



PROGRAMAÇÃO LINEAR APLICADA AO PLANEJAMENTO DE RECEBIMENTO DE VAGÕES EM TERMINAIS PORTUÁRIOS

Dennis Caceta¹

¹Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) – Brasil

RESUMO

Em 2024, as exportações de Soja, Farelo de Soja e Milho, corresponderam a aproximadamente 161,43 milhões de toneladas. No porto de Santos, o maior do país, foram embarcadas cerca de 53,72 milhões deste total, sendo que, apenas 37,48 milhões foram transportadas por vias férreas, mesmo havendo maior eficiência, capacidade e sustentabilidade neste tipo de transporte. Assim, o terminal portuário recebe, por via rodoviária, parcela significativa daquilo que despacha por via marítima tendo que, além de controlar dinamicamente seus níveis de estoque, também cumprir compromissos com os diversos envolvidos na operação, tais quais, as empresas que atuam no transporte ferroviário, as cooperativas de transporte rodoviário, os embarcadores de carga, entre outros. O presente trabalho propõe, modelar em programação linear e, utilizando a plataforma e recursos da linguagem AMPL, uma ferramenta básica para planejamento mensal que harmoniza o recebimento de mercadorias pelos modais rodoviário e ferroviário, consonante ao carregamento dos navios e políticas locais de estoque. Com ela é possível, a partir da programação de atracação dos navios, estimar a necessidade de recebimento das carretas provenientes de um pátio regulador, assim como das composições ferroviárias e considerar, entre outras variáveis, a produtividade e a capacidade de carga de cada operação, de modo a atender à demanda prevista. O objetivo é reduzir custos, minimizar ineficiências e aumentar a segurança e a continuidade das atividades operacionais.

Palavras-chave: Ferrovia, Embarque Marítimo, Otimização, Grãos, Porto.

1. INTRODUÇÃO

Em 2024, as exportações brasileiras chegaram a US\$ 298 bilhões, segundo informações do Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio (2025), tendo o milho e a soja correspondido por 17,09% deste total em um período que, a produção destas mercadorias foi de 263,42 milhões de toneladas. Para a safra 2024/2025, prevê-se um crescimento na ordem de 10%, conforme indica a Companhia Nacional de Abastecimento (2025). Calcula-se ainda que, em média, do total produzido nos últimos 5 anos, cerca de 35% do milho e 64% da soja foram destinados ao mercado externo.

Com base na divulgação da Agência Nacional de Transporte Terrestre (2025), em 2024, apenas 62,25 MM toneladas de milho, soja e farelo de soja, foram transportadas por vias férreas e, desta forma, em regiões aonde as hidrovias são pouco (ou nada) utilizadas ao atendimento dos terminais marítimos, o transporte de cargas até o porto, aonde ocorre a armazenagem para posterior embarque se dá ainda e, em grande parte, por rodovias.

Em 2019, de acordo com o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (2020), o Brasil possuía 380 terminais portuários sendo, 210 terminais de uso



privado (TUP) localizados em portos privados e 170 terminais arrendados em portos públicos. O maior deles, o complexo Portuário de Santos, é apresentado pela Figura 1 que descreve os terminais lá existentes (AUTORIDADE PORTUÁRIA DE SANTOS, 2025).

