

PLANEJAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO DE LOTES DE VAGÕES VAZIOS PARA ATENDIMENTO AO PLANO DE CARREGAMENTO DE MINAS DE MINÉRIO DE FERRO A PARTIR DE DIVERSOS PÁTIOS DE TRIAGEM

Hendriigo Venes

Rodrigo de Alvarenga Rosa

Universidade Federal do Espírito Santo
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Rodrigo Pirola Pestana

Vale S/A

RESUMO

A Estrada de Ferro Vitória Minas realiza o transporte de minério de ferro de suas 12 minas, dispersas geograficamente, até o Porto de Tubarão. Para chegar nas minas retornando do porto, os trens devem passar por diversos pátios de triagem, onde o trem pode ser desmembrado em até 4 lotes de 84 vagões. Cada desmembramento leva aproximadamente 5 horas para ser realizado. O objetivo é reduzir ao máximo o número de desmembramentos, reduzindo custos e aproveitando melhor a frota. Assim, é proposto um modelo matemático de Programação Linear Inteira Mista para distribuição dos lotes de vagões, passando por diversos pátios de triagem, visando atender a demanda das minas por lotes de vagões, minimizando o número de desmembramentos. Foi utilizado CPLEX Optimization Studio 12.7 para rodar o modelo com instâncias reais. Os resultados apresentam uma distribuição com menor número de desmembramentos que o planejamento manual realizado pela EFVM.

ABSTRACT

Vitória Minas Railway transports iron ore from its geographically dispersed mines to the Tubarão Port. From the port to the mines, trains must go through several sorting yards, where the train can be dismantled in up to 3 blocks of 84 wagons. Each dismembering takes approximately 5 hours to complete. The aiming is to diminish the amount of dismembering, reducing costs and improving the use of the fleet. Thus, a mathematical model of Mixed Linear Integer Programming is proposed to distribute batches of wagons, passing through several sorting yards, to meet the demand of the mines for empty wagons, minimizing the number of dismemberments. CPLEX Optimization Studio 12.7 was used to run the model in real instances. Results show a distribution with less dismemberments than the manual planning done by EFVM.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com a Empresa de Planejamento e Logística (EPL) (EPL, 2015), as ferrovias brasileiras são responsáveis por 15% do transporte das cargas movimentadas no país, sendo que o minério de ferro representa 78,9% desse percentual. Dentre as empresas que possuem participação no mercado ferroviário brasileiro destaca-se a Vale S/A, responsável pelo gerenciamento da Estrada de Ferro Vitória Minas (EFVM). A EFVM é a segunda ferrovia mais produtiva do Brasil, respondendo por 36,8% do transporte de carga do país (ANTT, 2015).

Para escoar a sua extração, o sistema da EFVM possui 12 pontos de carregamento (minas), em Minas Gerais, com destino ao Porto de Tubarão, no Estado do Espírito Santo, conforme a Figura 1. Dessas 12 minas, 3 encontram-se em outra ferrovia (Ferrovia Centro Atlântica (FCA)) e os trens da EFVM chegam a estas minas circulando sob o regime de tráfego mútuo com a FCA. No entanto, os vagões retornam vazios para carregar nas minas. Nesse retorno, existe uma única linha até o Pátio de Triagem de Desembargador Drumond e a partir desse pátio, existem duas opções a seguir: o Pátio de Costa Lacerda e o Pátio de Laboriau. A partir de Costa Lacerda, pode-se ir para: o pátio de triagem de Fazendão com o ramal de Fábrica, o pátio de Engenheiro Bandeira e as minas de Alegria, Timbopeba, Fábrica, Fábrica Muro e Patrag, ou ainda para o Ramal de Belo Horizonte, que possuem as minas de Brucutu, Gongo Soco, Capitão Eduardo, Azurita e Divinópolis. A partir do pátio de triagem de Laboriau, pode-se ir as minas de João Paulo e Conceição.

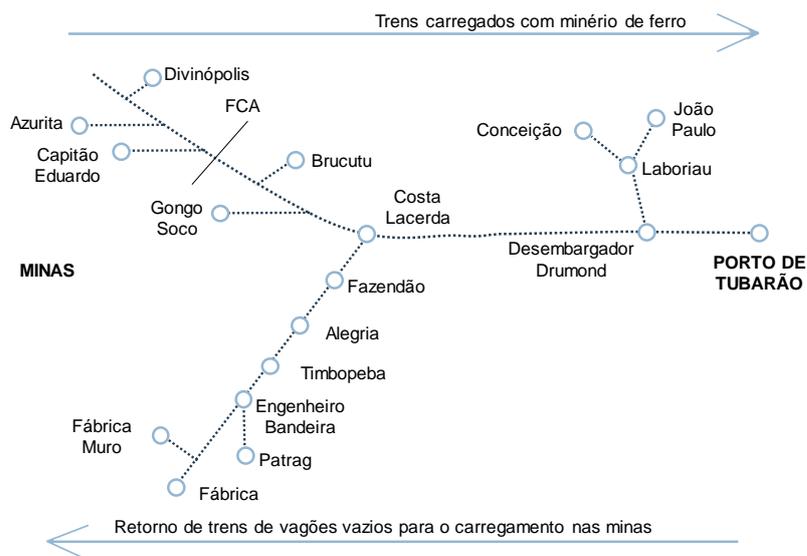


Figura 1: Localização dos pátios da EFVM

O problema enfrentado pela EFVM é definir a partir do pátio de Desembargador Drumond, a distribuição ideal dos trens para entregar lotes de vagões vazios nas minas visando atender suas demandas de carregamento planejadas. Os trens chegam em Desembargador Drumond com uma formação de até 4 lotes de 84 vagões (existe a condição de 1 Lote – 84 vagões, 2 Lotes – 168 vagões, 3 Lotes – 252 vagões e 4 lotes – 336 vagões (somente vazios)) e o objetivo principal do planejamento é reduzir o número de desmembramentos dos lotes dos trens nos pátios de triagem de Drumond, Laboriau, Costa Lacerda, Fazenda e Engenheiro Bandeira, pois esta operação incide em custos e em tempos de manobra, em torno de 5 horas, que aumentam o ciclo de vagões.

