EVENTO ON-LINE
ConBRepro
XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
02 a 04 de dezembro de 2026
Inovação e Transformação Digital como Estratégia Competitiva nas Engenharias

Dimensionamento de Frota Ferroviária Sincronizado ao Line-up Portuário: um Modelo de Programação Linear Inteira Mista para a Exportação de Grãos

Nery Carvalho Filho

Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia – Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Gustavo Valentin Loch

Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia – Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Resumo: A exportação de commodities agrícolas pelo Porto de Santos depende da coordenação entre a disponibilidade de vagões, os estoques nas origens e a programação de navios estabelecida pelo line-up portuário. A fragmentação entre esses elementos na literatura de Pesquisa Operacional limita a aplicabilidade prática dos modelos existentes em corredores reais de exportação. Diante dessa lacuna, este artigo propõe um modelo de Programação Linear Inteira Mista (PLIM), estruturado em horizonte multiperíodo, para dimensionar a menor frota de vagões capaz de atender à demanda definida pelo line-up de um corredor ferroviário que conecta múltiplas origens do interior paulista ao Porto de Santos. O modelo integra a movimentação de vagões carregados e vazios, a formação de trens, as capacidades de carregamento e descarga e a evolução dos estoques, incorporando o transporte rodoviário como alternativa contingencial. Foram simulados oito cenários operacionais, com participação rodoviária variando de 0 a 200 caminhões por dia, considerando dois line-ups portuários reais. Os resultados mostram que a operação 100% ferroviária alcança eficiência logística máxima, enquanto a inserção do modal rodoviário provoca degradação não linear do desempenho do sistema, com crescimento desproporcional dos estoques portuários. O artigo contribui metodologicamente ao integrar, em uma única formulação, dimensionamento de frota, estoques intermediários e restrições portuárias, superando a fragmentação característica da literatura existente.

Palavras-chave: Dimensionamento de frota ferroviária, Programação Linear Inteira Mista, Sincronização ferrovia-porto, Exportação de grãos, Logística multimodal.

Railway Fleet Sizing Synchronized to the Port Line-up: a Mixed Integer Linear Programming Model for Grain Exports

Abstract: Agricultural commodity exports through the Port of Santos depend on coordinating wagon availability, intermediate inventories at the origins, and the vessel schedule defined by the port line-up. The fragmentation among these elements in the Operations Research literature limits the practical applicability of existing models in real export corridors. To address this gap, this paper proposes a Mixed Integer Linear Programming (MILP) model, structured over a multi-period horizon, to size the smallest wagon fleet capable of meeting the demand defined by the line-up of a railway corridor connecting multiple origins in the interior of São Paulo to the Port of Santos. The model integrates the movement of loaded and empty wagons, train formation, loading and unloading

capacities, and inventory evolution, incorporating road transport as a contingency alternative. Eight operational scenarios were simulated, with road participation ranging from 0 to 200 trucks per day, considering two real port line-ups. Results show that fully railway-based operation achieves maximum logistical efficiency, while the introduction of road transport causes nonlinear performance degradation, with disproportionate growth in port inventories. The paper contributes methodologically by integrating fleet sizing, intermediate inventories, and port constraints into a single formulation, overcoming the fragmentation that characterizes the existing literature.

Keywords: Railway fleet sizing, Mixed Integer Linear Programming, Railway-port synchronization, Grain exports, Multimodal logistics.

1. Introdução

A competitividade do agronegócio brasileiro está diretamente relacionada à capacidade de movimentar grandes volumes de produtos entre as regiões produtoras e os portos de exportação. O desempenho dessas cadeias logísticas ainda é condicionado por limitações de infraestrutura, concentração dos fluxos em determinados corredores, sazonalidade da produção e dificuldades de coordenação entre os agentes envolvidos nas operações de transporte, armazenagem e exportação (BRANCO et al., 2022).

