

PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA MISTA APLICADA AO PLANEJAMENTO FERROVIÁRIO DE LONGO PRAZO

Grazielle Félix da Silva

VLI Logística S.A

Rua Sapucaí, 383, Floresta, Belo Horizonte – MG

graziellefelixs@gmail.com

Igor Ferreira De Vasconcelos

VLI Logística S.A

Rua Sapucaí, 383, Floresta, Belo Horizonte – MG

vasconcelos.igor@hotmail.com

Daniel Alvaro Dutra

VLI Logística S.A

Rua Sapucaí, 383, Floresta, Belo Horizonte – MG

daniel.dutra@vli-logistica.com.br

Vitor Lopes De Azevedo

VLI Logística S.A

Rua Sapucaí, 383, Floresta, Belo Horizonte – MG

vitor.azevedo@vli-logistica.com.br

Eduardo De Goes

VLI Logística S.A

Rua Sapucaí, 383, Floresta, Belo Horizonte – MG

eduardo.goes@vli-logistica.com.br

Rodolfo Borges Silva

VLI Logística S.A

Rua Sapucaí, 383, Floresta, Belo Horizonte – MG

rodolfo.borges@vli-logistica.com.br

Taynna Vieira Castro Santana

VLI Logística S.A

Rua Sapucaí, 383, Floresta, Belo Horizonte – MG

taynna.santana@vli-logistica.com.br

RESUMO

O planejamento ferroviário apresenta alta complexidade devido à necessidade de integrar múltiplas informações operacionais e decisões estratégicas. Este trabalho propõe um modelo de otimização baseado em Programação Linear Inteira Mista (MILP) para maximizar os resultados financeiros de um planejamento ferroviário, respeitando restrições operacionais, comerciais e estratégicas. A modelagem foi aplicada em um caso real na empresa VLI, no planejamento de longo prazo do Corredor Centro-Norte, e integrada a uma interface computacional, o que possibilitou sua

adoção prática no processo de planejamento anual da companhia. Os resultados evidenciaram ganhos de rentabilidade, além de proporcionar um processo mais padronizado, assertivo e confiável. A ferramenta também permitiu avaliar o impacto das restrições contratuais sobre os indicadores financeiros, fornecendo suporte analítico para a formulação de políticas comerciais alinhadas aos objetivos estratégicos.

PALAVRAS CHAVE. Planejamento ferroviário; Programação Linear Inteira Mista; Otimização financeira; Planejamento estratégico; Logística ferroviária.

LT – Logística e Transportes; OD-Otimização Discreta

ABSTRACT

Railway planning presents high complexity due to the need to integrate multiple operational information and strategic decisions. This work proposes an optimization model based on Mixed-Integer Linear Programming (MILP) to maximize the financial results of railway planning, respecting operational, commercial, and strategic constraints. The modeling was applied in a real case at the company VLI, in the long-term planning of the Center-North Corridor, and integrated into a computational interface, which enabled its practical adoption in the company's annual planning process. The results showed gains in profitability, in addition to providing a more standardized, assertive, and reliable process. The tool also allowed evaluating the impact of contractual restrictions on financial indicators, providing analytical support for the formulation of commercial policies aligned with strategic objectives.

KEYWORDS. Railway planning; Mixed-Integer Linear Programming (MILP); Financial optimization; Strategic planning; Railway logistics.

L&T – Logistics and Transportation; OD – Discrete Optimization

1. Introdução

O transporte ferroviário de cargas constitui um componente estratégico da matriz logística brasileira, desempenhando papel fundamental no escoamento de produtos de alto volume e baixo valor agregado, como grãos, minérios e combustíveis. Em um país de dimensões continentais e infraestrutura rodoviária sobrecarregada, a ferrovia se apresenta como alternativa eficiente e sustentável para longas distâncias, contribuindo significativamente para a competitividade do agro-negócio e da indústria nacional [CNT, 2023; ANTT, 2024]. Embora o setor tenha avançado em modernização e aumento de produtividade nas últimas décadas, desafios estruturais e operacionais persistem, limitando o pleno aproveitamento do potencial ferroviário.

Diante dos persistentes desafios logísticos estruturais e da crescente necessidade de integração modal no setor de transporte de cargas, a implementação de planejamentos estratégicos focados na otimização de infraestrutura e operações por empresas privadas, especialmente em regimes de concessão, tem se tornado cada vez mais relevante para impulsionar a eficiência e a competitividade do sistema logístico nacional. Nesse cenário de crescente relevância dos planejamentos estratégicos privados, a VLI Logística atua como uma das principais operadoras do setor. Sua estratégia de atuação é estruturada pela gestão e desenvolvimento de corredores logísticos complexos, [Logística, 2025c].