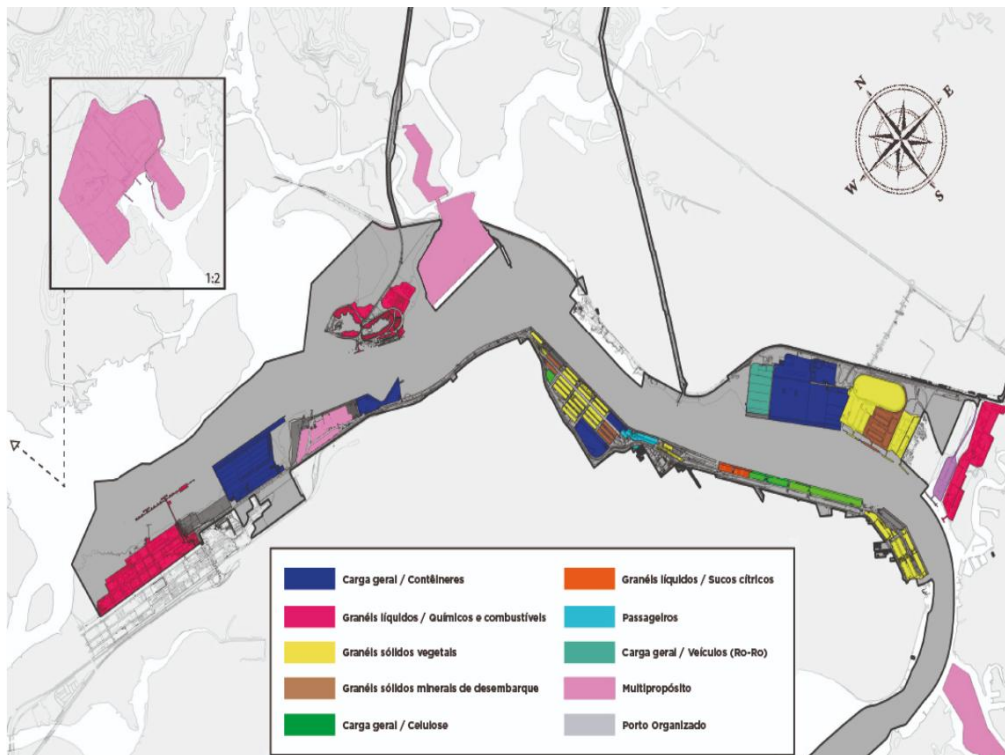


Figura 1. Complexo Portuário de Santos

Um complexo como o de Santos, abriga terminais que operam cargas de diversas naturezas. O macro processo geral, do recebimento à expedição marítima, que acontece nos operadores portuários de granéis sólidos, pode ser observado na Figura 2. (TERMINAL EXPORTADOR DE SANTOS - TES, 2025)

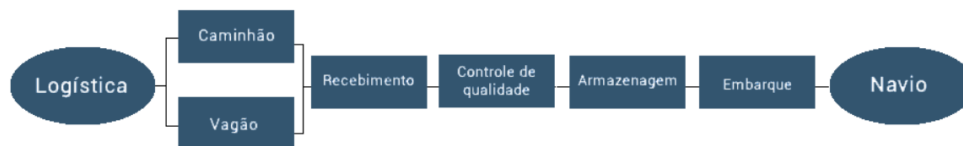


Figura 2. Macro Fluxograma do Processo (TES, 2025)

Como demonstrado, o recebimento de granéis sólidos em terminais portuários pode ser realizado por meio de moegas rodoviárias e/ou ferroviárias, cada uma com características específicas que influenciam a eficiência e a sustentabilidade das operações logísticas (CORREDOR LOGÍSTICA E INFRAESTRUTURA – CLI, 2024), conforme descritas a seguir:

- **Moegas Rodoviárias:** São estruturas destinadas ao descarregamento de caminhões que transportam granéis sólidos. A descarga é efetuada geralmente por tombadores, que inclinam o veículo para que a carga seja despejada na moega. Para evitar a dispersão de partículas durante o processo de descarga, é essencial que as moegas rodoviárias sejam equipadas com sistemas de aspiração eficientes. Esses sistemas consistem em ventiladores centrífugos, tubulações de transporte



de ar e filtros de mangas, que filtram o ar antes de liberá-lo novamente no ambiente, garantindo a saúde dos operadores e a limpeza do local (TMSA, 2020).

- **Moegas Ferroviárias:** Destinadas ao descarregamento de vagões ferroviários, essas moegas permitem a movimentação de grandes volumes de granéis sólidos de forma eficiente. A descarga é realizada por meio de aberturas no fundo dos vagões, permitindo que o material seja despejado diretamente na moega. Assim, como nas moegas rodoviárias, é crucial a implementação de sistemas de aspiração para minimizar a emissão de poeira durante o processo de descarga, assegurando a conformidade com as normas ambientais e a segurança dos trabalhadores (TMSA, 2020).

A escolha entre moegas rodoviárias e/ou ferroviárias depende de diversos fatores, incluindo a infraestrutura disponível, o volume de carga a ser movimentado e a distância de transporte. O modal ferroviário é frequentemente preferido para longas distâncias e grandes volumes devido à sua eficiência e menor impacto ambiental. (ROCHA LOG, 2021).

O material recebido compõe o estoque do terminal graneleiro que passa a controlá-lo para evitar, tanto a falta de produto quanto a paralisação das operações por atingimento da capacidade máxima de armazenagem (MATTOZO, 2005b). Os principais meios para efetuar este controle, incluem:

- 1.1. **Monitoramento Contínuo dos Níveis de Estoque:** Sensores e sistemas de gestão permitem acompanhar em tempo real os volumes armazenados (SENIOR, 2024).
- 1.2. **Sincronização com a Programação de Navios:** O planejamento de chegada dos navios deve estar alinhado à disponibilidade de grãos nos armazéns, evitando tempos ociosos no embarque (SANDIN, 2023).
- 1.3. **Gestão da Capacidade dos Armazéns:** Os terminais possuem uma capacidade máxima de armazenagem, e o fluxo de recebimento precisa ser ajustado para evitar que os silos atinjam o limite, o que forçaria a interrupção das descargas (SILVA et.al, 2023).

Um outro objetivo para o controle de estoque é permitir a definição de estratégias que minimizam custos operacionais, como por exemplo, o tratamento de filas quando do recebimento rodoviário; a punição advinda da contratação na modalidade *Take or Pay* (MACEDO, 2022), entre outros.