Como o planejamento é diário, foram utilizados os tempos de saída dos trens com lotes de vagões vazios do Pátio de Drumond, o tempo de percurso para viajar deste pátio até os pátios de triagem e destes para as minas (Figura 1). O tempo de viagem desde Drumond até a mina somado ao tempo de operação da mina deve ser menor que 24 horas. Dessa forma, esse artigo propõe um modelo matemático de Programação Linear Inteira Mista para distribuição de vagões a partir de diversos pátios de triagem para atender a demanda por vagões vazios com o objetivo de reduzir o desmembramento de lotes de vagões nesses pátios de triagem.

Na literatura, foram encontrados vários artigos sobre a distribuição de vagões vazios. Entretanto, após a revisão bibliográfica, até o momento não foi encontrado nenhum artigo que tivesse o objetivo de distribuir vagões vazios tendo como objetivo a minimização de desmembramento de lotes dos trens. Os artigos de Barros (2008, 2010) trataram de problema semelhante ao tratado neste artigo, porém não consideraram como objetivo a minimização de desmembramento de lotes de vagões dos trens que é o foco principal da ferrovia estudada nesse artigo. Assim, o presente artigo apresenta uma abordagem diferenciada para a distribuição de lotes de vagões vazios a partir de vários pátios de triagem adequada a necessidade do problema estudado. Vale ressaltar que a abordagem pode ser utilizada por qualquer outra ferrovia que possua pontos de carregamento dispersos geograficamente atendidos por vários pátios de triagem e sejam impactadas pelo tempo de manobra para desmembramento dos trens.

Este artigo é dividido em 6 seções. A primeira é esta introdução, seguida pela Seção 2 com referencial teórico e revisão bibliográfica. A Seção 3 apresenta o estudo de caso e as instâncias utilizadas para testar o modelo matemático. A Seção 4 apresenta o modelo matemático proposto nesse artigo e a Seção 5 apresenta os resultados alcançados e suas análises. Por fim, na Seção 6 são apresentadas as conclusões.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A alocação de vagões vazios contidos na grade para carregamento é uma das principais atividades de transporte de carga do modo ferroviário. Fazer uma distribuição eficiente, considerando as particularidades da ferrovia, significa, além da redução de tempo improdutivo, atender a demanda de carregamento com boa qualidade de forma que os vagões sejam levados dos pátios onde há oferta até os pátios onde existe uma demanda. O problema clássico de distribuição de vagões vazios se refere ao transporte de vagões vazios de pátios onde existe oferta para pátios onde existe demanda. O planejamento considera o número, tipo, o pátio e o tempo que os vagões vazios estão vazios e o número, o tipo, o pátio e o tempo que existem demandas por vazios. O problema da distribuição de vagões vazios visa atender a demanda de transporte objetivando a minimização dos custos de distribuição de vagões. 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).

Neste presente artigo, conforme apresentado na introdução, o problema de distribuição de vagões difere dessa abordagem clássica, pois precisa ser conhecido o fluxo de lotes de vagões vazios ao longo dos pátios da ferrovia, respeitando diversas restrições e minimizando o número de desmembramentos nos pátios de triagem. Na abordagem clássica, diversos artigos foram publicados. Dentre eles, citam-se: Grain (1985), Dejax e Crainic (1987), Haghani (1987 e 1989), Caldara (1996), Holmberg, Joborn e Lundgren (1998), Fukasawa (2002), Joborn *et al.* (2004), Hamacher (2005), Powel e Topaloglu (2005), Powell *et al.* (2007), Bektas, Melo, Barros e Nobre (2008), Cranic e Morency (2009), Costa (2010), Foletto *et al.* (2016) e Heydari e Melachrinoudis (2017).

Os trabalhos publicados que mais se aproximam do estudo de caso desse artigo são listados a seguir. Barros (2008) propôs a distribuição horária de vagões vazios para carregamento de minério na EFVM, utilizando um *solver*. Em seu trabalho a distribuição horária foi feita manualmente sem otimizar o tempo de fila nos pontos de carga. O trabalho da autora difere do problema abordado neste artigo, pois não trata a distribuição dos lotes de vagões vazios visando a minimização do desmembramento, apenas distribuindo lotes vazios para carregamento de forma a reduzir os tempos de vagões parados no pátio de origem. Barros (2010) resolveu um problema muito similar ao proposto nesta dissertação e ao problema proposto pela própria autora em um trabalho similar (Barros, 2008). Utilizando-se de uma ferramenta de pesquisa operacional para otimizar e fazer a distribuição diária de vagões vazios com método Simplex, o trabalho da autora é dividido em duas etapas. Primeiramente é feita a distribuição horária com a otimização do tempo de percurso na rede e em um segundo momento a distribuição horária com minimização do tempo de fila no ponto de carga. Novamente o trabalho difere da proposta desta pesquisa por ser uma proposta de distribuição, visando a minimização do desmembramento de lotes de vagões vazios, considerando os tempos de operação, *transit times*, tempos de saída e chegada, de modo a evitar filas nas minas, congestionamentos nos pátios e cadenciar o despacho de trens atendendo as demandas.