O Centro-Norte é um dos principais corredores estratégicos da VLI. Ele conecta regiões produtoras do Norte, Centro-Oeste e Nordeste aos terminais portuários de São Luís e TEGRAM, viabilizando o transporte de grandes volumes de cargas como grãos e combustíveis. Sua infraestrutura, que engloba a Ferrovia Norte-Sul (FNS), a Estrada de Ferro Carajás (EFC) e terminais integradores, desempenha um papel fundamental no agronegócio e na competitividade do país [Logística, 2025a,b]. No entanto, o planejamento eficiente desse corredor enfrenta desafios complexos, que motivam o desenvolvimento do presente estudo.

A complexidade do planejamento de grandes volumes de carga em ambientes intermodais, como o Corredor Centro-Norte, gera múltiplos desafios logísticos. A alta interdependência e o grande volume de dados necessários para sincronizar infraestrutura de via, disponibilidade de vagões e locomotivas, capacidade de terminais (ferroviários e portuários) e exigências contratuais tornam essa tarefa particularmente complexa. Consequentemente, a Pesquisa Operacional tem sido amplamente aplicada como ferramenta de apoio à decisão no setor ferroviário [Hillier e Lieberman, 2010; Toth e Vigo, 2014; Valda et al., 2024; Shahidi et al., 2025].

Dentro desse escopo, a Programação Linear Inteira Mista (MILP) se destaca como uma abordagem amplamente adotada da Pesquisa Operacional para modelar problemas logísticos em níveis estratégico, tático e operacional. Sua principal força reside na capacidade de integrar variáveis inteiras (como decisões de alocação ou sequenciamento) e contínuas (como tempos e capacidades) em um mesmo modelo matemático, [Harrod, 2007; Caprara et al., 2007; Ireland et al., 2004; Borndörfer et al., 2018; Zhang et al., 2019; Duarte et al., 2025]. Além disso, a MILP permite a incorporação explícita de restrições operacionais rígidas e múltiplos objetivos, o que a torna particularmente adequada para representar os trade-offs característicos do planejamento ferroviário anual. Por se tratar de uma técnica de otimização exata, a MILP viabiliza a obtenção de soluções ótimas — ou próximas do ótimo — com garantias matemáticas de desempenho, o que é essencial para decisões estratégicas de longo prazo [Clautiaux e Ljubić, 2025].

No contexto brasileiro, existem trabalhos relevantes que utilizam técnicas de otimização para apoiar o planejamento logístico ferroviário. Trabalhos relevantes aplicam modelos de simulação com otimização para analisar a capacidade de sistemas de transporte de grãos agrícolas e planejar o transporte de cargas em projetos ferroviários de grande escala [Faria et al., 2024; de Camargo e da Cunha, 2012; Júnior, 2015]. Adicionalmente, estudos têm demonstrado a viabilidade de modelos

matemáticos na alocação eficiente de recursos operacionais, como locomotivas [Cassemiro e Costa, 2015] e vagões [Foletto et al., 2016], bem como na promoção de soluções logísticas sustentáveis que consideram variáveis ambientais e financeiras [Faria et al., 2024]. Apesar dessas contribuições, ainda são escassos os estudos que aplicam explicitamente modelos de otimização, especialmente do tipo MILP, voltados ao planejamento estratégico de longo prazo para definição de volumes ferroviários sob objetivos de maximização financeira. Essa lacuna torna-se particularmente relevante diante da intensificação da demanda por eficiência logística e dos recentes investimentos públicos no setor ferroviário, impulsionados por iniciativas que prevê aportes expressivos em infraestrutura ferroviária até 2026 [Ministério dos Transportes, 2024].

Diante desse panorama, este trabalho propõe a aplicação de um modelo de otimização baseado em Programação Linear Inteira Mista (MILP) para apoiar o processo de planejamento de volume de longo prazo no Corredor Centro-Norte da VLI. O modelo busca integrar, em uma estrutura matemática unificada, as principais restrições operacionais e comerciais, com o objetivo de maximizar a margem de contribuição da companhia. Destaca-se que o modelo proposto foi implementado como parte de uma ferramenta computacional que atualmente integra o processo oficial de planejamento anual de volumes da VLI. Sua adoção prática pela companhia permitiu a padronização das análises estratégicas, a integração eficiente das restrições comerciais e operacionais, e a geração de resultados mais robustos e orientados à maximização financeira. Os resultados obtidos até o momento demonstram a efetividade do modelo na tomada de decisões estratégicas, consolidando sua relevância como instrumento de apoio à gestão orçamentária de longo prazo.