A logística ferroviária aplicada à exportação de commodities agrícolas configura-se como um sistema dinâmico e acoplado, no qual transporte, armazenagem e operações portuárias interagem continuamente. A eficiência global não pode ser avaliada de forma isolada por subsistemas: a operação ferroviária influencia diretamente os níveis de estoque intermediário, enquanto a capacidade portuária atua como restrição dinâmica que retroalimenta todo o sistema logístico. Essa interação caracteriza um sistema com memória logística, no qual decisões presentes afetam estados futuros, exigindo abordagens multiperíodo e integradas (FARIA et al., 2024).

No corredor que conecta origens do interior do Estado de São Paulo ao Porto de Santos, essa necessidade de integração é particularmente relevante. A demanda do porto não se distribui uniformemente ao longo do horizonte de planejamento, mas é determinada pelos volumes, pelas datas previstas de atracação e pelas janelas operacionais registradas no line-up portuário. A falta de sincronização entre os fluxos terrestres e o line-up pode produzir situações operacionais indesejáveis: a chegada antecipada de cargas aumenta estoques e ocupa a capacidade dos terminais, enquanto o atraso no posicionamento dos volumes compromete o carregamento dos navios e eleva o risco de custos de sobre-estadia, ou demurrage (DE ANDRADE; MENEZES, 2021).

A literatura recente em Pesquisa Operacional tem avançado significativamente na modelagem de sistemas ferroviários, com destaque para modelos de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) aplicados ao dimensionamento de frotas (MILENKOVIĆ et al., 2023; HRUŠOVSKÝ et al., 2025; KARMANESH et al., 2024), à distribuição de vagões (CACCHIANI et al., 2014; CALADO et al., 2017) e à gestão de estoques em cadeias multimodais (STEADIESEIFI et al., 2014). No entanto, tais avanços ocorreram de forma fragmentada, focando predominantemente em subproblemas específicos, sem associar explicitamente o dimensionamento da frota ferroviária à distribuição temporal dos volumes estabelecida pela programação dos navios.

Nesse cenário, emerge uma lacuna relevante: a ausência de modelos capazes de integrar simultaneamente a dinâmica da frota ferroviária, os estoques intermediários e a capacidade portuária em um ambiente multiperíodo. Diante disso, este trabalho propõe um modelo integrado de otimização que busca minimizar a quantidade de vagões necessários para atender, com o menor número possível de ativos, à demanda de grãos definida pelo line-up portuário, considerando múltiplas origens, tempos de ciclo, capacidades operacionais, estoques e a utilização contingencial do transporte rodoviário.

Este artigo está dividido em cinco seções, além desta introdução. A Seção 2 apresenta o referencial teórico sobre logística ferroviária, dimensionamento de frotas e integração ferrovia-estoque-porto, situando a lacuna científica abordada. A Seção 3 descreve a metodologia e a formulação matemática do modelo proposto. A Seção 4 apresenta e discute os resultados dos cenários simulados. A Seção 5 traz as conclusões, contribuições e recomendações para trabalhos futuros.

2. Referencial teórico

2.1 Logística ferroviária como sistema dinâmico integrado

A logística ferroviária exportadora deve ser compreendida como um sistema dinâmico e acoplado, no qual transporte, armazenagem e operações portuárias interagem continuamente. Faria et al. (2024) demonstram que a fragmentação decisória entre esses subsistemas resulta em perdas estruturais de eficiência, reforçando a necessidade de abordagens integradas. A presença de estoques intermediários transforma o problema logístico em um sistema de estados, no qual decisões produzem efeitos acumulativos ao longo do tempo, aproximando a modelagem logística de estruturas de controle dinâmico.

