fornecimento da demanda equilibrada em cada dia. Como a distribuição dependia do fator tempo, e este foi ignorado, a teoria estática foi pouco estudada.

Philip [1978] utilizou modelos de simulação para distribuir os vagões vazios e analisar as operações de pátio. Dejax e Crainic [1987] reuniram e revisaram em um único trabalho os modelos de gerenciamento e fluxo da frota de vagões vazios. Consideraram o deslocamento de vagões vazios como um problema exclusivo de custo, pois nesta situação os vagões não geram receita e é por esta razão que o planejamento da distribuição de vagões consiste na redução do tráfego destes ativos na condição de vazio, ou pelo menos, deve procurar melhorar a eficiência das operações com vagões carregados.

Haghani [1989] apresentou uma formulação e solução na formação e roteamento de trens, bem como um modelo matemático para distribuição de vagões vazios, no qual considera uma rede espaço-tempo. Tal formulação resultou em um modelo de programação inteira mista, com uma função objetivo não linear, e restrições lineares. Para resolução do modelo foi desenvolvida uma técnica de decomposição heurística.

Spieckermann e Voß [1995] afirmaram que os modelos matemáticos e estudos teóricos estão disseminados nas literaturas específicas, mas que ainda necessitam de serem aplicados no

mundo real, e utiliza-se de estudos para elaboração de um suporte algorítmico para uma empresa de aluguel de vagões alemã. Cordeau et al. [1998] fazem uma revisão da maioria dos modelos propostos durante a década de 80, onde tratam da distribuição de vagões vazios, rotas e programação de trens (tanto de carga, como de passageiro). O estudo faz uma abordagem aos três níveis de planejamento, sendo a atenção concentrada em problemas globais de gerenciamento dos trens. Powell e Carvalho [1998] consideraram um problema da gestão de frota de vagões numa ferrovia em um ambiente de tempo real. Os autores apresentam um modelo que foi usado para atribuir contêineres para vagões.

Crainic e Laporte [1997] apresentaram importantes questões nos sistemas de planejamento e gerenciamento no transporte de carga, abordando todos os três níveis de planejamento: estratégico, tático e operacional. Em cada nível foi feita uma revisão bibliográfica, descrevendo os principais problemas relacionados e como as questões foram abordadas por meio do desenvolvimento em modelos de pesquisa operacional. No nível operacional, ele destaca a modelagem matemática em uma rede espaço-tempo, na qual representa os trens, os pátios, o horizonte de tempo de planejamento, e por fim, o fluxo de vagões vazios.

Fukasawa [2002] abordou os problemas de nível tático e operacional. No problema tático, foi abordado o Problema de Planejamento de Atendimento (PPA), onde o objetivo é definir as diretrizes de atendimento que irão servir como base para todo o planejamento da operação mensal. Neste nível tático, leva-se em conta: a capacidade da malha, o tamanho da frota de vagões, blocagem, classes de vagões, disponibilidade de vagões vazios, entre outros aspectos. Para este problema, foi desenvolvido um modelo mono-periódico baseado no modelo de multi-fluxos. No segundo momento, nível operacional, foi analisado o chamado Problema de Fluxo de Vagões (PFV), no qual é determinada a rota completa de cada vagão na malha ferroviária, bem como a sequência de carregamentos e descarregamentos, no intervalo de uma semana. Neste modelo, o objetivo é definir quando e como atender, ou não, cada demanda, de modo a maximizar o lucro total. Para o PFV, foi proposto um modelo baseado em multi-fluxos, porém desta vez periódico, sendo que nele são contemplados todos os possíveis movimentos e operações de vagões que podem ser feitos no período. Para ambas modelagens foi usado o software CPLEX 7.1.

Segundo Joborn et al. [2004], o problema do processo de distribuição de vagões vazios inclui os problemas de planejamento e desempenho da movimentação de vagões vazios, objetivando a minimização dos custos, de modo a satisfazer a oferta e demanda existentes. Os autores ainda afirmaram que se menos, porém maiores, grupos de vagões pudessem ser atendidos nos pátios, não apenas os processos de manobra e classificação seriam simplificados, mas também o custo unitário do vagão associado seria diminuído, uma vez que a estrutura de custo exhibe um comportamento de economia de escala. A proposta do artigo foi formular e resolver um modelo de otimização para distribuição de vagões vazios.

