

# Sistema computacional para distribuição de vagões e locomotivas

Grazielle F. da Silva<sup>1\*</sup>, Alexandre A. Andrade<sup>1</sup>, Lucas S. M. Guedes<sup>1</sup>, João P. T. de Carvalho<sup>1</sup>, Luciano N. Jaconi<sup>1</sup>, Breno D. Moreira<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Gerência de Planejamento e Pesquisa Operacional, VLI Multimodal, R. Tapuias 49 - Floresta, 30150-030, Belo Horizonte, Minas Gerais

e-mail: grazielle.silva@vli-logistica.com.br, alexandre.aandrade@vli-logistica.com.br, lucas.guedes@vli-logistica.com.br, joao.teixeira.carvalho@vli-logistica.com.br, luciano.jaconi@vli-logistica.com.br, breno.dutra@vli-logistica.com.br

**Resumo** Uma das principais atribuições do planejamento ferroviário é realizar a distribuição de vagões e locomotivas da melhor maneira possível, possibilitando o transporte da maior quantidade de carga (ou com maior rentabilidade). Este trabalho descreve o desenvolvimento de um sistema web que realiza, de maneira otimizada e automática, a distribuição de vagões e locomotivas no contexto do planejamento do orçamento anual das ferrovias da VLI Multimodal. O sistema foi construído para ler os dados de demanda comercial das cargas e as premissas operacionais e a partir disso efetuar os cálculos matemáticos necessários para a correta distribuição dos ativos. Neste processo, aplicou-se conceitos de otimização em rede para apoiar a distribuição, resultando na formulação de dois modelos de programação linear. O algoritmo proposto neste trabalho foi implementado no software MATLAB<sup>®</sup> e compilado como um sistema Web. O sistema de distribuição de vagões foi validado no ano de 2019 através da comparação de seus resultados com a distribuição de ativos proposta pela equipe de planejamento da capacidade. Os resultados demonstraram uma aderência média de 97% em relação ao método utilizado até então.

**Palavras-Chaves:** Vagões; Distribuição de vagões e locomotivas; Otimização; Sistema Web.

## 1. INTRODUÇÃO

A VLI (Valor da Logística Integrado) é uma empresa logística que integra portos, ferrovias e terminais. A companhia opera as ferrovias Norte Sul e Centro-Atlântica (cerca de 8.000 km de ferrovias) integrada aos seus terminais multimodais, além de possuir operação em terminais portuários situados em eixos estratégicos da costa brasileira, tais como Santos (SP), São Luís (MA) e Vitória (ES). A VLI transporta milhões de toneladas de produtos agrícolas como grãos (milho, soja e farelo de soja), açúcar e fertilizantes, atende os principais estados produtores de aço e consumidores de insumos siderúrgicos e oferece opções seguras e competitivas para o abastecimento de derivados do petróleo, produtos florestais (celulose e madeira) e para os segmentos de mineração e construção civil.

A gestão eficiente desta grande rede com mais de 800 locomotivas e 24 mil vagões é baseada

no planejamento da alocação e distribuições deste material rodante, essencial para verificar a capacidade de transporte e definir como será realizado o atendimento da demanda dos diversos fluxos logísticos.

O problema de dimensionar a frota de material rodante nas ferrovias consiste em calcular a necessidade de vagões e locomotivas para atendimento do volume planejado.

Este complexo problema pertence a diversos horizontes de planejamento, como plurianual, anual, mensal, semanal ou diário, onde cada planejamento tem um nível detalhamento compatível com a tomada de decisão. O planejamento plurianual é realizado para um horizonte de tempo de 10 anos com objetivo definir investimentos, aquisições e as metas de transporte. Em seguida, o planejamento anual busca balancear a demanda e a capacidade existente. Já a etapa de programação mensal tem acesso a demanda semanal e tem como

objetivo atender os fluxos de transporte previstos no planejamento anual, se adaptando as alterações ocorridas na demanda e na disponibilidade de vagões e locomotivas.