2.2 Dimensionamento de frota e distribuição de vagões

A gestão eficiente da frota ferroviária depende da modelagem do ciclo completo dos vagões, incluindo disponibilização, carregamento, circulação, descarga, retorno vazio e reutilização em novos ciclos (HAGHANI, 1989; CACCHIANI et al., 2014). Estudos recentes de fleet sizing ferroviário avançaram na determinação do tamanho ótimo da frota: Milenković et al. (2023) propuseram uma abordagem de decomposição para o dimensionamento de vagões planos em uma operadora ferroviária de grande porte; Hrušovský et al. (2025) desenvolveram um modelo PLIM que integra o dimensionamento estratégico da frota ao planejamento operacional multianual; e Karmanesh et al. (2024) formularam um modelo de programação estocástica em dois estágios para o dimensionamento e a alocação de vagões sob incerteza de demanda. Calado et al. (2017) formularam um modelo PLIM para distribuição de vagões que incorporou restrições reais de operação. Em direção semelhante, Zakhirehkar Sahih et al. (2023) propuseram um modelo de dimensionamento de frota para uma rede ferroviária de minérios, permitindo demanda não atendida mediante penalidades. Mais recentemente, Breyer et al. (2026) desenvolveram um arcabouço computacional que integra, em um único modelo PLIM macroscópico, o dimensionamento de frota, a alocação de fluxos e a programação de trens em escala nacional, evidenciando que esses três subproblemas ainda são tratados de forma predominantemente parcial na literatura ferroviária. Em todos esses casos, contudo, a frota é tratada isoladamente, sem sincronização explícita com a programação de embarques portuários.

2.3 Integração estoque-transporte-porto

A literatura clássica trata transporte e estoque de forma separada. Em sistemas exportadores, porém, os estoques funcionam como buffers dinâmicos e o porto atua como restrição reguladora, de modo que o sistema apresenta realimentação contínua entre os subsistemas. SteadieSeifi et al. (2014) e Crainic e Laporte (1997) destacam que a integração entre transporte e estoque é essencial para representar sistemas multimodais reais. Do lado portuário, De Andrade e Menezes (2021) propõem uma formulação PLIM que integra planejamento, sequenciamento, alocação de pátios e alocação de berços em terminais de exportação de granéis sólidos, evidenciando que a capacidade de armazenagem no porto e o sequenciamento dos navios são mutuamente dependentes. Ainda assim, esse tipo de modelo trata a chegada dos produtos ao porto como um fluxo de entrada dado, sem representar a origem ferroviária ou o dimensionamento da frota de vagões. Trabalhos mais recentes sobre terminais de granéis, como o de Jiang et al. (2024),

que otimiza de forma conjunta canais, berços e pátios considerando emissões de carbono, aprofundam a modelagem portuária, mas mantêm a mesma limitação: a origem dos fluxos terrestres permanece exógena ao modelo.

2.4 Lacuna científica

A análise crítica da literatura evidencia que, apesar dos avanços metodológicos, há uma fragmentação estrutural nos modelos existentes: não há, simultaneamente, integração entre o dimensionamento da frota ferroviária, a modelagem de estoques intermediários, a consideração da capacidade portuária e uma estrutura multiperíodo com memória logística. Essa lacuna limita a aplicabilidade prática dos modelos em sistemas reais de exportação agrícola e motiva a formulação proposta neste artigo, que avança o estado da arte ao integrar, em um único modelo, a dinâmica da frota, dos estoques e da capacidade portuária, calibrado com dados operacionais do corredor Interior Paulista–Porto de Santos.