A capacidade de recepção precisa estar alinhada com a capacidade de armazenagem, evitando sobrecargas e garantindo que os grãos sejam armazenados de acordo com sua classificação e destino final. Além disso, fatores como umidade e qualidade da carga devem ser monitorados continuamente, visto que afetam diretamente a conservação dos produtos. (MATTOZO, 2005b).

A expedição da carga é um dos principais desafios logísticos do terminal, pois envolve a sincronização entre o estoque disponível e as janelas de atracação dos navios. A programação dos embarques deve ser feita considerando a capacidade dos porões dos navios, a taxa de carregamento e as restrições operacionais do porto. Para evitar períodos de inatividade, é fundamental um planejamento detalhado que coordene o recebimento e a expedição, permitindo uma ocupação eficiente dos silos e minimizando custos de armazenagem. (MATTOZO, 2005b).



Logo, o planejamento de estoque em terminais graneleiros deve equilibrar a entrada e saída de cargas, minimizando gargalos e maximizando a eficiência operacional. A utilização de tecnologias de automação, aliados a uma gestão logística eficiente, é essencial para garantir um fluxo contínuo e seguro das operações, atendendo às exigências do mercado e otimizando o uso da infraestrutura disponível (SILVA, L. C. C.; LIMA, M. L. P.; COSTA, R. B. A, 2023).

Estudos indicam que a aplicação da programação linear em terminais portuários pode aumentar a eficiência, reduzir desperdícios e melhorar a previsibilidade do abastecimento das embarcações (OMOJU; EMENIKE; KALU, 2021). Citam-se as seguintes aplicações:

- **Balanceamento entre Recebimento e Embarque:** Modelos de programação linear podem otimizar o fluxo de entrada de cargas via rodovia e ferrovia, ajustando a operação conforme a demanda dos navios (MARTINS & COSTA, 2022).
- **Redução de Custos Operacionais:** O uso de algoritmos de otimização permite reduzir gastos com armazenagem excessiva e minimizar tempos ociosos dos equipamentos portuários (SILVA, C. P.; OLIVEIRA, D. F.; SANTOS, E. M., 2021).
- **Previsão e Simulação de Cenários:** A programação linear possibilita simular diferentes cenários operacionais, considerando variações na chegada de cargas e condições climáticas adversas (RAMOS & ALMEIDA, 2023).

O trabalho aqui apresentado objetiva utilizar a programação linear como ferramenta para planejar, através da busca pela otimização, o recebimento de cargas por vias terrestres sem que haja faltas ou excessos ao longo dos períodos em que, também, acontecem os embarques marítimos. Considerou-se, para tal, as características particulares de cada operação de descarga/embarque, bem como possíveis políticas internas para gestão do estoque.

Este artigo está organizado da seguinte forma: a Seção 1 dimensiona a produção e logística brasileiras de determinadas mercadorias agrícolas. Além disso, descreve os locais, as formas de operação, transporte e armazenagem dos produtos, informando sobre a relevância do planejamento na obtenção de melhores resultados e apresenta o objeto do estudo. A Seção 2 apresenta como os trabalhos se desenvolveram e quais ferramentas foram utilizadas. A Seção 3 discute os resultados obtidos baseando-se na análise dos dados. Por fim, a Seção 4 apresenta as conclusões e sugestões para pesquisas futuras.

2. DESENVOLVIMENTO

O presente trabalho abordou os itens 1.1 a 1.3 descritos na Seção 1, ao modelar através da programação linear (GOLDBARG, 2005), as condições de recebimento rodoferroviário e expedição de um terminal marítimo, dentro de alguns parâmetros operacionais.

Assim, desejou-se construir uma ferramenta que possibilite diversos estudos, dentre eles, o entendimento sobre qual é a quantidade mínima de composições ferroviárias ($y[t]$) necessárias ao atendimento horário de certa demanda ($C[t] \times \text{Navio}$), de forma concomitante ao recebimento rodoviário ($x[t]$) dentro do horizonte de planejamento adotado ($t= 1, 2..720$ horas) e, de um limite admissível.



São consideradas, as seguintes variáveis:

- $y(t)$ pertence ao conjunto binário $\{0, 1\}$: quantidade de composições ferroviárias;
- $x(t) \in \mathbb{Z}^+$: quantidade de veículos descarregados por hora;
- $E_i(t) \in \mathbb{R}^+$: quantidade de produto em estoque no início de cada hora;
- $E_f(t) \in \mathbb{R}^+$: quantidade de produto em estoque ao final de cada hora.

A função objetivo é dada por:

$$\text{F.O.:} \quad \text{Minimizar } \sum_{t=1}^{720} y(t) \quad (1)$$

No horizonte de planejamento abordado, $t=1..720$ (720 horas no mês) foi considerada a operação de 9 navios durante todo o tempo disponível, como é listado na Tabela 1 e que, também traz, para cada um deles, o intervalo considerado entre as chegadas consecutivas e o tempo de operação, baseando-se em uma produtividade distribuída normalmente com média igual a 876,18t/hora e, desvio padrão igual a 62,84t.