2. Modelagem Matemática

O modelo matemático proposto neste estudo tem por objetivo otimizar o processo de planejamento de volumes ferroviários no Corredor Centro-Norte da VLI, maximizando a margem de contribuição líquida da companhia. O modelo foi formulado como um problema MILP, permitindo representar de forma precisa as restrições operacionais, comerciais e contratuais envolvidas no planejamento estratégico de longo prazo. Essa formulação visa automatizar a tomada de decisão sobre quais fluxos devem ser aceitos, priorizando os mais rentáveis, respeitando todas as limitações do sistema logístico.

Neste modelo, um *fluxo logístico* é definido como a unidade básica de decisão para o planejamento de volumes, e representa uma combinação específica entre cliente, origem, destino, produto e região de origem da carga. Cada fluxo é identificado por um conjunto de índices que descrevem sua estrutura logística:

- $c \in C$: cliente que contrata os serviços logísticos para o transporte ferroviário da carga;
- $o \in O$: ponto de origem do transporte ferroviário da carga;
- $d \in D$: destino da carga (terminal ferroviário ou portuário);
- $p \in P$: produto transportado;
- $f \in F$: tipo de frota de vagões utilizada para o transporte;
- $r \in R$: região de origem da carga (antes de chegar no terminal ferroviário).

Essa granularidade permite que o modelo capture nuances importantes do processo decisório, como margens de contribuição específicas por cliente e produto, capacidades logísticas distintas entre origens e destinos, e segmentações operacionais com base em tipos de frota e regiões. Além disso, a modelagem inclui grupos de tração ($g \in G$), definidos como subconjuntos de locomotivas que estão autorizadas a atender determinados fluxos. Essa associação operacional entre

grupos de tração e fluxos é pré-definida, com base em critérios logísticos e restrições internas da companhia, e permite o controle mais realista da alocação dos recursos de tração disponíveis.

Os parâmetros do modelo são apresentados na Tabela 1 e as variáveis do modelo são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 1: Parâmetros da modelagem.

Parâmetro	Descrição
$M_{c,o,d,p,r}$	margem por TU do fluxo do cliente c , com origem em o , destino em d , para o produto p com origem da carga na região r
$\phi_{c,o,d,p}$	penalização por não atender o volume mínimo (contrato) do cliente c , com origem em o , destino em d , para o produto p
$D_{c,o,d,p}$	demanda do fluxo de cliente c , com origem em o , destino em d , para o produto p
$\hat{D}_{c,o,d,p}$	volume de contrato do fluxo de cliente c , com origem em o , destino em d , para o produto p
$P_{o,d,p,f}$	peso médio do fluxo com origem em o , destino em d , para o produto p para a frota de vagão f
$C_{o,d,p}$	ciclo do fluxo com origem em o , destino em d , para o produto p para a frota de vagão f
$T_{o,d,p}$	período disponível (em dia ou horas) do fluxo com origem em o , destino em d , para o produto p
V_f	disponibilidade de vagões para frota f
$A_{o,d,p}$	capacidade, em volume, do trem que atende o fluxo (o, d, p)
L	quantidade de locomotivas disponíveis
$\tilde{V}_i$	volume máximo global para o porto/terminal i
$\tilde{V}_{i,p}$	volume máximo para o produto p para o porto/terminal i
Z_z	quantidade máxima de pares de trens (ida/retorno) que podem passar no trecho z

Tabela 2: Variáveis da modelagem

Variável	Tipo	Descrição
$x_{c,o,d,p,f,r}$	≥ 0	aceite em relação à demanda do fluxo de cliente c , com origem em o , destino em d , para o produto p que é atendido pela frota de vagão f com origem da carga vindo da região r
$y_{c,o,d,p}$	≥ 0	corte em relação ao volume mínimo (de contrato) do fluxo de cliente c , com origem em o , destino em d , para o produto p
γ_g	≥ 0 inteira	quantos trens pertencem ao agrupamento de trens g

Na modelagem também foram utilizados conceitos de conjuntos para modelar os agrupamentos que existem durante o dimensionamento. Esses conjuntos são apresentados na Tabela 3.

A função objetivo do modelo visa maximizar a margem de contribuição líquida associada à aceitação de volumes logísticos. Para isso, o modelo considera, de um lado, a receita marginal gerada por cada fluxo aceite — calculada com base na margem por tonelada útil (TU) do cliente, origem, destino e produto — e, de outro, as penalidades associadas ao não atendimento dos volumes contratuais mínimos (take-or-pay). Formalmente, a função objetivo é definida conforme a Equação 1:

Tabela 3: Conjuntos da modelagem.