Uma introdução à gestão de frotas com foco na distribuição de vagões pode ser encontrada em estudos de Powell e Topaloglu [2005], Powell et al. [2007] e Holmberg et al. [1998], os quais propuseram modelos de otimização para melhorar o processo de distribuição de vagões vazios para atender o agendamento de minas de ferro. Bektas [2007] teve por objetivo reduzir o tempo em que os vagões vazios ficam parados nos pátios. Quanto à Sherali e Suharko [1998], estes discutiram estratégias de reposicionamento dos vagões vazios para transporte de automóveis.

Melo et al. [2008] estudaram o problema de planejamento da alocação de vagões de carga por meio de um modelo de Programação Inteira Mista. O horizonte de planejamento estudado foi de quinze dias, sob o ponto de vista do plano operacional, ou seja, a curto prazo. Em seu trabalho eles descreveram cinco modelos, nos quais as funções objetivo solucionavam cinco problemas distintos: minimização dos vagões ociosos retidos em cada pátio, minimização do número de vagões em circulação (vazios e carregados), minimização dos vagões em circulação (apenas vazios), maximização do lucro e a minimização dos custos.

Costa [2010] abordou o problema de distribuição e alocação de vagões vazios em duas etapas distintas. Primeiramente, é realizado o processo de distribuição de vagões, definindo os destinos de cada vagão para atender a demanda de transporte. A partir deste momento, é gerada uma solicitação de movimentação de vagões, a qual serve de dado de entrada para a segunda parte

do problema, que é definir quais trens transportarão os vagões de sua origem até o seu destino (alocação dos vagões). Para este último problema, foi elaborado um algoritmo de alocação, cujo objetivo é encontrar algum trem, dentro da grade de trens, para levar os vagões da origem ao destino.

### 3. Modelo Matemático Proposto

Este artigo propõe como estratégia para distribuir vagões vazios o aproveitamento da folga de tração dos trens carregados para anexar vagões vazios em sua cauda até o limite da capacidade da folga de tração do trem. Com isso, evita-se a formação de trens apenas de vagões vazios, pois estes não trazem nenhuma receita para a ferrovia e geram diversos custos como anteriormente relatado. O objetivo desta estratégia proposta é definir a quantidade e tipo de vagões vazios a serem transportados, determinar em quais trens serão alocados tais vagões vazios, definir origem e destino da distribuição, bem como quando os vagões estarão disponíveis nos pátios de destino para carregamento, tendo como foco a minimização dos custos do transporte de vazios.

Nesta seção, será descrito o modelo matemático proposto baseado numa rede espaço-tempo para distribuição de vagões vazios em uma ferrovia. Propõe-se neste artigo uma adaptação dos modelos propostos por Crainic e Laporte [1997] e Joborn et al. [2004]. Nos modelos de rede espaço-tempo propostos por estes autores, cada nó é representado por um par ordenado (pátio, tempo). O modelo matemático proposto neste artigo difere dos dois artigos citados, pois considera para cada nó um índice único, criando um vetor-espaço tempo, visando simplificar a estrutura de dados do problema.

Para realizar a transformação da matriz espaço-tempo em vetor espaço-tempo, define-se  $np$  como o número de pátios da ferrovia e  $p$  um pátio específico da ferrovia, sendo que  $p$  varia de 0 a  $np - 1$ ,  $ht$  o horizonte de planejamento e  $t$  um tempo específico e discretizado variando de 1 até  $ht$ . Têm-se então duas situações: 1) quando se está no pátio  $p$  no tempo 1; e 2) quando se está no pátio  $p$  no tempo maior que 1. Tomando as duas situações apresentadas anteriormente, pode-se transformar a rede espaço-tempo da Figura 2a no vetor espaço-tempo da Figura 2b por meio da Equação (1).

$$\omega = (t + (p ht)) \tag{1}$$

Na Figura 2 é apresentado um exemplo com cinco pátios e um horizonte de planejamento de cinco dias e são apresentados dois exemplos, um para cada uma das duas situações apresentadas. Primeiro, analisando o pátio 0 no tempo 1 da Figura 2a chega-se à posição 1 do vetor espaço-tempo da Figura 2b calculada pela fórmula  $\omega = (t + (p ht)) = (1 + (0 \cdot 5)) = 1$ . Segundo exemplo, analisando o pátio 2 no tempo 3 da Figura 2a chega-se à posição 13 do vetor espaço-tempo da Figura 2b calculada pela fórmula  $\omega = (t + (p ht)) = (3 + (2 \cdot 5)) = 13$ . O valor de  $\omega$  é limitado pelos valores  $1 \leq \omega \leq (np ht)$ . Assim, após toda a transformação, conforme exemplificado anteriormente, chega-se, então, à Figura 2b que representa o vetor espaço-tempo do problema da Figura 2a.