Tabela 1. Intervalos entre chegadas consecutivas e tempo de operação

Navio #	Intervalo (h)	Tempo de operação (h)
1	10	57
2	21	58
3	17	64
4	24	60
5	24	56
6	19	56
7	21	63
8	17	67
9	22	60
10	4	-

A Tabela 2 relaciona todos os parâmetros abordados na modelagem e quais são os valores adotados. Como se deseja testar o algoritmo em situações adversas, optou-se por atribuições, cálculos ou valores baseados em distribuições probabilísticas.

Nota-se que, os parâmetros Tam (quantidade de vagões existentes na composição ferroviária) e, VGH (produtividade bruta na descarga das composições ferroviárias) não são utilizados diretamente no modelo, contudo, os resultados da razão entre ambos (exato ou valor aproximado ao menor inteiro) são utilizados nas formas de: $\text{desc}_{\text{frac}}$ e desc_{int} , respectivamente.

Vale salientar que, se optou por este formato a fim de facilitar a visualização e manipulação a cada nova execução, da quantidade média de vagões entregues em cada composição (Tam) e, do desempenho esperado na descarga (VGH) pelo terminal portuário.



Tabela 2. Parâmetros utilizados no primeiro cenário de otimização

Parâmetro	Valor	Descrição
W0	25.000	Estoque inicial no instante t=1
minE	25.000	Estoque mínimo
maxE	75.000	Estoque máximo
PR	Normal (39,71; 8,96)	Peso em toneladas da carreta padrão
PV	Normal (90;5)	Peso em toneladas do vagão padrão
Tam	80	Quantidade de vagões existentes na composição ferroviária
VGH	9	Produtividade bruta da operação na descarga dos vagões por hora
Int	4	Intervalo médio entre chegadas sucessivas das composições
desc _{frac}	Tam/VGH	Tempo total, com fração de hora, necessário a descarga dos vagões
desc _{int}	floor(Tam/VGH)	Tempo total, arredondado para o menor inteiro, necessário a descarga dos vagões
Navio	Normal (876,18;62,84)	Produtividade bruta na operação de embarque do navio
maxRodoviarioh	Normal (16;2)	Quantidade descarregada de carretas por hora
Maxtrem	60	Número máximo de composições ferroviárias admitidas por mês
C (i)	vide tabela 1	Indicação da faixa horária em que há operação de embarque marítimo

Com relação ao transporte de grãos, é considerado que o vagão típico é o HFT (Hopper Fechado para Transporte de Grãos). Trata-se de um vagão fechado tipo hopper, projetado especialmente para o transporte de grãos agrícolas. Possui escotilhas superiores para carregamento e escotilhas inferiores para descarga gravitacional, protegendo a carga de intempéries (VALEC, 2018). A capacidade máxima de um vagão destes, como os que foram construídos pela Maxxion em 2003, é de 105t (CENTRO-OESTE BRASIL, 2010), então considera-se que, a variação do carregamento distribui-se normalmente e que o desvio padrão vale 5 pois, a média ou valor mais provável carregado (atribuído) é de 90t.

Quanto aos veículos rodoviários, considera-se que o transporte é realizado por bitrem, carreta 2 eixos, carreta 3 eixos e carreta cavalo trucado com respectivas capacidades de carga: 57t, 33t, 41.5t e 45t (HIVECLOUD, 2025). Da mesma maneira, atribui-se uma taxa de carregamento padrão para todos os veículos (90% da capacidade máxima) e tem-se o atendimento distribuído normalmente com igual probabilidade de acontecimento para qualquer um deles, logo, a média e desvio padrão são 39,71t e 8,96t, respectivamente.

Para a produtividade de berço, adotam-se como representativos a qualquer cenário, os valores de média e desvio padrão (876,18t e 62,84t, respectivamente) da amostra obtida pela consulta pública realizada na programação de navios do Terminal de Grãos do Maranhão (TEGRAM,2025), referente aos navios previstos a operar entre os dias 19/03/2025 e 19/04/2025 no berço 103 (como padrão de tempo não operacional, durante cada atracação, considerou-se 4h). Da mesma forma como nos casos anteriores, o comportamento desta grandeza é considerado igualmente distribuído.