A análise de dimensionamento e alocação é explorada na literatura como um problema de otimização, ou seja, resolvida por modelos matemáticos compostos por função objetivo (p. ex. minimização de custos, maximização do volume, minimização do consumo de combustível pela frota de locomotivas, etc) e restrições e limites (p. ex. demanda comercial mínima e máxima, equação de balanço de vagões na rede ferroviária, número de carregamentos por mercadoria, número máximo de vagões nos trens, etc).

Em Cordeau et al (1998) [1] é apresentado um resumo dos principais modelos de otimização usados em problemas de transporte ferroviário. Os autores apresentam diversas oportunidades de otimização no sistema ferroviário, por exemplo, os problemas para dimensionamento considerando a otimização da distribuição de vagões e de alocação das locomotivas.

Muitos trabalhos abordaram a distribuição dos vagões, como os artigos de Bojovic e Milenkovic ([2], [3]) que dimensionam frotas heterogêneas sujeitas a tempos de trânsito estocásticos. Já em [4] é proposta uma formulação para a distribuição de vagões vazios que leva em consideração as capacidades dos trens, e da via, satisfazendo as restrições de oferta e demanda dos clientes.

Geralmente, após a resolução do problema de distribuição de vagões, aplica-se os modelos de alocação de locomotivas, cujo objetivo é alocar locomotivas para atender os trens programados para o atendimento da demanda de acordo com a distribuição dos vagões. Em [5] é apresentado o problema de alocação de locomotivas, devido ao alto valor investido pelas empresas do setor nesses ativos. O problema foi formulado como programação inteira mista. Com objetivo de reduzir o consumo de combustível, um modelo linear inteiro misto para alocação de locomotivas no planejamento anual foi proposto por [6].

Neste contexto, o trabalho apresenta modelos de otimização e um sistema automatizado para a distribuição e alocação de material rodante

desenvolvido internamente na VLI para suportar o planejamento anual de ferrovias.

O artigo é organizado em 4 seções: conceitos e definições do problema, descrição da metodologia aplicada, apresentação do sistema desenvolvido, e por fim, os resultados e as conclusões.

## 2. CONCEITOS E DEFINIÇÕES

O planejamento anual é discretizado em 12 meses. Diferente do planejamento plurianual, não existe a possibilidade de aquisições de novos vagões e locomotivas. Desta forma, deve-se definir o aceite de volume de cada fluxo para cada mês do ano de acordo com a capacidade de transporte do sistema. Essa capacidade é derivada da alocação e dimensionamento e premissas operacionais.

Para melhor entendimento deste processo, deve-se definir alguns conceitos bases.

Primeiramente, os fluxos representam as demandas do sistema. Eles são definidos pela origem e destino da demanda, e mercadoria (podendo também ser aberto por cliente).

Os trens circulam com o objetivo de atender as demandas dos fluxos. No entanto, em alguns casos, a origem e o destino do fluxo podem ser diferentes da origem e do destino do trem, que denominamos circuito do trem. Nestas situações, os trens anexam ou desanexam vagões ao longo dos pátios da ferrovia. Um fluxo pode passar por um ou mais trens. Assim, as origens e destino dos fluxos são os terminais (ou portos) e as origens e destinos dos circuitos podem ser pátios.

Outro conceito é o modelo do trem, chamado de trem-tipo, que especifica quantas e quais locomotivas vão tracionar a composição, e a quantidade e modelo dos vagões.

Tanto locomotivas quanto vagões possuem uma importante premissa: o ciclo de operação, que pode ser entendido como o tempo gasto entre dois carregamentos sucessivos. É o somatório dos tempos nos pátios/terminais e dos tempos em trânsito, ou seja, é definido como tempo da origem ao destino (incluindo os tempos na origem) e tempo de retorno (incluindo os tempos no destino).

O ciclo pode ser subdividido em duas parcelas: carregado e vazio. O ciclo carregado dos fluxos é composto pelo tempo no terminal de origem do fluxo após a etapa de carregamento, pelo tempo de transito dos trens carregados, e o tempo no terminal de destino ate o fim da operação de descarga. O ciclo de vazios é composto pelo tempo no terminal após a operação de descarga, pelo tempo de transito do trem vazio, e pelo tempo no terminal de origem até o fim da etapa de carregamento.