3. ESTUDO DE CASO E INSTÂNCIAS

A programação diária dos lotes de vagões GDE (vagões com abertura superior os quais são descarregados em viradores) compreende a principal atividade de planejamento envolvida no transporte do minério de ferro, merecendo assim, uma atenção especial. Um lote é considerado como um conjunto de 84 vagões do tipo GDE. Na EFVM, atualmente podem circular trens com formação de 1, 2, 3 (vagões carregados ou vazios) ou até 4 lotes (somente vazios). Diariamente são distribuídos cerca de 5.000 vagões vazios e o planejamento é realizado de forma manual.

A ferrovia atende aos seguintes os pontos de carregamento representados pelas letras VJP (João Paulo), VCE (Conceição), VBR (Brucutu), VGS (Gongo Soco), VAL (Alegria), VTO (Timbopeba), VFM (Fábrica Muro), VFA (Fábrica), VPG (Patrag), VCD (Capitão Eduardo), VDV (Divinópolis) e AZU (Azurita). O ponto de corte na linha é o entroncamento entre a EFVM e FCA (trecho chamado de intercâmbio). Existem também 5 pontos de formação e desmembramento de trens, pátios de triagem, que são os pontos VDD (Desembargador Drumond), VLB (Laboriau) e VFZ (Fazendão), VCS (Costa Lacerda) e VGB (Engenheiro Bandeira).

O problema analisado trata de uma estratégia para distribuir vagões vazios originados no Porto de Tubarão de forma atender o programa diário de carregamento das minas de minério de ferro com o menor número de desmembramentos nos pátios de triagem. Entretanto, existe uma única linha do Porto de Tubarão até o Pátio de Triagem de Desembargador Drumond, portanto considera-se esse último pátio como a origem dos lotes de vagões de vazios. A partir desse pátio, existem duas opções a seguir: Pátio de Costa Lacerda, Pátio de Laboriau. A partir do pátio de Costa Lacerda é possível ir direto às minas de Brucutu, Gongo Soco, Capitão Eduardo, Azurita, Divinópolis (estas últimas três estando na parte da FCA) ou seguir até o pátio de triagem de Fazendão. A partir deste pátio pode-se ir ao ramal de Fábrica com o pátio de Engenheiro Bandeira (VGB) e as minas de VAL, VTO, VPG, VFM E VFA. A partir do pátio de triagem de Laboriau, pode-se ir as minas de VJP e VCE.

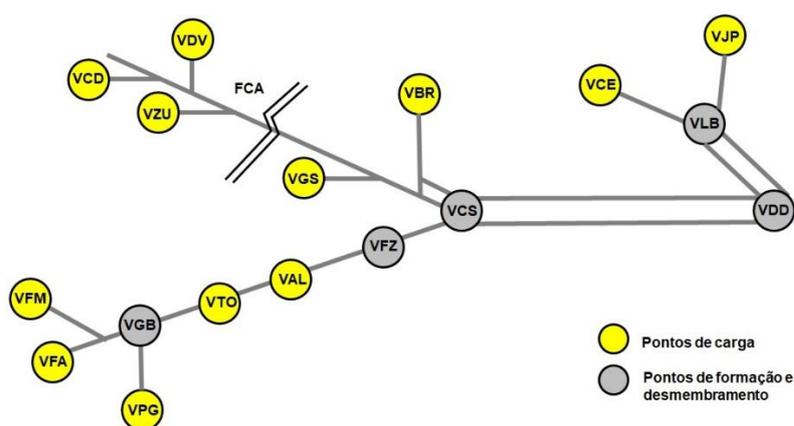


Figura 2 – Localização das minas ao longo da EFVM

Foram elaboradas 5 Instâncias para teste do modelo. As Instâncias 1 e 2 foram elaboradas com dados gerados aleatoriamente, testando o tempo e a distribuição elaborada pelo modelo matemático, cada uma com 4 pátios de origem, 2 pátios de triagem e 3 minas. Ambas instâncias apresentam uma oferta maior do que a demanda.

Para análise operacional, foram elaboradas as Instâncias 3 e 4 com dados reais da EFVM referentes aos dias 15 e 17/02/2018, com um pátio de origem, 4 pátios de triagem e 12 minas. Ambas contam com 1 origem (VDD), 4 pátios de triagem, sendo VLB, que distribui vagões vazios para VCE e VJP, VCS que distribui vagões vazios para VBR, VGS, VCD, VZU e VDV e o ramal de Fábrica onde está o pátio de VFZ distribuindo vagões vazios para VAL, VTO, VFM, VPG e VFA. O pátio de VGB apenas distribui vagões também para VPG, VFM e VFA. Conta também com 12 minas (VJP, VCE, VBR, VGS, VAL, VTO, VPG, VFM, VFA e VCD, VDV, VZU, na FCA). Assim, é possível comparar os resultados obtidos pelo CPLEX com os casos reais de distribuições já elaboradas pela EFVM. Para Instância 3 houve uma oferta de 17 trens, com 39 lotes de vagões vazios e uma demanda de 39 lotes nas minas. Para a Instância 4 foram distribuídos 12 trens com 30 lotes de vagões vazios, atendendo a demanda de 30 lotes nas minas.

A Instância 5 foi elaborada para testar como o modelo se comporta para instâncias maiores que as encontradas no caso da EFVM. Foram considerados 30 origens, 20 pátios de triagem, 60 minas e 100 trens. Para uma oferta de 230 lotes de vagões vazios e uma demanda de 230 lotes nas minas. Foram avaliados para todas as instâncias os seguintes indicadores: Tempo de execução e Função Objetivo (número de desmembramentos necessários).