Os valores para os demais parâmetros, iniciais e necessários ao modelo, são atribuídos dentre os intervalos pesquisados na literatura (SILVA, 2021) e, as equações de restrição (2) a (10), descritas a seguir (R1..R9), completam o algoritmo matemático:

R1: Estoque inicial no instante t = 1:

$$E_i(1) = W_0, t=1 \quad (2)$$



R2: Estoque final do instante $t = 1$:

$$Ef(1) = Ei(1) + PR * x(1) + PV * VGH * y(1) - C(1) * Navio, t=1 \quad (3)$$

R3: Estoque inicial no instante t é igual ao estoque final no instante $t-1$:

$$Ef(t-1) = Ei(t), t > 1 \quad (4)$$

R4: Estoque final para qualquer instante maior que 1 e garantia de atendimento de todos os vagões da composição:

$$Ef(t) = Ei(t) + PR * x(t) + \sum_{k=\max(1, t-desc_{int}+1)}^t PV * VGH * y(k) + \left\{ \begin{array}{l} (desc_{frac} - desc_{int}) * PV * VGH * y(t - desc_{int}), se t - desc_{int} \geq 1 - C(t)*Navio \\ 0, caso contrário \end{array} \right. \quad (5)$$

R5: Manutenção do intervalo mínimo (Int) entre operações ferroviárias sucessivas:

$$\sum_{t-Int-desc_{int}}^t y(t) \leq 1, t > Int + desc_{int} \quad (6)$$

R6: Condição de atendimento de uma única composição ferroviária ao mesmo tempo:

$$\sum_t^{t+desc_{int}-1} y(t) \leq 1, t \leq 720 - desc_{int} \quad (7)$$

R7: Limite máximo de composições ferroviárias admitidas no mês

$$\sum_{t=1}^t y(t) \leq Maxtrem, \forall t \quad (8)$$

R8: Quantidade máxima de veículos que podem ser descarregados em uma mesma hora

$$x(t) \leq maxRodoviarioroh, \forall t \quad (9)$$

R9: Quantidade final de produto em estoque, ao final de cada hora

$$minE \geq Ef(t) \geq maxE, \forall t \quad (10)$$



O modelo foi criado adotando-se A Modeling Language for Mathematical Programming (AMPL, 2003) e utilizando o solver de código aberto HiGHS. A execução aconteceu em um notebook ACER, com processador I7-11800H de 2.3GHz (base), 64GB de memória RAM e placa de vídeo GEFORCE GTX 1650 com 4GB de memória dedicada. O tempo necessário ao processamento, em qualquer corrida de simulação foi ínfimo (em torno de 6s).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A somatória dos tempos operacionais apresentados na Tabela 1 totalizam 541 horas. A quantidade total embarcada no mês (demanda a ser atendida) é obtida pelo produto desta somatória, pela taxa de embarque considerada na execução em questão (Navio).

Ao se buscar a quantidade mínima de composições ferroviárias necessárias ao atendimento da demanda, foram efetuadas 10 execuções a fim de verificar o comportamento do modelo em diferentes situações, alterando-se para tal, a cada execução, as premissas baseadas na distribuição Normal. Na execução, em AMPL, utilizou-se a ferramenta randseed com parâmetro igual a 0 (AMPL,2003).

Tabela 3. Resultados de simulação - minimização de composições ferroviárias

Minimizar $\sum_{t=1}^{720} y(t)$

Descrição	Unidade	Exec.#1	Exec.#2	Exec.#3	Exec.#4	Exec.#5	Exec.#6	Exec.#7	Exec.#8	Exec.#9	Exec.#10
Navio	t/h	924,52	934,62	755,70	975,95	925,35	845,43	935,44	845,86	885,07	928,95
PR	t	36,82	39,89	37,11	40,75	32,60	42,25	27,81	34,79	28,21	34,98
PV	t	93,78	82,95	95,90	99,30	84,78	89,60	96,07	90,97	86,69	92,17
Composições	un	11	8	9	5	12	0	17	9	29	14
Carretas	un	11.456	11.456	9.308	12.172	12.888	10.825	13.604	11.271	10.024	11.456

Como o modal ferroviário é mais eficiente frente ao rodoviário - menos poluente, maior capacidade de carga, mais seguro, entre outros – (MATTOZO, 2005a) testou-se o modelo quando da sua maximização perante a utilização das composições ferroviárias contudo, limitando-o a um máximo de 60 composições/mês (média de 2 por dia) condizente com as demais premissas de produtividade e intervalo entre composições. Vale também comentar que, para a entrega de uma nova composição de vagões em qualquer terminal, toda ou grande parte da composição anterior, quando vazia, deve primeiramente ser retirada devido as limitações de espaço existentes (SILVARES, 2023)

A Tabela 4, traz os resultados de 10 execuções (alterando-se a cada uma delas, as premissas baseadas na distribuição Normal), visando a maximização de utilização do modal ferroviário.