Os ciclos dos fluxos não podem ser associados diretamente aos ciclos dos vagões. Isso porque um mesmo fluxo pode receber vagões de terminais diferentes. Em frotas de vagões que atendem volumes com múltiplas origens e destinos, nem sempre os vagões ficam circulando dentro da mesma origem e destino. Nesses casos, após o descarregamento dos vagões, é decidido para onde enviar os vagões vazios, considerando os terminais com demandas para aquele tipo de vagão. Essa decisão é definida como distribuição de vazios. Nesse caso, o ciclo do vazio dos fluxos é determinado como uma ponderação pelo número de envio de vagões vazios de cada destino de vazio para a origem do fluxo.

### 3. METODOLOGIA

O processo de dimensionamento da necessidade de ativos foi dividido em dois subproblemas, dimensionamento e distribuição de vagões e dimensionamento e alocação das locomotivas.

Na primeira etapa é identificada qual a demanda que deve ser atendida e qual frota de vagão deve atender a cada fluxo, com o objetivo de definir qual a necessidade de vagões para atender a demanda e quais as origens e destino dos trens com vagões vazios.

Posteriormente é possível iniciar a etapa de dimensionamento e otimização da alocação das locomotivas, onde as locomotivas são atribuídas de forma a gerar tração necessária em cada trem para puxar os vagões.

#### 3.1. Dimensionamento de vagões

O dimensionamento de vagões é calculado para cada fluxo cadastrado na demanda. Para isso, inicialmente, é preciso definir qual o número de carregamentos necessários para

atender a demanda de cada fluxo, que indica quantos carregamentos de vagões são necessários para atender a demanda. O número de carregamentos é dado por

$$N_{carrag} = \frac{V_{vol}}{P_{pm}} \quad 1$$

onde,  $V_{vol}$  é a demanda do fluxo, e  $P_{pm}$  é o peso médio do vagão, ou seja, volume que cada vagão da frota cadastrada para aquele fluxo carrega, e  $N_{carrag}$  é o número de carregamentos necessários.

Assim, o cálculo de vagões necessários para cada fluxo é dado por

$$N_{necvg} = \frac{N_{carrag} T_{ciclo}}{D_{df} T_{periodo}} \quad 2$$

onde  $T_{periodo}$  é o intervalo de tempo disponível para realizar a demanda,  $T_{ciclo}$  é o ciclo médio do fluxo, e  $D_{df}$  representa disponibilidade física da frota. Dentre as premissas utilizadas nesse dimensionamento, a definição do ciclo, pode ser otimizada pelo processo de distribuição de vagões de vazios.

A distribuição de vagões vazios consiste basicamente na definição dos locais de envio dos vagões vazios com o objetivo de atender a demanda. Uma distribuição de vazios bem feita minimiza a distância percorrida pelos vagões vazios do pátio de descarga para o pátio de carregamento, o que reduz o ciclo fluxo e conseqüentemente, minimiza a necessidade de ativos para atendimento da demanda de cada fluxo ou maximiza a capacidade de transporte dos ativos.

Assim, o processo adotado para o dimensionamento de vagões está dividido em cinco etapas, como na Figura 1.

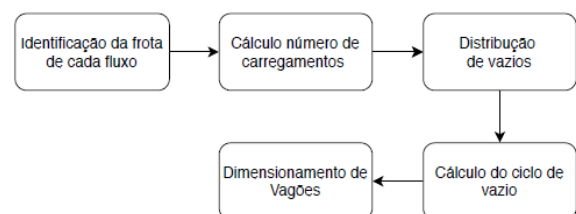


Fig. 1 Estapas do dimensionamento de vagões

A primeira etapa é a identificação de quais são os fluxos que cada frota de vagão atende. Na

segunda etapa é calculado quantos carregamentos que cada fluxo deve ter para atender. Com os valores de carregamentos calculados, é realizada a otimização da distribuição de vazios, onde são definidos de onde o cada fluxo receberá os vagões vazios para o atendimento da demanda. Com esse dado é definido o ciclo dos vagões vazios de cada fluxo e realizado o dimensionamento.