2.5 Síntese da revisão

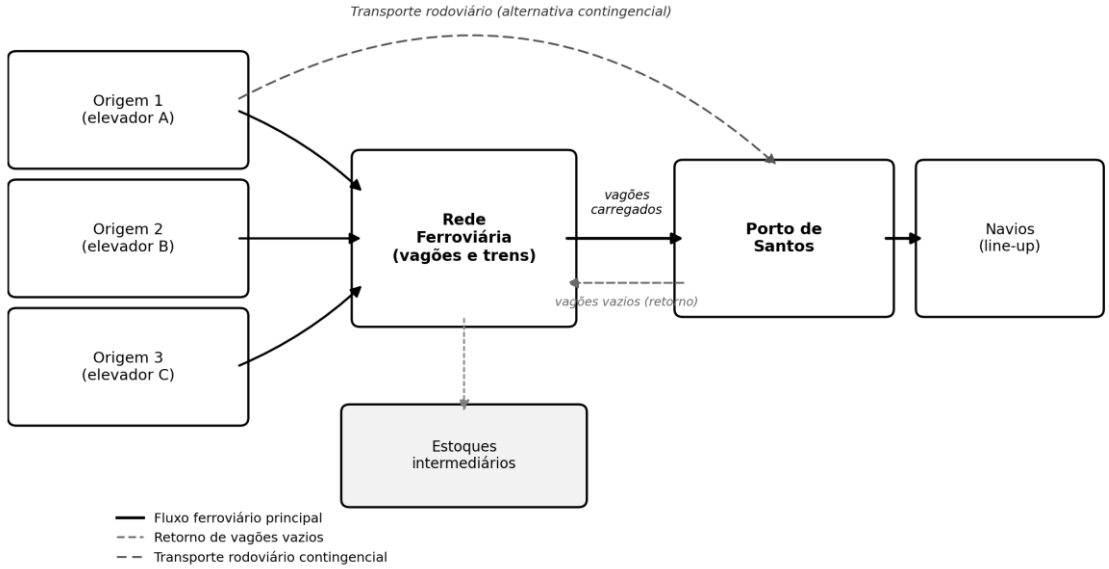
Para caracterizar quantitativamente essa fragmentação, foi conduzida uma revisão de dezenove estudos recentes sobre logística ferroviária exportadora — os dezesseis estudos da revisão original, acrescidos de três trabalhos publicados mais recentemente (BREYER et al., 2026; JIANG et al., 2024; ZAKHIREHKAR SAHIH et al., 2023) —, classificados segundo três dimensões: gestão de estoques, gestão de frota ferroviária e capacidade operacional portuária. Do total analisado, 73,7% dos estudos abordam questões de frota (alocação de vagões, dimensionamento ou programação de trens), 21,1% incorporam explicitamente variáveis de estoque e 21,1% consideram restrições portuárias em suas formulações. Mais relevante ainda: apenas um único estudo da amostra Faria et al. (2024) contempla simultaneamente as três dimensões, o que corresponde a 5,3% da literatura revisada. Esse resultado evidencia, de forma quantitativa, a fragmentação estrutural apontada nas subseções anteriores — mesmo após a inclusão de estudos mais recentes, nenhum deles integra as três dimensões simultaneamente — e reforça a pertinência do modelo proposto neste artigo.

3. Metodologia

O agronegócio brasileiro respondeu por 23,2% do Produto Interno Bruto em 2024, com projeção de atingir 29,4% em 2025, respondendo por quase metade das exportações nacionais. Apesar dessa força, o setor enfrenta gargalos logísticos como a dependência do modal rodoviário, limitações da malha ferroviária e instabilidade nas janelas portuárias, especialmente no Porto de Santos. A sincronização entre ferrovia e porto é essencial para evitar atrasos, formação excessiva de estoques e custos adicionais de sobre-estadia.

Diferentemente da literatura tradicional, o modelo proposto estrutura o sistema logístico como um processo dinâmico de estados interdependentes ao longo do tempo, no qual estoques, fluxos e disponibilidade de ativos são tratados como variáveis endógenas. Essa abordagem permite capturar efeitos de realimentação entre ferrovia e porto, aumentando a aderência do modelo à realidade operacional do corredor estudado, composto por múltiplas origens no interior paulista e o Porto de Santos como destino. A Figura 1 ilustra esquematicamente a estrutura do corredor logístico representado pelo modelo.

Figura 1 – Estrutura esquemática do corredor logístico ferrovia-porto



Fonte: Elaboração própria (2026).

Como ilustrado na Figura 1, cada origem despacha vagões carregados para a rede ferroviária, que os movimenta até o Porto de Santos; após a descarga, os vagões retornam vazios às origens para reutilização em novos ciclos. Os estoques intermediários absorvem eventuais dessincronizações entre a disponibilização das cargas nas origens e a capacidade de processamento da rede, enquanto o transporte rodoviário é representado como um fluxo alternativo direto entre origens e porto, acionado apenas de forma contingencial.

3.1 Formulação matemática

Modelo Matemático

Conjuntos

H = {1,.....,|H|} : períodos (dia)

L : conjunto de locais (origens O ⊂ L)

A ⊆ L x L : arcos permitidos de deslocamento ferroviário.

Parâmetros

$D_{i,t}$: demanda de expedição da origem i ∈ O no período t.