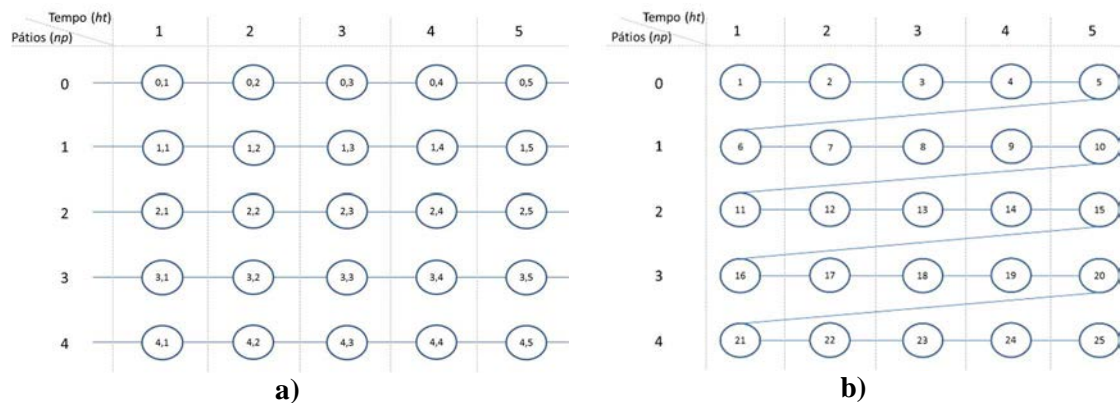


Figura 2 – Representação da Rede Espaço-Tempo. a) Crainic e Laporte [1997] e Joborn et al. [2004] e b) representação do modelo matemático proposto.

Neste artigo os arcos representam o trem carregado e sua folga de capacidade de tração entre os pátios  $i$  (nó de partida) e  $j$  (nó de chegada). Como premissas da rede espaço-tempo tem-se que: 1) um trem não pode realizar trajetos entre pátios em um mesmo período de tempo, ou para períodos de tempo anteriores; 2) para os casos em que deve ser restringida a possibilidade de circulação de trens, o parâmetro folga de capacidade para estes arcos deve ser igual a zero, de modo que, onde houver folga de capacidade entende-se que há algum trem planejado para o trajeto correspondente.

No modelo proposto, são previstos alguns trens exclusivos para distribuição de vagões vazios, sendo atribuído a estes trens, custos de circulação muito elevados. Esta estratégia foi adotada pois a folga de capacidade de tração dos trens circulando poder ser menor que a demanda para distribuir vagões vazios e, portanto, existem situações que obrigatoriamente deverão existir trens exclusivamente de vazios.

O modelo matemático proposto é apresentado a seguir em cinco partes: os conjuntos, os parâmetros, as variáveis de decisão, a função objetivo e as restrições.

#### - Conjuntos

- $P$  - Conjunto de pátios da ferrovia, variando de  $0 \dots (np - 1)$ ;
- $T$  - Conjunto de tempos discretizados, variando de  $1 \dots ht$ ;
- $N$  - Conjunto de nós do vetor espaço-tempo, variando de  $1 \dots (np ht)$ ;
- $V$  - Conjunto de tipos de vagões, variando de  $1 \dots \vartheta$ .

#### - Parâmetros

- $\sigma_{gij}$  - Custo de transportar um vagão vazio no trem  $g \in G$  no trecho  $i \in N$  a  $j \in N$ ;
- $\tau_{\vartheta}$  - Peso do tipo de vagão  $\vartheta \in V$ ;
- $\varphi_{gij}$  - Folga de capacidade do trem  $g \in G$  no trecho  $i \in N$  a  $j \in N$ ;
- $\theta_{\vartheta i}$  - Oferta de vagões vazios do tipo  $\vartheta \in V$  no nó  $i \in N$ ;
- $\alpha_{\vartheta i}$  - Demanda de vagões vazios do tipo  $\vartheta \in V$  no nó  $i \in N$ .

#### - Variáveis de decisão

- $\gamma_{g\vartheta ij}$  - Quantidade de vagões vazios do tipo  $\vartheta \in V$  transportada no trem  $g \in G$  do nó  $i \in N$  ao nó  $j \in N$ ;
- $\beta_{\vartheta i}$  - Estoque de vagões vazios do tipo  $\vartheta \in V$  no nó  $i \in N$ .