### 3.1.1 Modelo de distribuição dos vagões vazios

O modelo matemático de distribuição de vagões vazios é independente por frota de vagão, e baseado na oferta e na demanda de carregamentos de cada frota em cada terminal. A oferta de carregamentos é a quantidade de descarregamentos da frota que ocorre no terminal e a demanda de carregamentos são quantos carregamentos com essa frota de vagão devem ser realizados para atender a demanda do terminal.

O objetivo da otimização é minimizar o número de vagões necessários para o atendimento da demanda de cada frota, com a tomada de decisão de para onde enviar os vagões vazios de cada frota em cada terminal.

Aplicando a disponibilidade da frota no final do processo de dimensionamento, a necessidade de vagões de cada fluxo, pode ser escrita como

$$N_{necvg} = \frac{N_{carrag} T_{ciclo}}{T_{periodo}} \quad 3$$

onde a variável de otimização é o  $T_{ciclo}$ , ou mais especificamente, a parte de ciclo vazio do  $T_{ciclo}$ .

A parcela de ciclo vazio do  $T_{ciclo}$  é definida como o ciclo ponderado de todos os terminais que enviam vagões vazios para a origem do fluxo. O ciclo vazio de cada fluxo com origem nó  $i$  é definido por

$$\sum_j \frac{x_{j,i} T_{cicloV_{j,i}}}{D_i} \quad 4$$

Onde  $x_{j,i}$  é a variável de otimização, que indica número de vazios enviados do terminal  $j$  para o terminal  $i$ ,  $T_{cicloV_{j,i}}$  é o tempo para enviar vagões vazios do terminal  $j$  para o terminal  $i$  e

$D_i$  é a demanda de carregamentos do terminal  $i$ .

A função objetivo do problema minimiza de forma global todos os fluxos que são atendidos pela frota verificada. Ela é definida como

$$\sum_{i,j} \frac{N_{carrag_{i,j}} \left( T_{cicloC_{i,j}} + \sum_j \frac{(x_{j,i} T_{cicloV_{j,i}})}{D_i} \right)}{T_{periodo}} \quad 5$$

As restrições do problema são dadas pelas equações

$$\sum_j x_{n,j} = O_n, \forall n \quad 6$$

$$\sum_i x_{i,n} = D_n, \forall n \quad 7$$

onde  $O_n$  é a oferta de carregamentos do terminal  $n$ ,  $D_n$  é a demanda de carregamentos do terminal  $n$ ,  $\underline{X}_{i,j}$  é o valor mínimo para envio de vagões vazios do terminal  $i$  para o terminal  $j$ . Essas restrições garantem o balanço entre os números de vagões que chegam saem em cada terminal, assegurando que todo envio de vazio seja para atender alguma demanda e que nenhum terminal envie mais vazios do que descarrega no local. E também pelas equações

$$x_{i,j} \geq b_{i,j} \underline{X}_{i,j} \quad 8$$

$$x_{i,j} \leq b_{i,j} \bar{X}_{i,j} \quad 9$$

onde  $x_{i,j}$  é a variável binária que indica se a rota do terminal  $i$  para o terminal  $j$  é utilizada ou não para envio de vazios  $\underline{X}_{i,j}$  é o valor mínimo para envio de vagões vazios do terminal  $i$  para o terminal  $j$  e  $\bar{X}_{i,j}$  é o valor máximo.

### 3.2. Dimensionamento de locomotivas

O dimensionamento de locomotivas envolve não só a identificação do número de ativos necessários para atender o volume, mas também o processo de alocação das locomotivas. Isso porque, diferente do processo de dimensionamento do vagões,

onde cada fluxo esta associado a uma frota de vagão, no dimensionamento de locomotivas, os circuitos podem ser atendidos por frotas de locomotivas diversas.

Para definir a necessidade de locomotivas necessárias para atender cada demanda, primeiramente é preciso definir quantos trens devem ser formados para o atendimento. A definição da necessidade de formação de trens é dada por

$$N_{trens} = \frac{N_{carrag}(P_{pm} + T_{tara})}{C_{TBmaxTrem}} \quad 10$$

onde  $T_{tara}$  é a tara dos vagões,  $C_{TBmaxTrem}$  é a capacidade máxima de volume do trem, que pode variar de acordo com o modelo de trem considerado para atender o fluxo.