$T_{i,j}^{C}$ tempo do deslocamento carregado de i para j, para (i,j) ∈ A

$T_{i,j}^{V}$ tempo do deslocamento vazio de i para j, para (i,j) ∈ A

T_{i}^{Cgt} tempo de carregamento no local i

T_{i}^{Desgt} tempo de descarga no local i

$cap_{trem} capacidade\ de\ vagões\ em\ um\ trem$

$cap_{i,t}^{Cgt}$ capacidade de início de carregamento no local i e período t

$cap_{i,t}^{Desgt}$ capacidade de descarga no local i no período t (porto)

$Es_{i,0}^{C}$ estoque de vagões carregados no ponto i no tempo t=0

$Es^{V}_{i,0}$ estoque de vagões vazios no ponto i no tempo t=0

Variáveis de decisão

Fluxos e operações (inteiras, ≥ 0)

$x^{C}_{i,j,t}$ vagões carregados que partem de i para j no inicio do período t, (i,j) ∈ A

$x^{V}_{i,j,t}$ vagões vazios que partem de i para j no inicio do período t, (i,j) ∈ A

$vgc_{i,t}$ vagões carregados em i que iniciam a descarga no período t

$vgv_{i,t}$ vagões vazios em i que iniciam o carregamento no período t

Estoques (inteiras, ≥ 0)

$Es^{C}_{i,t}$estoque de vagões carregados em i ao final do período t

$Es^{V}_{i,t}$estoque de vagões vazios em i ao final do período t

Alocação

Alocação de trens (inteiras, ≥ 0)

$z^{C}_{i,j,t}$ número de trens carregados no arco (i,j) no período t

$z^{V}_{i,j,t}$ número de trens vazios no arco (i,j) no período t

Variável de tamanho de frota

W ∈ $\mathbb{Z}_{+}$

Função objetivo

$\min W = \sum_{i \in L}(Es^{C}_{i,0} + Es^{V}_{i,0}) \leq$ W

Restrições

Atendimento da demanda no porto por período t (1)

$u_{P,t} = d_t = \sum_{i \epsilon O} D_{i,t} \quad \forall\, t \epsilon H$

Balanços de estoque – carregados (2)

Para cada $i \epsilon L, t \epsilon H$:

$Es^{C}_{i,t} = ES^{C}_{i,t-1} - u_{i,t} - \sum_{j:(i,j)\epsilon A} x^{C}_{i,j,t} + \sum_{k:(k,i)\epsilon A} x^{C}_{ki,t-\, t^{C}_{ki}} + l_{i,t-\, \varphi^{load}_{i}}$

Balanço de estoque – vazio (3)

$Es^{V}_{i,t} = Es^{V}_{i,t-1} - l_{i,t} - \sum_{j:(i,j)\epsilon A} x^{V}_{i,j,t} + \sum_{k:(k,i)\epsilon A} x^{V}_{ki,t-\, t^{V}_{ki}} + u_{i,t-\, \varphi^{unload}_{i}}$

Capacidade de carregamento/descarga (4)

$0 \leq l_{i,t} \leq cap^{caregado}_{i,t}$, $0 \leq u_{i,t} \leq cap^{vazio}_{i,t} \quad \forall i \epsilon L, \forall t \epsilon H$

Vinculação vagões – trens e limite de trens (5)

$x^{C}_{i,j,t} \leq cap_train^{C}_{i,j,t} \quad x^{E}_{i,j,t} \leq cap_train^{V}_{i,j,t}\, z^{V}_{i,j,t} \quad \forall\, (i,j) \epsilon A, \forall t \epsilon H$

Conservação do ciclo (6)

$Es^{C}_{i,|H|} = Es^{C}_{i,0}\ ,\ Es^{V}_{i,|H|} = Es^{V}_{i,0}\ ,\ \forall i \in L$

Não negatividade e integralidade (7)

$x^{C}_{i,j,t};\ x^{V}_{i,j,t};\ u_{i,t}; l_{i,t};\ Es^{C}_{i,t}; Es^{V}_{i,t}; z^{C}_{i,j,t}\ z^{V}_{i,j,t} \in \mathbb{Z}_{+}\ , W\ \in \mathbb{Z}_{+}$

A função objetivo minimiza o tamanho total da frota de vagões necessária para atender ao sistema, respeitando as restrições operacionais descritas a seguir.