Tabela 1: Instâncias de Teste

Instância	Oferta (lotes)	Demanda (lotes)	Objetivo
1	12	11	Avaliar a distribuição com valores aleatórios, quando a demanda é menor que a oferta para um número de 4 trens, para demonstração do modelo.
2	16	15	Avaliar a distribuição com valores aleatórios, quando a demanda é menor que a oferta para um número de 6 trens, para demonstração do modelo.
3	39	39	Avaliar a distribuição de vagões vazios com dados reais da EFVM, para demanda igual a oferta.
4	30	30	Avaliar a distribuição de vagões vazios com dados reais da EFVM, para demanda igual a oferta.
5	230	230	Avaliar como o modelo se comporta para instâncias maiores.

4. MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO

É proposto um modelo matemático de Programação Linear Inteira Mista para cumprir a programação diária de carregamento de minério de ferro. As demandas das minas (destinos) devem ser atendidas em um horizonte de no máximo 24 horas incluindo tempo de operação nas minas, o tempo de desmembramento, tempo de viagem entre os pátios e o tempo de saída do pátio inicial.

Para a distribuição dos lotes de vagões vazios, considera-se no o número de pátios onde se originam os trens de vagões vazios; nd o número de pátios de triagem onde pode ocorrer o desmembramento de trens em lotes; nm o número de minas que demandam lotes de vagões vazios para carregar e nt o número de trens de lotes de vagões vazios circulando no período de planejamento.

Os conjuntos do modelo matemático são: I - Conjunto de pátios que originam lotes, $I \in \{1 \dots no\}$; J - Conjunto de pátios de triagem onde podem ocorrer desmembramento de trens em lotes, $J \in \{1 \dots nd\}$; K - Conjunto de minas que demandam lotes para carregar, $K \in \{1 \dots nm\}$; T - Conjunto de trens de lotes, de $T \in \{1 \dots nt\}$. Os parâmetros do modelo são: lm

- Número máximo de lotes de vagões vazios; ov_{it} - Oferta de lotes em um trem $t \in T$ no pátio de origem $i \in I$; dv_k - Demanda de lotes na mina $k \in K$; m - Parâmetro utilizado para lógica do modelo matemático, adotado o valor de 0,001; M - Parâmetro utilizado para lógica do modelo matemático, adotado o valor de 9999,0; to - Tempo de chegada do trem $t \in T$ na origem $i \in I$; tot - Tempo para o trem $t \in T$ viajar da origem $i \in I$ até os pátios de triagem $j \in J$; ttm - Tempo para o trem $t \in T$ viajar dos pátios de triagem $j \in J$ até as minas $k \in K$; tmt - Tempo de manobra do trem $t \in T$ nos pátios de triagem $j \in J$; tmo - Tempo de manobra do trem $t \in T$ na origem $i \in I$; tom - Tempo de operação do trem $t \in T$ na mina $k \in K$; ht - Tempo do horizonte de trabalho; mt - número máxima possível de desmembramento por trem .

As variáveis de decisão do modelo são: x_{ijt} - Número de lotes do trem $t \in T$ que são movimentados do pátio de origem $i \in I$ até o pátio de triagem $j \in J$; w_{jkt} - Número de lotes do trem $t \in T$ que são movimentados do pátio de triagem $j \in J$ até a mina $k \in K$; df_{ijkt} - Diferença do número de lotes do trem $t \in T$ que são movimentados do pátio de origem $i \in I$ até o pátio de triagem $j \in J$; fx_{ijt} - Variável binária que assume valor igual a 1 caso exista movimentação de lotes de vagões vazios do trem $t \in T$, do pátio $i \in I$ até o pátio de triagem $j \in J$ e 0 caso contrário; fw_{jkt} - Variável binária que assume valor igual a 1 caso exista movimentação de lotes de vagões vazios do trem $t \in T$, do pátio de triagem $j \in J$ até a mina $k \in K$ e 0 caso contrário; dsm_{ijkt} - Variável binária que assume valor igual a 1 caso haja desmembramento dos trens $t \in T$ nos pátios intermediários de transbordo $j \in J$ e 0 caso contrário; dso_{ijt} - Variável binária que assume valor igual a 1 caso haja desmembramento dos trens $t \in T$ nos pátios de origem $i \in I$ e zero caso contrário; tc - Tempo de chegada do trem $t \in T$ na mina $k \in K$; dt_{ijt} - Número de desmembramento que ocorre em cada trem $t \in T$; dot_{it} - Variável que garante o desmembramento na origem $i \in I$; dog_{it} - Variável binária que para cálculo de quantos lotes ficam na origem após desmembramento; y_{ijkt} - variável para linearização do cálculo do desmembramento; z_{ijkt} - Variável para linearização do cálculo do desmembramento; s_{ijkt} - Variável para linearização de fx_{ijt} e fw_{jkt} para cálculo do tempo; r_{ijkt} - Variável para linearização da multiplicação de s_{ijkt} e dsm_{ijkt} .

Função objetivo:

$$\text{Minimizar } \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} dt_{ijt} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} dso_{ijt} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j \in J} x_{ijt} \leq ov_{it} \quad \forall i \in I, t \in T: \quad (2)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{t \in T} w_{jkt} = dv_k \quad \forall k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ijt} - \sum_{k \in K} w_{jkt} = 0 \quad \forall j \in J, t \in T \quad (4)$$

$$fx_{ijt} \geq m x_{ijt} \quad \forall i \in I, j \in J, t \in T \quad (5)$$

$$fx_{ijt} \leq M x_{ijt} \quad \forall i \in I, j \in J, t \in T \quad (6)$$

$$fw_{jkt} \geq m w_{jkt} \quad \forall j \in J, k \in K, t \in T \quad (7)$$

$$fw_{jkt} \leq M w_{jkt} \quad \forall j \in J, k \in K, t \in T \quad (8)$$

$$dsm_{ijkt} \geq m df_{ijkt} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (9)$$

$$dsm_{ijkt} \leq M df_{ijkt} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (10)$$