Função Objetivo

Minimizar

$$\sum_{g \in G} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sigma_{gij} \sum_{\vartheta \in V} \gamma_{g\vartheta ij} \quad (2)$$

Restrições

$$\sum_{\vartheta \in V} \gamma_{g\vartheta ij} \tau_k \leq \varphi_{gij} \quad \forall g \in G, i, j \in N: i \neq j \quad (3)$$

$$\beta_{\vartheta(t+(p ht))} = \theta_{\vartheta(t+(p ht))} - \sum_{g \in G} \sum_{j \in N} \gamma_{g\vartheta(t+(p ht))j} - \alpha_{\vartheta(t+(p ht))} \quad \forall \vartheta \in V, p \in P, t \in T: t = 1 \quad (4)$$

$$\beta_{\vartheta(t+(p ht))} = \beta_{\vartheta((t+(p ht))-1)} + \theta_{\vartheta(t+(p ht))} - \sum_{g \in G} \sum_{j \in N} \gamma_{g\vartheta(t+(p ht))j} + \sum_{g \in G} \sum_{j \in N} \gamma_{g\vartheta j(t+(p ht))} - \alpha_{\vartheta(t+(p ht))} \quad \forall \vartheta \in V, p \in P, t \in T: t > 1 \quad (5)$$

$$\beta_{\vartheta i} \geq 0 \quad \forall \vartheta \in V, i \in N \quad (6)$$

$$\gamma_{g\vartheta ij} \geq 0 \quad \forall g \in G, \vartheta \in V, i, j \in N: i \neq j \quad (7)$$

A função objetivo, Equação (2), representa o custo total da movimentação de vagões vazios, multiplicando o custo unitário de um vagão  $\vartheta \in V$  por um trem  $g \in G$  no percurso de  $i \in N$  a  $j \in N$ . A função objetivo deve ser minimizada.

As Restrições (3) garantem que a quantidade de vagões vazios transportados respeite o limite da folga de capacidade que cada trem carregado possui em cada trecho da ferrovia.

As Restrições (4) garantem a manutenção do estoque de vagões vazios no nó correspondente no tempo  $t = 1$ , considerando o balanceamento entre oferta e demanda, bem como os vagões que foram enviados para outros nós. Nestas restrições, ocorre o momento inicial de planejamento de cada pátio, ou seja, ainda não existem vagões que podem chegar via trem para tais nós. As Restrições (5) diferem das Restrições (4), pois representam os outros tempos,  $t > 1$ , no vetor espaço-tempo de certo pátio e, assim, consideram também os vagões vazios que chegam de outros pátios em tempos anteriores via trem para o cálculo da continuidade de fluxo, o que não ocorre nas Restrições (4).

As Restrições (6) garantem a não negatividade dos estoques de cada tipo de vagão em cada nó e as Restrições (7) garantem que a quantidade de vagões vazios transportados seja maior ou igual a zero.

#### 4. Apresentação e Análise dos Resultados

Com base em entrevistas com os profissionais da área de distribuição de vagões da Ferrovia Centro Atlântica (FCA), foram elaboradas oito instâncias para testar o modelo matemático proposto. Foram avaliados os seguintes parâmetros: Tempo de execução, GAP e Função Objetivo.



Também foi analisada a quantidade de trens formados exclusivamente por vagões vazios para apurar a viabilidade da estratégia proposta.

Cada uma das oito instâncias testadas representa uma semana de operação e distribuição de vagões na FCA. Para avaliação da estratégia do modelo proposto, as Instâncias de 1 a 5 representam cenários de teste e as Instâncias de 6 a 8 representam cenários reais, de modo a permitir a comparação entre a resolução do modelo matemático proposto e aquela realizada pelo processo manual da FCA.

Atualmente, a FCA utiliza trens formados exclusivamente de vagões vazios para distribuição de vagões vazios. O modelo proposto, como visto anteriormente, tem por objetivo utilizar a folga de capacidade de tração dos trens carregados que hoje já circulam na malha para a distribuição de vagões vazios visando à redução dos trens exclusivos de vazios. Assim sendo, será analisado se esta nova estratégia de distribuir vagões vazios utilizando a folga de capacidade dos trens pode reduzir a formação de trens que transportam exclusivamente vagões vazios.

Na Tabela 1, são apresentadas as oito instâncias testadas referentes aos dados extraídos de diversos corredores de transporte da FCA nos meses de junho a outubro de 2014.