Tabela 4. Resultados de simulação - maximização de composições ferroviárias

Maximizar $\sum_{t=1}^{720} y(t)$

Descrição	Unidade	Exec.#1	Exec.#2	Exec.#3	Exec.#4	Exec.#5	Exec.#6	Exec.#7	Exec.#8	Exec.#9	Exec.#10
Navio	t/h	811,81	859,54	870,29	793,62	896,17	772,70	888,89	912,93	913,66	895,33
PR	t	39,61	48,86	49,29	44,47	61,52	30,11	28,31	37,22	26,25	29,46
PV	t	87,43	88,05	88,80	88,54	82,51	97,60	85,47	85,98	93,28	92,65
Composições	un	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56
Carretas	un	1.427	1.615	1.645	939	1.989	115	3.639	3.147	3.127	2.655



Em ambos os casos analisados, manteve-se em torno de 16 (média com desvio padrão igual a 2), o limite máximo para a descarga de carretas pois se considerou a existência de 2 moegas rodoviárias atuando paralelamente. A capacidade é variável e depende de diversos fatores, tais quais: retirada de amostra, pesagem, tipo de caminhão, capacidade de carga, imprevistos operacionais, etc, contudo, numa situação otimizada, o tempo unitário para descarga é em torno de 8min./caminhão (MEMÓRIA DO TRANSPORTE BRASILEIRO, 2024).

Em qualquer situação, o modelo busca atender a demanda combinando o recebimento rodoviário e ferroviário, modulando as quantidades entre si, efetuando compensações do volume transportado entre os modais a fim de atingir o objetivo em questão, respeitando os níveis de estoque desejados (minE, maxE) e demais restrições que devem, conforme necessidade, ser alteradas.

As Tabelas 3 e 4 apresentam de forma geral a flexibilidade do modelo atuando em diferentes condições conforme alteram-se os dados de entrada, porém também é interessante notar que, a ferramenta fornece a listagem horária (**Tabela 5**) com a evolução dos parâmetros e variáveis, como por exemplo, o nível dos estoques, a quantidade de veículos a serem descarregados e o horário de chegada das composições ferroviárias, que são informações imprescindíveis ao planejamento, tanto quanto outras que podem ser detalhadas, conforme necessário.

Tabela 5. Trecho da listagem horária obtida no AMPL

X	Y	Ei	Ef
13	0	25.000,0	25.384,4
13	0	25.384,4	25.768,9
13	0	25.768,9	26.153,3
13	0	26.153,3	26.537,8
13	0	26.537,8	26.922,2
13	0	26.922,2	27.306,7
13	0	27.306,7	27.691,1
13	0	27.691,1	28.075,6
13	0	28.075,6	28.460,0
13	0	28.460,0	28.844,5
13	1	28.844,5	29.173,3
13	0	29.173,3	29.502,2
13	0	29.502,2	29.831,0
13	0	29.831,0	30.159,9
13	0	30.159,9	30.488,7
13	0	30.488,7	30.817,6
13	0	30.817,6	31.146,4

4. CONCLUSÃO

Ainda que, o processo do recebimento à expedição de granéis sólidos por terminais portuários tenha sido tratado, neste trabalho, de forma genérica e com certa simplicidade, os resultados mostraram-se satisfatórios e úteis ao planejamento diário interno do terminal marítimo, bem como àquele que envolve entes externos (cooperativas, transportadoras, companhias ferroviárias, embarcadores, entre outros) ao oferecer uma visão de movimentação logística num horizonte de 30 dias, com detalhamento horário.



As paralisações (por responsabilidade da ferrovia ou do terminal) intrínsecas à operação estão incluídas nos parâmetros e, assim, o modelo também tem utilidade para prever um resultado/atingimento possível e, posteriormente, compara-lo ao realizado.

Trata-se de um modelo básico, porém flexível que se ajusta as variações dos dados de entrada e que pode ser regulado para melhores resultados e/ou customizado às necessidades de cada operador, acrescentando por exemplo, custos típicos de transporte em cada modal em virtude da distância da origem do carregamento e/ou tipo de veículo (no caso do modal rodoviário) e suas respectivas capacidades.

A simplicidade do conceito na construção do modelo (p.ex.: considerar a produtividade geral na descarga ferroviária sem a preocupação da quantidade de moegas e vagões descarregados simultaneamente) e a qualidade da ferramenta faz com que haja agilidade na realização de simulações de diversos cenários possibilitando aos gestores do terminal portuário, atualizar e reavaliar estratégias em tempo real (ainda durante qualquer operação).

Ao buscar a otimização, como foi realizado, seja ela minimizando ou maximizando a quantidade de atendimentos por este ou por aquele modal, poder-se-á entender quais gargalos surgirão impedindo a solução do problema e, assim, será possível buscar antecipadamente o devido tratamento para que se alcance o resultado desejado (p.ex.: reduzir o intervalo de tempo entre atendimentos sucessivos das composições ferroviárias; acrescer os níveis de produtividade no recebimento e expedição das cargas; apoiar a verificação da viabilidade/necessidade de investimentos no aumento da capacidade estática e conseqüente reflexo na capacidade dinâmica, etc).