Conjunto	Descrição
$\mathbb{G}_g$	conjunto de fluxos logísticos que podem ser atendidos por um mesmo grupo de locomotivas, conforme a política operacional da companhia. Cada grupo g representa uma frota segregada de locomotivas alocadas a uma categoria específica de carga, como grãos, celulose ou combustíveis. Essa estrutura de agrupamento visa garantir que cada grupo de tração atenda apenas aos fluxos designados a ele, permitindo controle individualizado da utilização de locomotivas por tipo de carga e assegurando rastreabilidade na alocação dos recursos de tração (exemplos de agrupamentos: Trens Grãos Norte, Trens Combustíveis Norte, Trens Celulose Norte...)
$\mathbb{E}_z$	conjunto combinações origens/destinos de trens que passam pelo trecho z . Esse agrupamento é utilizado para contabilizar a quantidade de trens que passam por cada segmento da malha ferroviária, respeitando os limites de capacidade operacional do trecho.

$$\max \sum_{c,o,d,p,f,r} (x_{c,o,d,p,f,r} M_{c,o,d,p,r}) - \sum_{c,o,d,p} (y_{c,o,d,p} \phi_{c,o,d,p}) \quad (1)$$

O primeiro termo da função representa a margem de contribuição total gerada pelos volumes aceitos. Para cada fluxo, multiplica-se o volume aceito $x_{c,o,d,p,f,r}$ pela margem unitária $M_{c,o,d,p,r}$. Esse termo incentiva o modelo a priorizar fluxos com maior rentabilidade. O segundo termo, por sua vez, penaliza os cortes em relação ao volume mínimo contratual estabelecido. A variável $y_{c,o,d,p}$ representa o montante de volume não atendido em relação ao compromisso contratual, e $\phi_{c,o,d,p}$ é a penalidade financeira associada ao descumprimento. Dessa forma, o modelo internaliza os custos decorrentes do não atendimento contratual e equilibra o trade-off entre margens elevadas e penalizações contratuais.

A seguir, são introduzidas as restrições que asseguram a coerência entre o volume aceito e a demanda disponível, além de refletirem adequadamente os cortes contratuais previstos em cláusulas do tipo take-or-pay. Essas restrições têm por objetivo garantir que o volume total aceito para cada fluxo logístico não ultrapasse a demanda máxima estimada, ao mesmo tempo em que asseguram que qualquer corte em relação ao volume contratual mínimo seja corretamente registrado e penalizado no modelo. Assim, além de respeitar os limites comerciais da demanda, o modelo também reflete com precisão os impactos financeiros do não cumprimento de obrigações contratuais ou compromissos com clientes dependentes.

A Equação 2 impõe que o somatório do volume aceito $x_{c,o,d,p,f,r}$, considerando todas as frotas e microrregiões, seja limitado à demanda $D_{c,o,d,p}$ disponível. A Equação 3 quantifica a diferença entre o volume contratual mínimo $\hat{D}_{c,o,d,p}$ e o volume aceito. Esse valor é registrado por meio da variável $y_{c,o,d,p}$, que representa o corte a ser penalizado na função objetivo. Essa formulação assegura que, sempre que o volume aceito for inferior ao estabelecido em contrato, essa diferença seja registrada de forma explícita:

$$\sum_{f,r} x_{c,o,d,p,f,r} \leq D_{c,o,d,p} \quad \forall c, p, o, d \quad (2)$$

$$\hat{D}_{c,o,d,p} - \sum_{f,r} x_{c,o,d,p,f,r} \leq y_{c,o,d,p} \quad \forall c, p, o, d \quad (3)$$

Essas restrições, portanto, conectam diretamente o aceite de volumes à realidade comercial da demanda e às limitações impostas por contratos firmados, reforçando a integridade da modelagem em relação ao contexto real de planejamento logístico da companhia.

O modelo também impõe restrições operacionais que garantem a viabilidade logística do plano de volumes, respeitando a capacidade disponível de vagões, locomotivas e da via permanente. A restrição da Equação 4 limita o uso de vagões por frota, com base no volume aceito, peso médio transportado, ciclo logístico e horizonte de planejamento. A Equação 5 determina, para cada grupo de tração, o número de trens necessários para atender os fluxos a ele atribuídos. A Equação 6 impõe o limite máximo de locomotivas disponíveis no sistema. Já a restrição de via permanente, expressa na Equação 7, assegura que a quantidade de trens por trecho não ultrapasse sua capacidade operacional, medida em pares de trens por período.

$$\sum_{o,d,p} \frac{\sum_{c,r} x_{c,o,d,p,f,r} C_{o,d,p}}{P_{o,d,p,f}} \leq V_f \quad \forall f, b \quad (4)$$

$$\sum_{(o,d,p) \in G_g} \frac{\sum_{c,r,f} x_{c,o,d,p,f,r} C_{o,d,p}}{A_{o,d,p}} \leq \gamma_g \quad \forall g \quad (5)$$

$$\sum_g \gamma_g \leq L \quad \forall s \quad (6)$$

$$\sum_{c,p,f,r,(o,d) \in \mathbb{E}_Z} \frac{x_{c,o,d,p,f,r}}{A_{o,d,p}} \leq Z_z \quad \forall z \quad (7)$$