**Tabela 1 – Instâncias para avaliação do modelo matemático**

Instância	Nº de Pátios (un)	Horizonte de Tempo (un)	Nº de Trens (un)
1	3	7	3
2	5	7	5
3	7	7	8
4	10	7	8
5	15	7	8
6	30	7	13
7	30	7	17
8	30	7	27

Para resolver o modelo matemático proposto, usou-se o *solver* CPLEX 12.6 em um computador com processador Intel *i7* com 16 GB de memória RAM. Os resultados obtidos pelo CPLEX podem ser vistos na Tabela 2. Por questões de confidencialidade dos dados da FCA, o valor da função objetivo foi multiplicado por uma constante não divulgada.

**Tabela 2 – Resultados do CPLEX**

Instância	Tempo de Execução (s)	GAP (%)	Função Objetivo (R\$)
1	45	0	6.350.000,00
2	78	0	7.851.500,00
3	184	0	9.534.500,00
4	327	0	10.193.250,00
5	1.121	0	8.125.000,00
6	7.217	0	37.550.000,00
7	10.975	0	36.950.000,00
8	18.159	0	31.170.050,00

Pode se ver que o CPLEX conseguiu encontrar soluções ótimas para todas as instâncias testadas, mesmo as instâncias reais, Instâncias 6, 7 e 8. Para a maior instância, Instância 8, o CPLEX precisou de um tempo de processamento maior, aproximadamente cinco horas.

Para avaliação da nova estratégia proposta, conforme apresentado anteriormente, foram analisados os resultados das Instâncias 6 a 8, as quais representam dados reais da ferrovia. A Tabela 3 apresenta quantos trens exclusivos para distribuir vagões vazios que a FCA teve que formar e

circular para fazer a distribuição de vagões vazios visando atender à demanda (processo manual) e quantidade de trens de vagões vazios que o CPLEX necessitou utilizar após ter otimizado o uso da folga de tração dos trens carregados.

**Tabela 3 – Comparação das instâncias reais para avaliação da estratégia proposta**

Instância	Nº de Trens de Vazios		Redução Nº Trens CPLEX x FCA	
	FCA (un)	CPLEX (un)	Nº de trens (un)	Percentual (%)
6	4	3	1	- 25,0
7	2	2	0	- 0,0
8	4	1	3	- 75,0

Pode-se ver que, em todos os cenários o modelo conseguiu formar menos trens exclusivamente de vagões vazios ou, na pior das hipóteses, a mesma quantidade. Além do custo ser inferior, por formar menos trens exclusivos de vazios, a diminuição de trens na malha permite liberar faixas de circulação para a circulação de mais trens de vagões carregados, que são efetivamente os trens que geram receita para a ferrovia. Vale ressaltar que distribuir vagões por meio de trens exclusivamente de vazios gera um custo muito alto para a ferrovia, pois deverá ser alocada uma locomotiva e um maquinista para um trem que não gera receita. Em contrapartida, a estratégia proposta neste artigo, distribui os vagões vazios para atender a demanda com um custo muito inferior, por aproveitar a folga de capacidade dos trens carregados que já circulam na malha.

Assim sendo, a estratégia de distribuição de vagões vazios proposta neste artigo se mostrou viável e pode trazer resultados significativos para a FCA. Mais ainda, esta estratégia pode ser adotada por qualquer outra ferrovia e, para instâncias de médio porte testadas.

## 5. Conclusão

Este artigo apresentou uma proposta de uma nova estratégia de distribuição de vagões vazios que tem por objetivo aproveitar a folga de tração dos trens carregados. Para avaliar essa estratégia proposta, foi desenvolvido um modelo matemático de Programação Inteira.

Os resultados alcançados pelo CPLEX rodando o modelo matemático proposto mostraram que essa nova estratégia pode trazer ganhos importantes para a ferrovia com uma possível redução de custos. É provável que aplicação da nova estratégia, caso fosse adotada em toda a ferrovia, poderia trazer ganhos substanciais para a FCA. Vale ressaltar que a diminuição de trens na malha, redução de trens exclusivos de vazios, permite liberar faixas de circulação para a circulação de mais trens de vagões carregados, que são efetivamente os trens que geram receita para a ferrovia, ou seja, um ganho adicional para a ferrovia.

Esta estratégia proposta pode ser aplicada a qualquer ferrovia e, assim, trazer mais eficiência e redução de custos ao transporte ferroviário nacional e, quiçá, ao transporte internacional, caso venha a ser adotada por ferrovias internacionais.