$$dt_{ijt} \geq \sum_{k \in K} dsm_{ijkt} - 1 \quad \forall i \in I, j \in J, t \in T \quad (11)$$

$$0 \leq dt_{ijt} \leq mt \quad \forall i \in I, j \in J, t \in T \quad (12)$$

$$dso_{ijt} \geq m (ov_{it} fx_{ijt} - x_{ijt}) \quad \forall i \in I, j \in J, t \in T \quad (13)$$

$$dso_{ijt} \leq M (ov_{it} fx_{ijt} - x_{ijt}) \quad \forall i \in I, j \in J, t \in T \quad (14)$$

$$dog_{it} \geq m (ov_{it} - \sum_{j \in J} x_{ijt}) \quad \forall i \in I, t \in T \quad (15)$$

$$dog_{it} \leq M (ov_{it} - \sum_{j \in J} x_{ijt}) \quad \forall i \in I, t \in T \quad (16)$$

$$dot_{it} \geq \sum_{j \in J} dso_{ijt} - (1 - dog_{it}) \quad \forall i \in I, t \in T \quad (17)$$

$$0 \leq dot_{it} \leq mt \quad \forall i \in I, t \in T \quad (18)$$

$$y_{ijkt} \leq lm fw_{jkt} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (19)$$

$$y_{ijkt} \leq x_{ijt} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (20)$$

$$y_{ijkt} \geq x_{ijt} - lm (1 - fw_{jkt}) \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (21)$$

$$z_{ijkt} \leq lm fx_{ijt} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (22)$$

$$z_{ijkt} \leq w_{jkt} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (23)$$

$$z_{ijkt} \geq w_{jkt} - lm (1 - fx_{ijt}) \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (24)$$

$$df_{ijkt} = y_{ijkt} - z_{ijkt} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (25)$$

$$tc_{ijkt} = to_{it} s_{ijkt} + \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (26)$$

$$(tot_{ij} ttm_{jk}) s_{ijkt} + tmt_j r_{ijkt} \\ tc_{ijkt} \leq ht - (tom_k w_{jkt}) \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (27)$$

$$s_{ijkt} \leq fx_{ijt} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (28)$$

$$s_{ijkt} \leq fw_{jkt} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (29)$$

$$s_{ijkt} \geq fx_{ijt} + fw_{jkt} - 1 \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (30)$$

$$r_{ijkt} \leq s_{ijkt} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (31)$$

$$r_{ijkt} \leq dsm_{ijkt} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (32)$$

$$r_{ijkt} \geq s_{ijkt} + dsm_{ijkt} - 1 \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (33)$$

$$x_{ijt} \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall i \in I, j \in J, t \in T \quad (34)$$

$$w_{jkj} \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall j \in J, k \in K, t \in T \quad (35)$$

$$y_{ijkt} \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (36)$$

$$z_{ijkt} \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (37)$$

$$fx_{ijt} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J, t \in T \quad (38)$$

$$fw_{jkt} \in \{0,1\} \quad \forall j \in J, k \in K, t \in T \quad (39)$$

$$dsm_{ijkt} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (40)$$

$$dog_{it} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, t \in T \quad (41)$$

$$dso_{ijt} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J, t \in T \quad (42)$$

$$s_{ijkt} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (43)$$

$$r_{ijkt} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (44)$$

$$tc_{ijkt} \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (45)$$

A função objetivo, Equação (1), que deve ser minimizada, representa o número de desmembramentos realizados para a distribuição dos lotes de vagões vazios de cada trem $t \in T$ ao longo de todo fluxo dos vagões para atender a demanda das minas. Na primeira parcela é calculado o desmembramento dos lotes de cada trem nos pátios de triagem $j \in J$, já a segunda parcela calcula o desmembramento dos trens antes da saída da origem $i \in I$.

As Restrições (2) asseguram que o fluxo saindo da origem $i \in I$ não pode ser maior que a oferta de lotes de vagões vazios por trem. As Restrições (3) garantem toda demanda por lotes de vagões vazios nas minas deve ser atendida. O conjunto das Restrições (4) garante a conservação de fluxo no nó. As Restrições (5) e (6) definem se há fluxo entre os nós que representam os pátios de origem $i \in I$ e os nós que representam os pátios de triagem $j \in J$. As Restrições (7) e (8) apenas diferem das Restrições (5) e (6) pois asseguram a determinação do fluxo entre os pátios de triagem $j \in J$ e as minas $k \in K$.

As Restrições (9) e (10) determinam que se existir diferença de fluxo, haverá desmembramento nos pátios de triagem $j \in J$. As Restrições (11) garantem o desmembramento em cada trem $t \in T$ em função do desmembramento nos pátios de triagem $j \in J$. O conjunto das Restrições (12) garante que o número de desmembramento em cada trem $t \in T$ seja inteira, positiva e menor que o número máximo possível de desmembramento por trem. As Restrições (13) e (14) calculam o desmembramento nos nós que representam os pátios de origem $i \in I$. As Restrições (15) e (16) calculam os lotes desmembrados que ficaram parados na origem $i \in I$. As Restrições (17) asseguram o cálculo dos trens $t \in T$ na origem $i \in I$ em relação ao desmembramento e a quantidade desmembrada na origem $i \in I$. As Restrições (18) garantem que a quantidade desmembrada seja maior que zero e menor que o número máximo de desmembramento por trem $t \in T$. Os conjuntos das Restrições (19) a (21) garantem o cálculo da variável y_{ijkt} para linearização de $x_{ijt} f w_{jkt}$, assim como os conjuntos das Restrições (22) a (24) garantem o cálculo da variável z_{ijkt} para linearização de $w_{jkt} f x_{ijt}$. O conjunto das Restrições (25) garante o cálculo da diferença dos fluxos nos arcos entre a origem $i \in I$ e os pátios de triagem $j \in J$ e os arcos entre os pátios de triagem $j \in J$ e as minas $k \in K$ por meio da diferença das variáveis de linearização y_{ijkt} e z_{ijkt} .