No caso específico do Corredor Centro-Norte da VLI, todos os trens são padronizados como composições formadas por uma locomotiva por lote de vagões, o que permite que o modelo contabilize diretamente o número de trens (variável γ_g) como equivalente à quantidade de locomotivas alocadas, sem necessidade de detalhar a configuração de tração por modelo. No entanto, essa modelagem pode ser adaptada para outros corredores logísticos, nos quais diferentes configurações de tração por trem exijam ajustes adicionais nas equações de disponibilidade de locomotivas. Em cenários onde existam múltiplos tipos de locomotivas e diferentes configurações de composição por trem, pode-se introduzir um índice adicional na indexação para o tipo de locomotiva e um parâmetro adicional que define a quantidade de locomotivas por trem para cada tipo, e reformular a restrição de necessidade total com base na soma da necessidade por tipos de locomotivas.

O modelo também impõe restrições à capacidade de movimentação dos portos e terminais envolvidos nas operações. Essas restrições são definidas com base em análises externas de capacidade por simulações dinâmicas, fornecidas como parâmetros de entrada. A Equação 8 assegura que o volume total movimentado por um porto ou terminal i — considerando tanto embarques quanto desembarques — não ultrapasse sua capacidade global $\tilde{V}_i$. Já a Equação 9 refina esse controle ao impor limites específicos por tipo de produto p , respeitando a segmentação operacional e estrutural de cada terminal. Ambas as restrições garantem que a solução proposta pelo modelo seja operacionalmente viável e compatível com os gargalos físicos identificados nos ativos portuários e logísticos.

$$\sum_{c,d,p,f,r} x_{c,i,d,p,f,r} + \sum_{c,o,p,f,r} x_{c,o,i,p,f,r} \leq \tilde{V}_i \quad \forall i \quad (8)$$

$$\sum_{c,d,f,r} x_{c,i,d,p,f,r} + \sum_{c,o,f,r} x_{c,o,i,p,f,r} \leq \tilde{V}_{i,p} \quad \forall i, p \quad (9)$$

3. Integração do Modelo ao Processo de Planejamento

O modelo de otimização proposto foi implementado e validado no contexto real de operação da VLI Logística, mais especificamente no planejamento de volumes do Corredor Centro-Norte. Esse corredor é responsável por conectar regiões produtoras de grãos, combustíveis e celulose às saídas portuárias do Terminal de São Luís (MA), desempenhando um papel estratégico na matriz logística da empresa.

A implementação computacional foi realizada na plataforma *Matlab R2018*, utilizando a *Optimization Toolbox*, com o solver `intlinprog`, projetado para tratar problemas com variáveis inteiras e contínuas sujeitas a restrições lineares, sendo particularmente eficiente na resolução de problemas combinatórios e de alocação de recursos com múltiplas restrições operacionais e contratuais.

Com o objetivo de tornar o modelo acessível e operacionalmente viável para os times de planejamento, foi desenvolvida uma interface gráfica interativa por meio do App Designer do MATLAB. Essa interface permite o carregamento dinâmico de premissas oriundas de análises estatísticas e simulações externas, a execução do modelo de otimização e a visualização estruturada dos resultados, incluindo gráficos, tabelas e indicadores-chave de desempenho.

Adicionalmente, a aplicação foi disponibilizada em ambiente web por meio do MATLAB Web App Server, possibilitando o acesso remoto, simultâneo e controlado por múltiplos usuários da organização. Esse recurso amplia a escalabilidade da solução, permitindo sua integração nos fluxos de decisão corporativos e promovendo maior disseminação do uso da modelagem matemática no suporte às decisões estratégicas.

A implementação foi desenvolvida com parametrização flexível da modelagem pelo usuário, permitindo a leitura e o processamento automatizado de diferentes conjuntos de dados de entrada, como projeções de demanda comercial, parâmetros operacionais, cláusulas contratuais e limites de capacidade. Esse grau de flexibilidade viabiliza a reutilização do modelo em diferentes cenários e facilita a incorporação de novas premissas.

Os cenários foram executados em um ambiente computacional com as especificações: processador Intel(R) Core(TM) i5-1135G7 de 11ª geração com frequência de 2.40 GHz, 16 GB de memória RAM instalada e sistema operacional Windows 64 bits. Tais recursos foram suficientes para garantir a execução eficiente do modelo, com tempo médio de aproximadamente 2 minutos para obtenção de um cenário otimizado pelo usuário. Esse tempo contempla desde a leitura das premissas de entrada até a exportação estruturada dos resultados.