Assim necessidade cada tipo de locomotiva para o atendimento da demanda e dada por

$$N_{necl} = \frac{N_{trens}T_{ciclo}N_{locosTrem}}{D_{df}T_{periodo}} \quad 11$$

onde  $T_{ciclo}$  representa o valor do ciclo da locomotiva,  $D_{df}$  representa disponibilidade,  $N_{locosTrem}$  é o número de locomotivas do trem definida no modelo de trem e  $N_{trens}$  representa o números de vezes em que devem ser formados trens para o atendimento da demanda.

A definição do modelo de trem que será utilizado para atender influencia não só na necessidade de locomotivas como também no consumo previsto de combustível de cada uma delas em seus respectivos trens, visto que em cada trecho modelos de trens diferentes podem apresentar eficiências energéticas diferentes. Por isso é importante uma análise global do sistema para definir qual a melhor locomotiva para atendimento a determinado trem o intuito de reduzir o consumo de combustível e trazer economia para a empresa

O método adotado para o dimensionamento de locomotivas está dividido em cinco etapas, como na Figura 2.

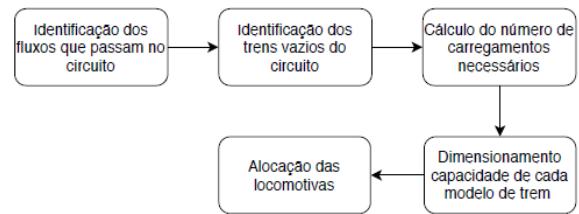


Fig. 2 Etapas do dimensionamento de locomotivas

A primeira etapa do processo é identificar todos os fluxos que passam em cada circuito em cada sentido. Na segunda é considerada a distribuição de vazios para identificar os trens necessários para levar os vagões vazios. Na terceira etapa são calculados os carregamentos necessários em cada circuito e na próxima etapa essas dados são cruzados com a capacidade de cada modelo de trem do circuito. Realizadas esses cálculos é possível otimizar a alocação de locomotivas para definir quais locomotivas atenderão cada um dos circuitos.

### 3.2.1 Modelo de alocação de locomotivas

O modelo matemático para a alocação de locomotivas tem por objetivo definir qual modelo de trem deve circular em cada circuito para o atendimento da demanda, com o objetivo de otimizar a eficiência energética global do sistema.

A função objetivo do modelo é definida como

$$\sum_{k,l} z_{l,k} e_{l,k} \quad 12$$

onde  $e_{l,k}$  é o parâmetro que indica é o índice de eficiência energética do conjunto associado ao tipo de locomotiva  $l$  no grupo de circuito  $k$  e  $z_{l,k}$  é uma variável de otimização (variável inteira) que indica quantos conjuntos do tipo de locomotiva  $l$  são alocadas no grupo de circuito  $k$ .

As restrições do problema são dadas pela garantia de que todas as demandas de carregamentos de todos os circuitos serão atendidas

$$\sum_l y_{l,c} O_{carrag_{l,c}} = N_{carrag_c} \quad 13$$

onde  $y_{l,c}$  outra variável de otimização que indica quantos conjuntos do tipo de locomotiva  $l$  são alocadas no circuito  $c$  (variável contínua),  $O_{carrag_{l,c}}$  é quantidade de carregamentos que o modelo de trem associado à locomotiva do tipo  $l$  no circuito  $c$  consegue realizar no mês, e  $N_{carrag_c}$  é a necessidade de carregamento do circuito  $c$  para atender a demanda. Pela garantia de que a quantidade de locomotivas alocadas não ultrapasse a quantidade de locomotivas disponíveis

$$\sum_k z_{l,k} N_{locosTrem_{l,c}} \leq O_{Locos_l} \quad 14$$

onde  $N_{locosTrem_{l,c}}$  é o número de locomotivas que compõem o conjunto do modelo de trem associado à locomotiva do tipo  $l$  no circuito  $c$  e  $O_{Locos_l}$  é a quantidade de carregamentos que o modelo de trem associado à locomotiva do tipo  $l$  no circuito  $c$  consegue realizar no mês. E pela garantia de que a quantidade de conjuntos de locomotivas alocados para cada grupo do circuito tem capacidade de atender todas as demandas dos circuitos pertencentes ao grupo,

$$\sum_c y_{c,l} \leq z_{l,k} \quad 15$$

O modelo considera que a quantidade de locomotivas disponíveis de cada tipo é a quantidade líquida e abrange apenas as locomotivas que serão destinadas para trens. As locomotivas destinadas para manobra, via permanente e helper são calculadas de forma independente no dimensionamento.