O conjunto das Restrições (26) calcula o tempo de chegada dos trens $t \in T$ nas minas $k \in K$. O conjunto das Restrições (27) determina o horizonte máximo de trabalho. As Restrições (28) a (30) asseguram a linearização de $f x_{ijt}$ e $f w_{jkt}$ para o cálculo do tempo, por meio da variável s_{ijkt} . Os conjuntos das Restrições (31) a (33) asseguram a linearização de r_{ijkt} em função da variável anterior, s_{ijkt} multiplicada pelo desmembramento nos pátios de triagem $j \in J$ (caso ocorra). Os conjuntos das Restrições (34) a (45) definem o domínio das variáveis.

5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Utilizou-se o CPLEX Optimization Studio 12.7 para executar o modelo matemático em um computador com processador Intel i7 com 16GB de memória RAM. Os resultados são apresentados na Tabela 2. Foram encontradas as soluções ótimas para todas as instâncias testadas e nos casos reais da EFVM, esse tempo foi inferior a 2,2 segundos, permitindo não só o planejamento, mas também o replanejamento a qualquer momento caso seja preciso da distribuição dos lotes de vagões vazios.

Tabela 2 - Resultados do CPLEX

Instância	Tempo de Execução (s)	Função Objetivo (Número de lotes desmembrados)
1	0,39	1
2	0,55	2
3	1,22	1
4	2,19	0
5	1.620,80	0

Na Instância 1 foram ofertados 4 trens com total de 12 lotes para uma demanda de 11 lotes de vagões vazios nas minas de carregamento e apresentando 1 desmembramento apenas. É possível verificar na Figura 3 que houve desmembramento de um trem já na origem $i = 1$. Na origem $i = 1$ foi formado o trem t_1 com 3 lotes, este mesmo trem foi desmembrado e deixou a origem com apenas 2 lotes. Na origem $i = 2$ foi ofertado o t_2 com 3 lotes. Na origem $i = 3$ foi formado o trem t_3 com 3 lotes e na origem $i = 4$ foi formado o trem t_4 com 3 lotes. Toda demanda nas minas foi atendida satisfatoriamente e todos tempos totais ficaram abaixo do horizonte de trabalho (1.440 minutos), sendo que t_2 obteve o maior tempo, 1.210 minutos.

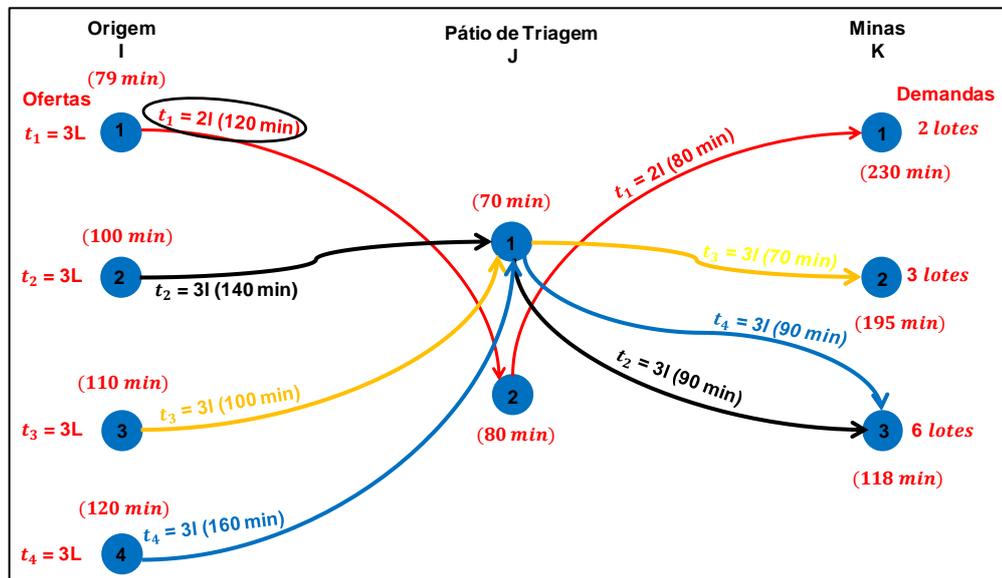


Figura 3: Representação da Instância 1

A Instância 2 avaliou a distribuição para oferta de 16 lotes e demanda de 15 lotes de vagões vazios. Na Figura 4, nota-se que houveram dois desmembramentos, um trem 2 lotes na origem $i = 1$ e um trem em dois novos trens no pátio de triagem $j = 1$. Da origem $i = 1$ foram formados os trens t_1 com 3 lotes e o trem t_6 com 2 lotes, sendo que o último deixou a origem com apenas 1 lote. Da origem $i = 2$ saiu apenas o trem t_2 com 3 lotes. Na origem $i = 3$, o t_3 partiu com 3 lotes e t_5 originalmente com 2 lotes, desmembrou no pátio de triagem $j = 1$ em dois trens com 1 lote cada para atender as demandas das minas $k = 1$ e $k = 2$. Na origem $i = 4$, partiu o t_4 com 3 lotes. Toda a demanda das minas foi atendida satisfatoriamente e todos tempos totais foram menores que o horizonte de trabalho de 1.440 minutos, sendo o maior tempo do trem t_5 com 1.340 minutos.