Por fim, vale lembrar que as cargas oriundas de outros estados brasileiros, quando movimentadas por vias rodoviárias, passam por pátios reguladores que tem a função de controlar as filas nas vias de acesso ao porto, evitando transtornos urbanos e impactos ambientais, como aumento das emissões de poluentes. Além disso, esses pátios possibilitam um controle mais rigoroso dos horários de chegada e saída dos caminhões, sincronizando o fluxo logístico e evitando períodos de ociosidade nos terminais (PEREIRA, 2021). Contudo, entre transportadores e operadores portuários, há um acordo sobre o repasse do custo referente a permanência excedente nesses pátios, acontecida por exemplo, pelo demasiado atrasado na descarga programada, postergada por solicitação e/ou responsabilidade do terminal em situações de falta de espaço para armazenagem. Assim, a utilização de uma ferramenta como aqui proposto, possibilita reduzir os riscos da incidência, aos terminais portuários, de custos diretos e indiretos da operação.

5. REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES – ANTT. **Transporte de carga – origem destino – 2006 – janeiro 2025**. Brasília, 2025. Disponível em: <<https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/ferrovias/anuario-do-setor-ferroviario/arquivos-tabelas-excel/transporte-de-carga-origem-destino-2006-janeiro-2025.xlsx/view>>. Acesso em: 25 fev. 2025.

AMPL; FOURER, Robert; GAY, David M.; KERNIGHAN, Brian W. **AMPL: A modeling language for mathematical programming**. United States: Duxbury/Thomson, 2003.



AUTORIDADE PORTUÁRIA DE SANTOS – APS. **Estatísticas on-line (BI)**. Santos, 2025. Disponível em: <<https://www.portodesantos.com.br/informacoes-operacionais/estatisticas/>>. Acesso em: 25 fev. 2025.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL – BNDES. **Hub de projetos – setor portuário**. Brasília, 2020. Disponível em: <<https://hubdeprojetos.bndes.gov.br/pt/setores/Portos>>. Acesso em: 14 mar. 2025.

CENTRO-OESTE BRASIL. **Características de vagões**. 2010. Disponível em: <<http://vfco.brazilia.jor.br/vag/vagALL/hft.shtml>>. Acesso em: 16 mar. 2025.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Informações agropecuárias**. Brasília, 2025. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro>>. Acesso em: 13 mar. 2025.

CORREDOR LOGÍSTICA E INFRAESTRUTURA (CLI). **Relatório de Sustentabilidade 2024**. Salvador: CLI, 2024. Disponível em: https://cli-br.com/wp-content/uploads/2024/05/CLI_RELATORIO_SUSTENTABILIDADE_2024_bx.pdf. Acesso em: 16 abr. 2025.

GOLDBARG, Marco Cesar; LUNA, Henrique Pacca Loureiro. **Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005.

HIVECLOUD. **Tabela de capacidade de carga de caminhões: confira aqui**. 2025. Disponível em: <<https://www.hivecloud.com.br/post/tabela-de-capacidade-de-carga-de-caminhoes/>>. Acesso em: 16 mar. 2025.

MACEDO, Guilherme Gomes de Carvalho. **A cláusula take or pay e a onerosidade excessiva nos contratos de fornecimento de energia**. 2022. Dissertação (Mestrado em Direito) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br>>. Acesso em: 16 mar. 2025.

MARTINS, A. L.; COSTA, B. R. Modelos de programação linear para otimização do fluxo de cargas em terminais multimodais. **Revista de Logística e Transporte**, v. 15, n. 3, p. 45–60, 2022.

MATTOZO, João Geraldo Orzenn. **A gestão do armazenamento de granéis sólidos no Brasil**. Rio de Janeiro: Diretoria de Portos e Costas, 2005a. Disponível em: <<https://maxwell.vrac.puc-rio.br>>. Acesso em: 16 mar. 2025.

MATTOZO, João Geraldo Orzenn. **A gestão do armazenamento de granéis sólidos no Porto de Paranaguá**. 2005. Monografia (MBA em Portos e Logística Empresarial) – Universidade Católica de Santos, Santos, 2005b. Disponível em: https://www.marinha.mil.br/dpc/sites/www.marinha.mil.br/dpc/files/monografias/Gestao_Armazenamento_Graneis.pdf. Acesso em: 15 abr. 2025.

MEMÓRIA DO TRANSPORTE BRASILEIRO. **Descarga de soja**. 2024 Disponível em: <<https://memoriadotransporte.org.br/galeria/descarga-de-soja/>>. Acesso em: 16 mar. 2025.



MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA, COMÉRCIO E SERVIÇOS
– MDIC. **Estatísticas de comércio exterior em dados abertos**. Brasília, 2025.

Disponível em: <<https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/comercio-exterior/estatisticas/base-de-dados-bruta>>. Acesso em: 13 mar. 2025.

OMOJU, B.; EMENIKE, G. C.; KALU, I. E. A linear programming optimization approach to costs minimization in port terminal operations in Nigerian ports.