#### 4. O Sistema

Toda a metodologia supracitada foi implementada através do software MATLAB® e compilado em um sistema Web. Esse sistema foi estabelecido para ler dados de entrada fundamentais para aplicação dos métodos matemáticos, ver Fig. 3. Esses dados podem ser organizados em cenários distintos, a fim de possibilitar comparações e facilitar a tomada de decisão dos usuários. Os *inputs* são:

- Demanda comercial das cargas;
- Premissas operacionais:
  - Origem, destino, mercadoria, peso útil e tara do vagão, *transit time*, tempo de giro nas origens

e destinos, modelo dos vagões (série) e locomotivas, quantidade de vagões e locomotivas em cada frota, dias operacionais de cada mês, trem-tipo, entre outros.

Em posse de todos esses dados, o sistema efetua o processamento deles, aplicando os conceitos de dimensionamento de material rodante (auxiliado pela otimização). A partir dessa inteligência implementada, o sistema fornece o resultado da distribuição dos vagões e locomotivas por meio de informações importantes. São elas:

- Déficit (ou sobra) de vagões;
- Déficit (ou sobra) de locomotivas;
- Ciclo de vagões (e ganho percentual) necessário para transporte de toda a demanda comercial da carga;
- Capacidade, em toneladas, de transporte do fluxo.

Todos esses *outputs* são colocados em uma visão mensal e por fluxo (origem, destino, mercadoria) no caso dos vagões e por circuito no caso das locomotivas. O sistema também possibilita uma visão em agrupamentos maiores das informações.

A decisão da construção de uma solução web possibilita o acesso simultâneo dos usuários, desde que estejam em uma rede oficial da VLI, garantindo assim maior segurança do sistema.

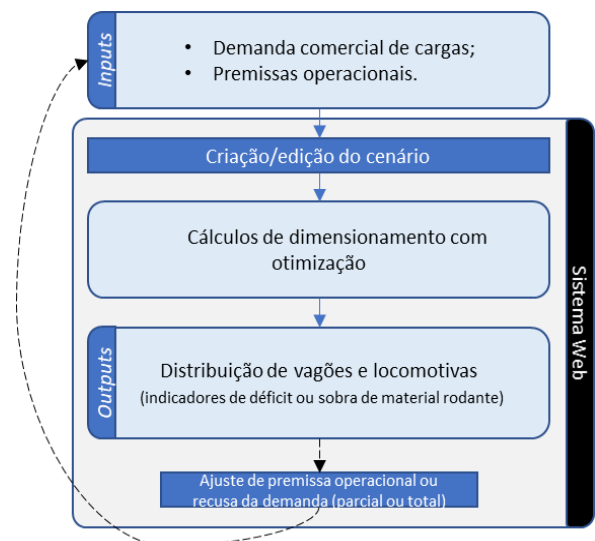


Fig. 3 Diagrama representativo da arquitetura do sistema.

## 5. RESULTADOS E CONCLUSÕES

O sistema desenvolvido nesse trabalho se destaca por auxiliar no dimensionamento da necessidades de ativos integrando a otimização da distribuição de vagões e de alocação de locomotivas.

Para avaliar o modelo proposto foram realizados testes na etapa de dimensionamento de vagões de duas frota e na etapa de alocação de locomotivas para um corredor no planejamento anual da VLI.

A primeira frota de vagão analisada atende 4 mercadorias e 9 terminais. O ganho percentual na necessidade de vagões para o atendimento do volume e o ganho na capacidade de execução volume da frota é apresentado na tabela 1.