4. Aplicação do Modelo em Cenário Real

Para avaliar a efetividade do modelo proposto, foi conduzido um estudo de caso baseado em dados reais de planejamento logístico de longo prazo em um corredor ferroviário estratégico. Três cenários distintos foram simulados a partir das premissas do ciclo orçamentário vigente, com foco na análise comparativa dos impactos financeiros gerados pela aplicação da otimização matemática.

O Cenário 1 representa o processo tradicional de planejamento, conduzido sem apoio de técnicas de otimização formal, utilizando ferramentas convencionais de planilhamento. Já o Cenário 2 simula a aplicação do modelo proposto com foco exclusivo em restrições operacionais e físicas — como disponibilidade de ativos, capacidade de portos e trechos ferroviários —, ignorando restrições comerciais ou contratuais. Por fim, o Cenário 3 introduz, além das restrições operacionais, as restrições comerciais estratégicas definidas pela companhia, como cláusulas contratuais de take-or-pay e limites por cliente.

Para fins de confidencialidade, os valores reais da empresa foram normalizados. A Tabela 4 apresenta os resultados financeiros dos três cenários comparativos, com os ganhos potenciais relativos à aplicação da otimização destacados na margem de contribuição do corredor.

Tabela 4: Resultados financeiros anuais comparativos (valores normalizados).

Cenário	Margem Normalizada	Ganho Potencial (%)
Planejamento sem Otimização (Cenário 1)	1,000	–
Otimização sem Restrições Comerciais (Cenário 2)	1,048	+4,8%
Otimização com Restrições Comerciais (Cenário 3)	1,018	+1,8%

Os resultados demonstram que o uso do modelo de otimização permite identificar oportunidades significativas de ganho financeiro. O Cenário 2 evidencia o ganho potencial máximo, ao considerar exclusivamente os fatores operacionais e selecionar os fluxos mais rentáveis. Já o Cenário 3, ao incorporar as restrições comerciais praticadas pela companhia, reflete um resultado mais realista, ainda com ganhos expressivos frente ao planejamento tradicional.

A comparação entre os Cenários 2 e 3 também permite avaliar o impacto financeiro decorrente das políticas comerciais internas, como compromissos contratuais e limites de volume por cliente. Esse tipo de análise é viabilizado pela flexibilidade do modelo, que possibilita a simulação de diferentes configurações operacionais e comerciais com agilidade e padronização.

Complementando a avaliação anual, foi realizada uma análise pontual com foco em um dos meses de maior demanda operacional no Corredor Centro-Norte, a fim de investigar, sob um recorte mais específico, os efeitos do modelo de otimização no processo de aceitação de volumes. Essa análise visou ilustrar como o modelo atua na priorização de fluxos dentro das restrições reais do sistema.

Foram comparados dois cenários: (i) o cenário construído com base na metodologia tradicional de planejamento, elaborado manualmente por especialistas da empresa em planilhas Excel, e (ii) o cenário gerado com o auxílio do sistema proposto, que incorpora o modelo matemático de otimização e considera automaticamente as restrições operacionais e comerciais vigentes.

A Tabela 5 sintetiza os resultados de ambos os cenários. As colunas “Tradicional - Volume (VNU)” e “Otimização - Volume (VNU)” representam, respectivamente, os volumes aceitos para cada fluxo segundo a metodologia tradicional e o modelo de otimização. Já as colunas “Tradicional - Margem (UMR)” e “Otimização - Margem (UMR)” apresentam a margem de contribuição relativa associada a cada fluxo em ambos os cenários. Todos os dados foram normalizados: os volumes foram divididos pelo total aceito no mês pela metodologia tradicional, e as margens, pela margem de contribuição do corredor obtida pela metodologia tradicional. Nomes de mercadorias e terminais foram substituídos por identificadores genéricos de fluxos (F1 a F8).

Apesar de o volume total aceito manter-se constante nos dois cenários — reflexo direto da capacidade física inalterada do sistema —, os resultados revelam uma realocação inteligente dos fluxos. O modelo de otimização priorizou rotas com maior retorno financeiro, substituindo fluxos menos rentáveis por alternativas mais estratégicas. Como consequência direta, a margem de

Tabela 5: Comparativo mensal entre planejamento metodologia tradicional tradicional e pela metodologia com o modelo de otimização no planejamento (dados normalizados).