Tabela 1 – Restrições do modelo e seu significado operacional

Restrição	Descrição	O que garante
(1)	Atendimento da demanda portuária	Garante que, em cada período, o volume recebido no Porto de Santos seja exatamente igual à demanda prevista pelo line-up.
(2)	Balanço de estoque de vagões carregados	Controla a evolução dos estoques de vagões com carga em cada local ao longo do horizonte de planejamento.
(3)	Balanço de estoque de vagões vazios	Regula a disponibilidade de vagões vazios, considerando carregamentos, deslocamentos e estoques dos períodos anteriores.
(4)	Capacidade de carregamento e descarga	Limita as operações de carregamento e descarga conforme a capacidade instalada em cada ponto da rede.
(5)	Vinculação vagões–trens	Assegura que a quantidade de vagões transportados não ultrapasse a capacidade dos trens alocados em cada arco e período.
(6)	Conservação do ciclo	Impõe que o estoque final de vagões seja igual ao inicial, evitando soluções artificiais com criação ou perda de vagões.
(7)	Não negatividade e integralidade	Define as variáveis do modelo como inteiras e não negativas.

Fonte: Elaboração própria (2026).

4. Resultados e discussão

Foram simulados oito cenários operacionais com variação da participação do modal rodoviário entre 0 e 200 caminhões por dia (equivalente a 0 a 7.400 toneladas/dia, considerando 37 toneladas por veículo), avaliando dois line-ups portuários representativos: o primeiro com demanda total de 767.993 toneladas e o segundo com 652.794 toneladas. O objetivo foi analisar a eficiência logística global do sistema diante de diferentes níveis de participação rodoviária.

Nos cenários 1 e 5, que representam a operação 100% ferroviária, a eficiência atingiu 100%, com atendimento integral das demandas e excedentes inferiores a 0,5%, caracterizando a condição ideal de sincronismo entre transporte e embarque. À medida que o modal rodoviário foi incorporado, observou-se perda de sincronia operacional e aumento dos estoques portuários. No cenário 2, com 100 caminhões por dia, a eficiência caiu para 97%; no cenário 3, com 150 caminhões, reduziu-se para 93%; e no cenário 4, com 200 caminhões diários, atingiu apenas 85%, indicando sobrecarga crítica. Resultados semelhantes foram observados para o segundo line-up, reforçando o comportamento não linear do sistema e a sensibilidade do porto ao incremento de fluxos rodoviários.

Tabela 2 – Eficiência logística por cenário simulado

Cenário	Caminhões /dia	Toneladas/ dia	Eficiência (%)	Excedente (t)	Comentário
1	0	0	100	3.217	Situação ideal, atendimento integral
2	100	3.700	97	27.417	Pequeno aumento de estoque final
3	150	5.550	93	31.727	Indícios de sobreoferta
4	200	7.400	85	121.727	Sobrecarga crítica
5	0	0	100	2.980	Situação base no segundo line-up
6	100	3.700	96	19.800	Estabilidade operacional
7	150	5.550	92	34.200	Aumento expressivo de carga
8	200	7.400	84	115.500	Saturação de capacidade portuária

Fonte: Elaboração própria.

Considerando que cada vagão ferroviário transporta cerca de 100 toneladas líquidas de produto, e que uma composição típica é formada por 120 vagões, cada trem movimenta aproximadamente 12.000 toneladas por viagem. Assim, o acréscimo diário de 7.400 toneladas via caminhões equivale a cerca de 62% da carga total de um trem, ou 10% a 11% da carga de um navio, cuja capacidade média varia entre 65 e 70 mil toneladas. Em termos operacionais, isso representa a chegada de um navio adicional a cada nove dias, gerando desequilíbrio entre a entrada de carga e o ritmo de embarque.