Tabela 1. Ganho na primeira frota pela distribuição de vagões

Mês	Redução na necessidade de ativos	Ganho de capacidade
JAN	5,4%	5,7%
FEV	3,0%	3,0%
MAR	2,5%	2,5%
ABR	2,5%	2,6%
MAI	2,6%	2,6%
JUN	2,6%	2,7%
JUL	2,6%	2,7%
AGO	2,6%	2,6%
SET	2,6%	2,6%
OUT	4,6%	4,9%
NOV	5,0%	5,3%
DEZ	10,3%	11,5%

A segunda frota analisada atende 2 mercadorias e 7 terminais. O ganho percentual na necessidade de vagões para o atendimento do volume e o ganho na capacidade de execução volume da frota é apresentado na tabela 2.

Tabela 2. Ganho na segunda frota pela distribuição de vagões

Mês	Redução na necessidade de ativos	Ganho de capacidade
JAN	0,6%	0,6%
FEV	0,5%	0,5%
MAR	0,6%	0,6%
ABR	1,7%	1,8%

MAI	0,6%	0,6%
JUN	0,6%	0,6%
JUL	0,6%	0,6%
AGO	0,6%	0,6%
SET	0,6%	0,6%
OUT	0,6%	0,6%
NOV	0,4%	0,4%
DEZ	1,2%	1,2%

O ganho por eficiência energética foi analisado para 7 tipos de locomotivas cadastradas, 48 circuitos, 8 agrupamentos de circuitos e 34 trechos. A tabela 3 apresenta o ganho de eficiência energética do sistema comparado com a alocação de locomotivas realizada levando-se em consideração o conhecimento e a experiência de analistas, por meio do uso de planilhas.

Tabela 3. Ganho na eficiência energética global do corredor

Mês	Ganho E.E.	Mês	Ganho E.E.
JAN	1,0%	JUL	1,5%
FEV	1,3%	AGO	2,7%
MAR	1,0%	SET	0,5%
ABR	4,2%	OUT	1,5%
MAI	0,1%	NOV	3,0%
JUN	0,6%	DEZ	1,4%

Analisando os testes realizados, conclui-se que o modelo matemático proposto pode trazer benefícios para o planejamento, auxiliando nas tomadas de decisão.

O ganho na redução do ciclo pela otimização de distribuição de vazios, reduz a necessidade de ativos para o atendimento de determinada demanda e, conseqüentemente, aumenta a capacidade de operação da frota. Os resultados comparados com o dimensionamento realizado com base no conhecimento e experiência dos analistas, apresentou um ganho de até 11,5% na capacidade de volume na primeira frota analisada e de até 1,2% na segunda.

Na análise do impacto da otimização na alocação de locomotivas, a média do ganho em eficiência energética para o corredor foi de 1,57% e chegou até a 4,2% no mês de abril. Como o custo de combustível está entre os maiores gastos das empresas ferroviárias, de

modo geral, essa porcentagem de redução, já representa um ganho financeiro significativo.

No final do processo de dimensionamento, o sistema foi eficiente, apresentando resultados significativos para a realidade da empresa e validado pelos analistas como ferramenta de auxílio na tomada de decisão do planejamento.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte da Diretoria de Planejamento e Integração da VLI, em especial, da Gerência de Planejamento Longo Prazo e PMO, na figura do gerente geral Marlon Tadeu Pereira Pinto.

## 7. REFERÊNCIAS

- [1] Cordeau, J.-F.; Toth, P.; Vigo, D.; *A survey of optimization models for train routing and scheduling*. *Transportation science*, v. 32, 1998, pág. 380–404.
- [2] Milenković, M. S.; Bojovic, N. et al. *A stochastic model predictive control to heterogeneous rail freight car fleet sizing problem*. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 82, 2015, pág. 162–198.
- [3] Milenkovic, M.; Bojovic, N; *Optimization Models for Rail Car Fleet Management*. Elsevier, 2019.
- [4] Heydari, R.; Melachrinoudis, E. *A path-based capacitated network flow model for empty railcar distribution*. *Annals of Operations Research*, v. 253, 2017, pág. 773–798.
- [5] Ahuja, R. K. et al. *An optimization-based approach for locomotive planning*. Citeseer, 2006.
- [6] Vasconcelos, I. F. D. *Um modelo de Otimização Linear Inteira para Alocação de Locomotivas com Restrição de Movimentação*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional — Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG, 2016.