Fluxo	Trad. - Vol. (VNU)	Otim. - Vol. (VNU)	Trad. - Margem (UMR)	Otim. - Margem (UMR)
F1	0.06	0.04	0.04	0.03
F2	0.00	0.02	0.00	0.01
F3	0.18	0.18	0.12	0.12
F4	0.29	0.43	0.37	0.56
F5	0.06	0.06	0.07	0.07
F6	0.25	0.27	0.23	0.24
F7	0.13	0.00	0.13	0.00
F8	0.03	0.00	0.03	0.00
Total	1.00	1.00	1.00	1.03

contribuição mensal apresentou um aumento de 3% em relação ao cenário tradicional.

Esse ganho percentual, ainda que aparentemente modesto, é extremamente representativo dentro da escala orçamentária da companhia e reforça o valor agregado pelo uso de técnicas matemáticas na gestão logística. Em particular, a priorização automática dos fluxos mais rentáveis reduz significativamente o risco de decisões subótimas, muitas vezes inevitáveis em abordagens manuais.

Portanto, a análise mensal confirma os benefícios observados na avaliação anual e demonstra que o modelo de otimização não apenas contribui para decisões mais racionais e alinhadas aos objetivos financeiros da empresa, como também automatiza etapas críticas, antes executadas de forma descentralizada e sujeita a falhas operacionais. Em um cenário logístico cada vez mais competitivo, ferramentas como esta fortalecem a capacidade analítica e estratégica das empresas do setor ferroviário.

5. Conclusão

Este trabalho apresentou o desenvolvimento e a aplicação de um modelo de otimização matemática para o planejamento estratégico de volumes no Corredor Centro-Norte de uma operadora logística ferroviária nacional. A proposta integrou restrições operacionais, comerciais e estratégicas em um modelo de Programação Linear Inteira Mista (MILP), viabilizando decisões mais assertivas e padronizadas no processo de definição de volumes anuais.

Os resultados obtidos demonstraram ganhos financeiros relevantes. Na análise anual, a adoção do modelo de otimização proporcionou um aumento de aproximadamente 1,8% na margem de contribuição em comparação à metodologia tradicional baseada em planilhas. Embora esse percentual possa parecer modesto à primeira vista, ele representa um ganho expressivo quando analisado à luz da magnitude dos valores envolvidos no orçamento logístico de uma companhia ferroviária. Já na análise mensal de um dos períodos críticos do ano, os ganhos em margem atingiram cerca de 3%, evidenciando a capacidade do modelo em priorizar fluxos mais rentáveis mesmo sob as mesmas restrições de capacidade física.

Adicionalmente, a comparação entre os diferentes cenários revela de forma explícita o impacto das restrições comerciais e contratuais sobre o desempenho financeiro do plano de volumes. Ao se observar a diferença entre o cenário puramente operacional e aquele que incorpora as diretrizes contratuais vigentes, nota-se uma redução significativa na margem de contribuição. Esse resultado reforça a necessidade de uma análise crítica e sistemática dessas restrições no processo de planejamento estratégico. Entender como tais compromissos influenciam a rentabilidade permite à organização não apenas antecipar riscos financeiros, mas também embasar negociações futuras

e redesenhar contratos de forma mais alinhada aos objetivos econômicos de longo prazo. Dessa forma, o modelo de otimização se consolida como uma ferramenta não apenas de planejamento, mas também de suporte à formulação de políticas comerciais sustentáveis.

Além dos ganhos financeiros diretos, a implementação da ferramenta computacional baseada no modelo proposto trouxe avanços qualitativos significativos para o processo decisório. A automatização das análises e o rigor matemático do modelo substituíram tarefas manuais anteriormente realizadas em planilhas Excel descentralizadas, nas quais os usuários precisavam verificar, de forma exaustiva, o atendimento de todas as restrições operacionais e contratuais. Com o novo sistema, tais verificações são executadas automaticamente, garantindo a viabilidade das soluções geradas e liberando tempo dos analistas para investigações mais estratégicas e analíticas.

A ferramenta também reduziu o risco de erros operacionais e retrabalho, promoveu a padronização das decisões e aumentou a agilidade na avaliação de múltiplos cenários. Por já estar em uso efetivo na rotina da empresa, o modelo proposto demonstra sua robustez e aplicabilidade prática, contribuindo para o fortalecimento do processo de planejamento estratégico e da governança de dados na logística ferroviária nacional.

A validação do modelo, tanto por análises comparativas quanto por sua adoção prática em ambiente corporativo, reforça a relevância da aplicação de técnicas de Pesquisa Operacional para problemas reais do setor logístico brasileiro. Como perspectivas futuras, destaca-se a possibilidade de expansão do modelo para outros corredores logísticos da companhia e a incorporação de incertezas por meio de abordagens estocásticas ou robustas, ampliando ainda mais o potencial de apoio à tomada de decisão.