International Journal of Innovative Science and Research Technology, v. 6, n. 6, p. 1253–1259, jun. 2021. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/355741072_A_Linear_Programming_Optimization_Approach_to_Costs_Minimization_in_Port_Terminal_Operations_in_Nigerian_Ports. Acesso em: 15 abr. 2025.

PEREIRA, Newton Narciso. **Portos e terminais: do planejamento à operação**. 1. ed. Florianópolis: Conceito Atual, 2021.

RAMOS, F. G.; ALMEIDA, G. H. Simulação de cenários operacionais em terminais portuários utilizando programação linear. **Revista Brasileira de Pesquisa Operacional**, v. 39, n. 1, p. 89–105, 2023.

ROCHA LOG. **Granéis sólidos de exportação: como funciona o transporte?** 2021. Disponível em: <<https://rochalog.com.br>>. Acesso em: 16 mar. 2025.

SANDIN, Landrin Gonçalves de Oliveira Filho. **Otimização do processo de embarque de navios de grãos utilizando modelo de simulação: estudo de caso no complexo portuário do Itaquí**. 2023. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Naval) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2023. Disponível em: <<https://www.ppgenav.propesp.ufpa.br/ARQUIVOS/dissertacoes/2023/DISSERTA%203%87%C3%83O%20%28VERS%C3%83O%20FINAL%29-%20Landrin%20Sandin.pdf>>. Acesso em: 16 mar. 2025.

SENIOR SISTEMAS. **Sistema de gestão de estoque: eficiência e redução de custos**. Senior, 2024. Disponível em: <<https://www.senior.com.br/blog/sistema-de-gestao-de-estoque-logistica>>. Acesso em: 16 mar. 2025.

SILVA, A. et al. **Logística e gestão de terminais graneleiros**. São Paulo: Editora LogPort, 2023.

SILVA, C. P.; OLIVEIRA, D. F.; SANTOS, E. M. Aplicação de algoritmos de otimização na minimização de custos operacionais em portos brasileiros. **Journal of Operational Research**, v. 28, n. 2, p. 123–137, 2021.

SILVA, João F. **Logística e infraestrutura portuária: desafios e perspectivas para terminais graneleiros**. São Paulo: Editora Técnica, 2021.



SILVA, L. C. C.; LIMA, M. L. P.; COSTA, R. B. A armazenagem de grãos no Brasil: qual a melhor estratégia para os exportadores? **Revista de Economia e Agronegócio**, v. 17, n. 3, p. 456–478, 2023. Disponível em: <<https://periodicos.ufv.br/rea/article/view/7812>>. Acesso em: 16 mar. 2025.

SILVARES, Diesther; ROSA, Rodrigo Alvarenga. Planejamento das rotas de manobra dos lotes de vagões em pátios ferroviários visando a redução do tempo total de estadia. **Revista Transportes**, v. 31, n. 2, p. 155–166, 2023. Disponível em: <<https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/2921>>. Acesso em: 15 mar. 2025.

TERMINAL EXPORTADOR DE SANTOS – TES. **Informações técnicas**. 2025. Disponível em: <<https://www.tessantos.com.br/>>. Acesso em: 14 mar. 2025.

TMSA. **Aspiração em moegas de recebimento rodoviário ou ferroviário de produtos sólidos a granel**. 2020. Disponível em: <<https://tmsa.ind.br>>. Acesso em: 16 mar. 2025.

TERMINAL DE GRÃOS DO MARANHÃO – TEGRAM. **Lineup**. 2025. Disponível em: <<https://tegram.com.br/lineup/>>. Acesso em: 15 mar. 2025.

VALEC – ENGENHARIA, CONSTRUÇÕES E FERROVIAS S.A. **Manual técnico de vagões ferroviários**. Brasília: VALEC, 2018.

LINEAR PROGRAMMING APPLIED TO THE PLANNING OF WAGON RECEPTION AT PORT TERMINALS

ABSTRACT

In 2024, exports of soybeans, soybean meal, and corn accounted for approximately 161.43 million tons. At the Port of Santos—the largest in the country—about 53.72 million tons of this total were shipped, of which only 37.48 million tons were transported by rail, despite this mode offering greater efficiency, capacity, and sustainability. As a result, the port terminal receives a significant portion of what it dispatches via maritime transport through road freight. It must not only dynamically manage its stock levels but also meet commitments with various stakeholders involved in the operation, such as railway transport companies, road transport cooperatives, cargo shippers, among others. This study proposes to model, using linear programming and the AMPL language and platform, a basic monthly planning tool that aligns the reception of goods by both road and rail modes with vessel loading schedules and local stock policies. Based on ship berthing schedules, it becomes possible to estimate the need for receiving trucks from a regulatory yard, as well as rail compositions, considering—among other variables—the productivity and load capacity of each operation, in order to meet the projected demand. The objective is to reduce costs, minimize inefficiencies, and enhance the safety and continuity of operational activities.

Keywords: *Railway; Vessel Loading; Optimization; Grains; Port.*