Como trabalhos futuros, sugere-se o desenvolvimento de uma heurística ou meta-heurística para o modelo matemático proposto, tendo em vista que para cenários de médio porte testados, o CPLEX levou aproximadamente cinco horas para encontrar a solução ótima. Sugere-se ainda, a análise de modelagem do problema por meio de uma formulação multi-commodity para o problema de dimensionamento de lotes.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPES (458/2013, 74456695/2016, Projeto Vale-FAPES 001) e ao CNPQ (477357/2013-0) pelo apoio financeiro.

## Referências

- ANTT - Agência Nacional de Transportes Terrestres (2016). Web page. <http://www.antt.gov.br/>  
Acessado em: 06 de abril de 2016.
- Bektas, T.; Crainic, T.G.; Morency, V. (2007) - Improving performance of rail yards through dynamic reassignments of empty cars. *Journées de l'Optimisation*. HEC Montréal.
- Brina, H. L. (1983) - Estradas de Ferro, Volume II: Via Permanente. Ed. Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro.
- CNT - Confederação Nacional Do Transporte. Pesquisa CNT de Ferrovias. Brasília: CNT, 2015.
- Cordeau, J-F.; Toth, P.; Vigo, D. (1998) A Survey of Optimization Models for Train Routing and Scheduling. *Transportation Science*, v. 32, n. 4, p. 380-404.
- Costa, J. C. (2010) Algoritmo de Distribuição e Alocação Vagões em Tempo Real – Dissertação de Mestrado, UNICAMP.
- Crainic, T. G.; Laporte, G. (1997) Planning Models for Freight Transportation. *European Journal of Operational Research*, v. 97, p. 409-438.
- Dejax, P. J.; Crainic, T. G. (1987) A Review of Empty Flows and Fleet Management Models in Freight Transportation. *Transportation Science*, v. 21, n. 4, p. 227-248.
- Fukasawa, R. (2002) Resolução de problemas de logística ferroviária utilizando programação inteira – Dissertação de Mestrado, PUC-RJ.
- Haghani, A. E. (1989) Formulation and Solution of a Combined Train Routing and Makeup, and Empty Car Distribution Model. *Transportation Research B*, v. 23B, n. 6, p. 433-452.
- Holmberg, K.; Joborn, M.; Lundgren, J. T. (1998) Improved Empty Freight Car Distribution. *Transportation Science*, v. 32, n. 2, p. 163-173.
- Joborn, M.; Crainic, T. G.; Gendreau, M.; Holmberg, K.; Lundgren, J. T. (2004) Economies of Scale in Empty Freight Car Distribution in Scheduled Railways. *Transportation Science*, v. 38, n. 2, p. 121-134.
- Melo, M. C. V. ; Barros Neto, J. F. ; Nobre Jr, E.F. (2008) Problema de Planejamento da Alocação de Vagões de Carga: uma Abordagem via Modelagem Matemática. CNT - Confederação Nacional dos Transporte e ANPET - Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes. (Org.). *Transporte em Transformação XIII*.
- Misra, S. (1972). Linear programming of empty wagon disposition. *Rail International* 3.
- Philip, C.E. (1978) - Freight car utilization and railroad reliability: the application of an inventory model to the railroad empty car distribution process. *Technical Report MIT-CTS-78-2*, Center for Transportation Studies, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA.
- Powell, W.B., Bouzaïene-Ayari, B., Simao, H.P. (2007) - Dynamic models for freight transportation. In: Barnhart, C., Laporte, G. (Eds.), *Transportation, Handbooks in Operations Research and Management Science*, vol. 14. North-Holland, Amsterdam.

Powell, W.B., Carvalho, T.A. (1998) - Real-time optimization of containers and flatcars for intermodal operations. *Transportation Science* 32 (2).

Powell, W.B., Topaloglu, H. (2005) - Fleet management. In: Wallace, S., Ziemba, W. (Eds.), *Applications of Stochastic Programming Math Programming Society-Series on Optimization*. SIAM, Philadelphia, PA.

Sherali, H.D., Suharko, A.B. (1998) - A tactical decision support system for empty railcar management. *Transportation Science* 32 (4).

Spieckermann, S.; VOß, S. (1995) A case study in empty railcar distribution. *European Journal of Operational Research*, v. 87, p. 586-598.

White, W.W, Bomberault, A.M. (1969), "A network algorithm for empty freight car allocation" *IBM System Journal* 8, 147-169.