A ferrovia, ao operar de forma sincronizada com o porto, mantém o equilíbrio logístico, reduz custos e aumenta a previsibilidade. Assim, o transporte rodoviário deve ser utilizado apenas como alternativa contingencial, em situações de indisponibilidade de vagões ou restrições temporárias na descarga ferroviária. Os resultados evidenciam que o sistema apresenta comportamento não linear, no qual pequenos aumentos na entrada de carga via modal rodoviário resultam em crescimento desproporcional dos estoques portuários efeito decorrente da restrição de capacidade de descarga, que atua como gargalo sistêmico. Tal comportamento reforça a necessidade de modelos integrados, capazes de capturar a interação entre fluxo de entrada e capacidade de processamento, como o modelo proposto neste artigo.

Esses resultados também permitem uma leitura comparativa em relação à literatura revisada na Seção 2. Diferentemente de Faria et al. (2024), cuja função objetivo prioriza o desempenho ambiental da cadeia mantendo a frota como recurso previamente disponível, o modelo aqui proposto trata o tamanho da frota como variável de decisão central, determinando não apenas quantos vagões são necessários, mas quando devem estar disponíveis e como devem circular entre origens para atender ao line-up. Da mesma forma, em relação aos modelos de fleet sizing revisados (MILENKOVIĆ et al., 2023; HRUŠOVSKÝ et al., 2025; KARMANESH et al., 2024), que dimensionam a frota sem sincronização explícita com a programação portuária, os resultados aqui apresentados demonstram empiricamente por que essa sincronização é indispensável: cenários com a mesma frota disponível produzem eficiências logísticas muito distintas (100% a 84%) unicamente em função da forma como o transporte rodoviário interage com o line-up, algo que uma formulação de dimensionamento desacoplada da programação portuária não seria capaz de capturar.

Do ponto de vista gerencial, esses achados sugerem que decisões de expansão de frota tomadas isoladamente do planejamento portuário tendem a subestimar o risco de sobrecarga de estoques ou a superestimar a necessidade de ativos adicionais. Operadores logísticos que atuam em corredores semelhantes ao estudado múltiplas origens, destino portuário único e demanda distribuída de forma não uniforme ao longo do horizonte podem

utilizar a lógica do modelo proposto para avaliar, antes de comprometer capital em novos vagões, se o problema real é de quantidade insuficiente de ativos ou de sincronização inadequada entre os fluxos existentes e a programação de navios.

5. Conclusão

Este artigo apresentou a formulação e a aplicação de um modelo de Programação Linear Inteira Mista voltado ao dimensionamento mínimo da frota de vagões ferroviários sincronizada ao line-up do Porto de Santos. A principal contribuição científica reside na abordagem integrada, que combina sincronização modal, dimensionamento de frota e aderência às demandas dinâmicas do porto, superando a fragmentação identificada na literatura de Pesquisa Operacional aplicada a corredores ferroviários de exportação.

Os resultados evidenciam que, quando a ferrovia dispõe de frota suficiente para atender integralmente às demandas do line-up, não há necessidade operacional de inserção do modal rodoviário. Essa condição ideal depende, porém, da chegada pontual e completa dos trens: atrasos ou indisponibilidades de vagões podem comprometer o atendimento portuário e gerar custos adicionais. Nesse contexto, o transporte rodoviário atua como elemento contingencial estratégico, conferindo flexibilidade e resiliência ao sistema multimodal, ainda que seu uso indiscriminado eleve os estoques portuários de forma não linear, conforme demonstrado nos cenários simulados.

Do ponto de vista teórico, o trabalho contribui ao avançar de uma modelagem fragmentada para uma abordagem sistêmica integrada, alinhando-se às recomendações recentes da literatura em Pesquisa Operacional aplicada à logística. Do ponto de vista prático, oferece uma ferramenta de apoio à decisão para corredores logísticos reais, com potencial de reduzir custos, aumentar eficiência e mitigar riscos operacionais.

Como limitações, destaca-se que o modelo trata a demanda do line-up como determinística; variações não previstas na programação dos navios não são capturadas na formulação atual. Como perspectivas futuras, recomenda-se a incorporação de incertezas via programação estocástica, o desenvolvimento de formulações multiobjetivo e a integração do modelo a sistemas de gestão em tempo real, ampliando sua aplicabilidade à prática empresarial do agronegócio brasileiro.