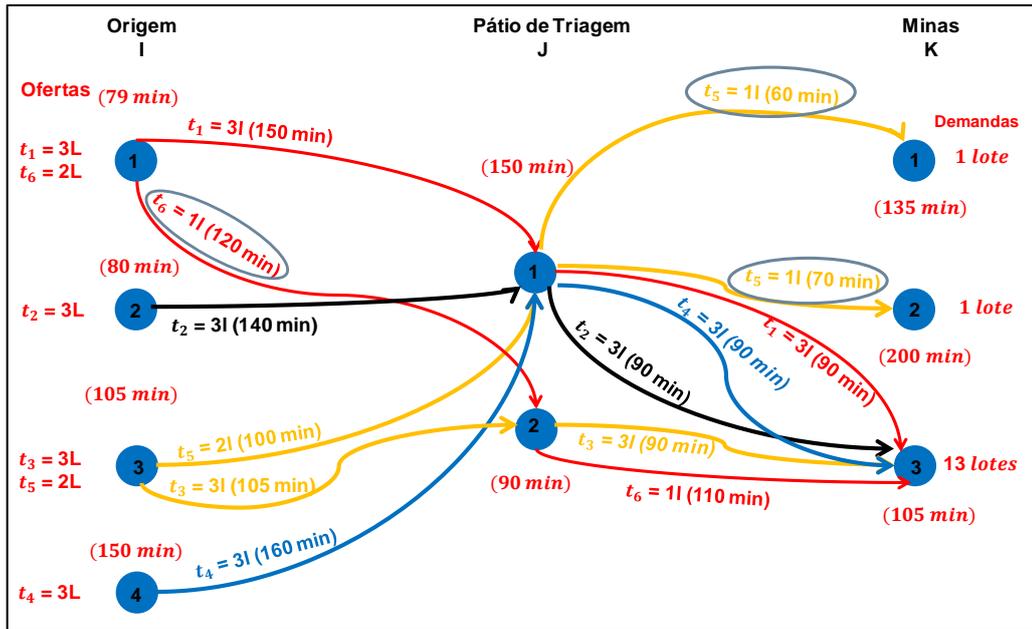


Figura 4: Representação da distribuição na Instância 2

Conforme mencionado, as Instâncias 3 e 4 utilizaram dados reais da EFVM e foram comparadas com as distribuições manuais realizados nos dias 15 e 17/02/2018, respectivamente. Para a Instância 3 houve uma oferta de 17 trens, com 39 lotes de vagões vazios e uma demanda de 39 lotes nas minas. Foi possível verificar que o modelo teve bom desempenho para distribuição, resultando em apenas 1 desmembramento de t_1 , originalmente com 2 lotes em dois trens de 1 lote, feito na origem de Desembargador Drumond para um horizonte de trabalho de 24 horas. A distribuição feita pela equipe operacional da EFVM apresentou 9 desmembramentos, sendo 5 no pátio de Laboriau, 3 no pátio de Fazendão e 1 no pátio de Costa Lacerda. Ou seja, uma diferença de 8 lotes (Gráfico 1), que representa um ganho de tempo operacional de aproximadamente 35 horas.

Para a Instância 4 foram distribuídos 12 trens com 30 lotes de vagões vazios, atendendo a demanda de 30 lotes nas minas. A distribuição efetuada pela equipe operacional da EFVM apresentou 6 desmembramentos, sendo 2 desmembramentos dos trens t_5 e t_{12} em Laboriau, 2 desmembramentos dos trens t_3 e t_{11} em Costa Lacerda, 1 desmembramento do trem t_7 em Fazendão e o trem t_6 originalmente com 4 lotes desmembrando em dois trens de 2 lotes no pátio de origem Drumond. Enquanto isso, o modelo apresentou uma distribuição eficiente, com 0 desmembramentos (Gráfico 1), apenas distribuindo os trens pelos pátios de triagem de Laboriau, para as minas de João Paulo e Conceição, de Costa Lacerda para as minas de Brucutu, Azurita, Capitão Eduardo, Alegria e Timbopeba e também do pátio de Fazendão para as minas de Alegria e Timbopeba. Ou seja, seria possível um ganho de tempo operacional de aproximadamente 30 horas.

Para a Instância 5, na solução encontrada pelo CPLEX, não houve a necessidade de realizar desmembramentos e foi executada em um tempo de apenas 1.620,8 segundos, 27 minutos, o que representa que é possível uma resposta rápida do CPLEX até para instâncias grandes, tornando-o uma boa ferramenta para utilização na área operacional.