Referências

- ANTT (2024). Boletim estatístico de transporte ferroviário 2024, agência nacional de transportes terrestres. URL <https://www.antt.gov.br/ferrovias/boletins-estatisticos>. Acesso em: maio 2024.
- Borndörfer, R., Schlechte, T., e Karbstein, M. (2018). Freight train routing. In Borndörfer, R., Klug, T., Kroon, L., e Reuther, M., editors, *Handbook of Optimization in the Railway Industry*, p. 25–47. Springer.
- Caprara, A., Kroon, L., Monaci, M., Peeters, M., e Toth, P. (2007). Chapter 3 passenger railway optimization. In Barnhart, C. e Laporte, G., editors, *Transportation*, volume 14 of *Handbooks in Operations Research and Management Science*, p. 129–187. Elsevier.
- Casemiro, S. L. d. S. e Costa, F. A. C. V. d. (2015). Distribuição otimizada de locomotivas para ganho de eficiência energética.
- Clautiaux, F. e Ljubić, I. (2025). Last fifty years of integer linear programming: A focus on recent practical advances. *European Journal of Operational Research*, 324(3):707–731. URL <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2024.11.018>.
- CNT (2023). Anuário cnt do transporte ferroviário 2023, confederação nacional do transporte. URL <https://www.cnt.org.br/publicacao/anuario-do-transporte-ferroviario-2023>. Acesso em: maio 2024.
- de Camargo, P. V. e da Cunha, C. B. (2012). Um modelo híbrido simulação-otimização para análise de capacidade de um sistema de transporte ferroviário de grãos agrícolas em ciclo fechado. *Journal of Transport Literature*, 6(2):33–65.

- Duarte, P. J. C., Dauzère-Pérès, S., Huisman, D., Mannino, C., Sartor, G., Weik, N., e Widmann, P. (2025). 50 years of or in railway timetabling and rolling stock planning. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 14:100155.
- Faria, C. H. F. d., Almeida, J. F. F., e Pinto, L. R. (2024). Simulation–optimisation approach for sustainable planning of intermodal logistics in the brazilian grain export industry. *Decision Analytics Journal*, 10:100388. URL <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2023.100388>.
- Foletto, M. B., Rosa, R. A., Louzada, P. C., e de Barros Pimenta, L. (2016). Modelo matemático para uma nova estratégia de planejamento da distribuição de vagões vazios. In *Anais do XLVIII SBPO - Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, Vitória, ES.
- Harrod, S. S. (2007). *Railway Capacity Management and Planning*. Doctor of philosophy (phd) in business administration (operations management), University of Cincinnati, Cincinnati, OH, USA.
- Hillier, F. S. e Lieberman, G. J. (2010). *Introduction to Operations Research*. McGraw-Hill Education, New York, 9 edition. ISBN 9780073376295.
- Ireland, P., Case, R., Fallis, J., Van Dyke, C., Kuehn, J., e Meketon, M. (2004). The canadian pacific railway transforms operations by using models to develop its operating plans. *Interfaces*, 34(1 SPEC. ISS.):5 – 14. Cited by: 36.
- Júnior, J. U. P. (2015). Modelagem, simulação e otimização do transporte de cargas na ferrovia de integração oeste leste (fiol). Dissertação de mestrado, Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica.
- Logística, V. (2025a). Corredor centro-norte. URL <https://www.vli-logistica.com.br/ativos-mapa/corredor-centro-norte/>. Acesso em: maio 2025.
- Logística, V. (2025b). Ferrovia norte-sul (fns). URL <https://www.vli-logistica.com.br/ativos-mapa/ferrovia-norte-sul-fns/>. Acesso em: maio 2025.
- Logística, V. (2025c). Quem somos. URL <https://www.vli-logistica.com.br/quem-somos/>. Acesso em: maio 2025.
- Ministério dos Transportes (2024). Novo PAC garante recursos para o transporte ferroviário e acelera retomada do setor no Brasil. Online.
- Shahidi, A., Rönnqvist, M., e Lehoux, N. (2025). Transportation planning in multiple bioenergy value chains: A literature review. *Journal of Cleaner Production*, 508:145552. URL <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145552>.
- Toth, P. e Vigo, D. (2014). *Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications*. SIAM – Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, 2 edition. ISBN 9781611973594.
- Valda, D. T. S., Yasuda, M. D., Tagaro, J. C., e III, S. E. V. (2024). Logistics optimization: A literature review of techniques for streamlining land transportation in supply chain operations. Preprint disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/384246072>.
- Zhang, X., Li, L., e Zhang, J. (2019). An optimal service model for rail freight transportation: Pricing, planning, and emission reducing. *Journal of Cleaner Production*, 218:565–574. URL <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.285>.