Referências

BRANCO, José Eduardo Holler; BARTHOLOMEU, Daniela Bacchi; ALVES, Layon Carlos; CAIXETA-FILHO, José Vicente. Multimodal transportation network for soybean exports in Brazil: an analysis of investment scenarios. **Research in Transportation Business & Management**, v. 44, 2022.

BREYER, Nils; LIDÉN, Tomas; TADAROS, Marduch; YU, Liyun. A computational framework for dimensioning a railway freight transportation plan. **Journal of Rail Transport Planning & Management**, v. 38, art. 100585, 2026.

CACCHIANI, Valentina; HUISMAN, Dennis; KIDD, Martin; KROON, Leo; TOTH, Paolo; VEELENTURF, Lucas; WAGENAAR, Joris. An overview of recovery models and algorithms for real-time railway rescheduling. **Transportation Research Part B**, v. 63, p. 15–37, 2014.

CALADO, Marcello; BARROS, Júlio; NOBRE, Ernesto; PRATA, Bruno. A mixed integer programming approach for freight railcar distribution. **Production**, v. 27, e20152038, 2017.

CRAINIC, Teodor Gabriel; LAPORTE, Gilbert. Planning models for freight transportation. **European Journal of Operational Research**, v. 97, n. 3, p. 409–438, 1997.

DE ANDRADE, José Luiz Mendes; MENEZES, Gilberto de Carvalho. An integrated planning, scheduling, yard allocation and berth allocation problem in bulk ports: model and heuristics. In: Computational Logistics: 12th International Conference, ICCL 2021, Enschede. Cham: Springer, 2021. p. 3–20.

FARIA, Carlos Henrique Fernandes de; PINTO, Luiz Ricardo; ALMEIDA, João Flávio Freitas de; BRETAS, Allan Messeder Caldas. Sustainable and integrated rail operations planning for grain exports. **Journal of Simulation**, v. 18, n. 6, p. 1076–1093, 2024.

HAGHANI, Ali E. Formulation and solution of a combined train routing and makeup, and empty car distribution model. **Transportation Research Part B**, v. 23, n. 6, p. 433–452, 1989.

HRUŠOVSKÝ, Martin; HEMMELMAYR, Vera; SCHETT, Georg; BIRKMAIER, Alexandra; SCHLUND, Sebastian. Integrated planning approach for fleet sizing and fleet management of freight railcars. **Flexible Services and Manufacturing Journal**, v. 37, n. 3, p. 869–903, 2025.

JIANG, Xing; ZHONG, Ming; SHI, Jiahui; LI, Weifeng. Optimization of integrated scheduling of restricted channels, berths, and yards in bulk cargo ports considering carbon emissions. **Expert Systems with Applications**, v. 258, art. 124604, 2024.

KARMANESH, Yasin; BAGHERI, Morteza; MOHAMMAD HASANY, Reza; PISHVAEE, Mir Saman. Two-stage stochastic programming approach for fleet sizing and allocating rail wagon under uncertain demand. **Computers & Industrial Engineering**, v. 188, art. 109878, 2024.

MILENKOVIĆ, Miloš; BOJOVIĆ, Nebojša; ABRAMIN, Dmitry. Railway freight wagon fleet size optimization: a real-world application. **Journal of Rail Transport Planning & Management**, v. 26, art. 100373, 2023.

STEADIESEIFI, Maryam; DELLAERT, Nico P.; NUIJTEN, Wim; VAN WOENSEL, Tom; RAOUFI, Reza. Multimodal freight transportation planning: a literature review. **European Journal of Operational Research**, v. 233, n. 1, p. 1–15, 2014.

ZAKHIREHKAR SAHIH, Amirhosein; SHAHMIRI, Sina; MOMTAZI, Mahsa; ZOHREH, Mostafa. Optimization of fleet size and determining the optimal allocation of wagons in minerals transport network: a case study of Iran's railway system. **Journal of Rail Transport Planning & Management**, v. 28, art. 100414, 2023.