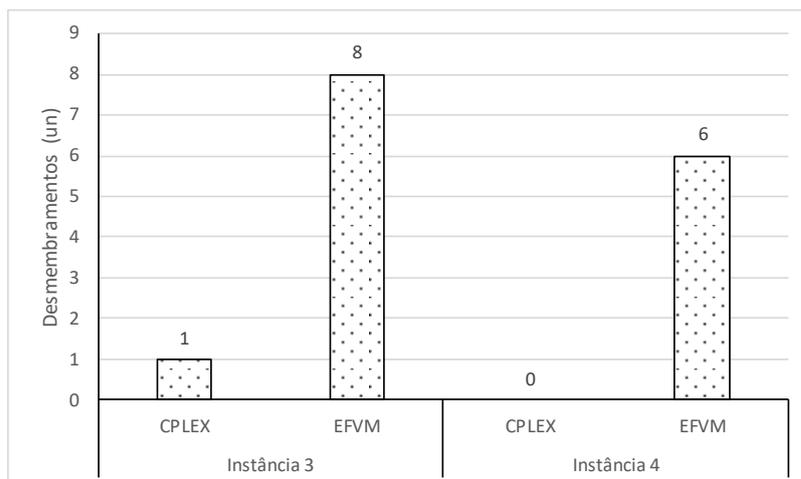


Gráfico 1 - Comparativo de desmembramentos CPLEX x EFVM

Com os resultados apresentados anteriormente, pode-se perceber a relevância de um modelo como o proposto nesse artigo, que além de auxiliar a distribuição de lotes de vagões vazios, pode servir de suporte para o planejamento da operação da ferrovia. Salienta-se a importância da minimização dos desmembramentos, pois essa minimização acarreta uma economia de tempo de manobra, considerando que cada manobra dura de 4 a 5 horas. Ainda, implica em um ciclo menor dos trens e uma economia nas operações com maquinistas e manobras nos pátios. Várias ferrovias no mundo, sobretudo, as de granéis minerais e agrícolas, enfrentam esse mesmo tipo de problema e podem se valer do modelo proposto neste artigo. Vale ressaltar que a abordagem pode ser utilizada por qualquer outra ferrovia que possua pontos de carregamento dispersos geograficamente atendidos por vários pátios de triagem e sejam impactadas pelo tempo de manobra para desmembramento dos trens.

6. CONCLUSÃO

Este artigo propôs um modelo matemático baseado de Programação Linear Inteira Mista aplicado ao problema da distribuição de vagões vazios da EFVM. Por meio da revisão de literatura não foi encontrado, até o presente momento, nenhuma publicação que tratasse a distribuição de lotes de vagões vazios objetivando a minimização do desmembramento de lotes.

Foi possível verificar que o CPLEX consegue resolver as instâncias que representam as ofertas de vagões vazios e as demandas das minas da EFVM em poucos segundos de execução, alcançando uma solução ótima em todas as instâncias.

O modelo matemático proposto mostrou-se adequado para a minimização do desmembramento de lotes e dos tempos totais desde a saída da origem até o carregamento nas minas. Foi constatado que o CPLEX apresentou tempos rápidos de resposta para a distribuição, inclusive para Instâncias maiores, com isso é possível que o modelo se torne uma ferramenta útil e efetiva para o planejamento da distribuição de vagões vazios, melhorando a gestão de recursos para o planejamento ferroviário. Ainda foi possível verificar a diferença no número de desmembramentos para a distribuição feita pela equipe operacional da EFVM e a distribuição efetuada pelo CPLEX. A distribuição feita pelo software reduziu quase 90% dos desmembramentos da Instância 3 e 100% dos desmembramentos da Instância 4, em relação a distribuição efetuada pela EFVM. Isso poderia acarretar uma redução de pelo menos 30 horas

em manobras, dado que cada manobra de formação ou desmembramento de trens pode levar de 4 a 5 horas, gerando possíveis ganhos financeiros para ferrovia.

Propõe-se como possível continuação da pesquisa o planejamento do horário da circulação dos trens com os lotes designados pelo modelo matemático proposto neste artigo.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPES (75528452/2016) e CNPq (307439/2016-0) pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANTT (2015). *Agência Nacional de Transportes Terrestres*. Disponível em: <<http://www.antt.gov.br/>> Acessado em: 02 de fevereiro de 2018.
- BARROS, A. L. M. (2008). *Distribuição horária de lotes de vagões GDE para carregamento de minério na EFVM*. Dissertação de Especialização em Ciências e Transporte. IME, Rio de Janeiro – RJ.
- BARROS, A. L. M. (2010). *Modelo de Otimização para distribuição horária de lotes de vagões ferroviários GDE para carregamento de minério de ferro*. Dissertação de Mestrado. UFES, Vitória – ES.
- CALDARA, A. (1996). *Um sistema de Otimização para Alocação de Vagões Vazios em Ferrovias*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. UFES, Vitória - ES
- COSTA, J. C. (2010) *Algoritmo de Distribuição e Alocação Vagões em Tempo Real*. Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas – SP.
- 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.
- EPL. (2015) Empresa de Planejamento e Logística S.A. *Transporte inter-regional de carga no Brasil - Panorama 2015*. Disponível em < <http://www.epl.gov.br>> Acesso em 23 de fevereiro de 2018.
- FOLETTO M. B.; ROSA, R. A.; LOUZADA, P. C.; PIMENTA, L. B. (2016) *Modelo matemático para uma nova estratégia de planejamento da distribuição de vagões vazios*. XLVIII SBPO – Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional.
- FUKASAWA, R. (2002) *Resolução de problemas de logística ferroviária utilizando programação inteira*. Dissertação de Mestrado, PUC, Rio de Janeiro - RJ.
- HAGHANI, A. E. (1987). *Rail Freight Transportation: A Review of Recent Optimization Models for Train Routing and Empty Car Distribution*. *Journal of Advanced Transportations*, 21:2.
- HAGHANI, A. E. (1989). *Formulation and solution of a combined train routing and makeup, and empty car distribution model*. *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 23, n. 6, p. 433-452, 1989.
- HAMACHER, F. C. (2005). *Logística Ferroviária: Resolução do Problema de Alocação Ótima de Vagões e Locomotivas*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. PUC, Rio de Janeiro – RJ.
- HEYDARI, R.; MELACHRINOUDIS, E. (2017) *A path-based capacitated network flow model for empty railcar distribution*. *Annals of Operations Research*, v. 253, n. 2, p. 773-798.
- HOLMBERG, Kaj; JOBORN, Martin; LUNDGREN. (1998) Jan T. *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*. Transporte em Transformação XIII.
- 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.
- POWELL, Warren B.; BOUZAIENE-AYARI, Belgacem; SIMAO, Hugo P. (2007) *Dynamic models for freight transportation*. *Handbooks in operations research and management science*, v. 14, p. 285-365.

Hendriago Venes (h.venes@gmail.com), Rodrigo de Alvarenga Rosa (rodrigo.a.rosa@ufes.br), Rodrigo Pirola Pestana (rodrigo.pirola@vale.com).

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo - Av. Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras – Vitória, ES, Brasil