



Modelo matemático para a otimização sustentável em um sistema pátio-porto de minério de ferro

Mathematical model for sustainable optimization in a iron ore stockyard-port system

Arthur Guilherme Siqueira da Silva¹, Flávio Lúcio Santos de Carvalho², Marcos Wagner Jesus Servare Junior^{3,*}

¹ Graduado em Engenharia de Produção pelo Centro Universitário Salesiano – UniSales, Vitória, ES, Brasil

² Professor do Centro Universitário Salesiano – UniSales, Vitória, ES, Brasil

³ Professor do Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo – Ufes, campus São Mateus, ES, Brasil

*Autor para correspondência, E-mail: marcos.servare@ufes.br

Received: 07 May 2025 | Accepted: 25 July 2025 | Published online: 03 August 2025

Resumo: Este artigo aborda o crescente avanço em direção a práticas sustentáveis nas cadeias de suprimentos, impulsionado por exigências regulatórias e pela crescente conscientização dos consumidores. Nesse contexto, a alocação eficiente de pilhas de minério de ferro e a otimização de recursos assumem papel central no desempenho operacional dos portos. Além dos desafios operacionais, a gestão da cadeia de suprimentos incorpora agora considerações ambientais relevantes, com destaque para o controle das emissões de gás carbônico (CO₂), o que evidencia a urgência da adoção de práticas sustentáveis. Diante desse cenário, o gerenciamento logístico é formulado como um problema de otimização multiobjetivo, cujo objetivo é satisfazer a demanda, aumentar a competitividade e reduzir os impactos ambientais. A principal contribuição deste trabalho é a proposição de um modelo matemático para a alocação e carregamento de minério de ferro em sistemas pátio-porto, com ênfase na minimização das emissões de gases de efeito estufa (GEE). Os experimentos computacionais demonstram a eficácia do modelo até a instância 14; contudo, a instância 15 apresenta limitações que sugerem a necessidade de abordagens complementares. Conclui-se que o modelo proposto é uma ferramenta relevante para a tomada de decisão em cadeias de suprimentos portuárias, reforçando a importância da sustentabilidade e delineando caminhos promissores para investigações futuras.

Palavras-chave: cadeia de suprimentos sustentável; gases de efeito estufa (GEE); sistema pátio-porto; logística portuária; modelo matemático.

Abstract: This paper addresses the growing shift toward sustainable practices in supply chains, driven by regulatory pressures and increasing consumer awareness. In this context, efficient iron ore stockpile allocation and resource optimization become critical to the operational performance of ports. Beyond operational challenges, supply chain management now encompasses significant environmental concerns, particularly the control of CO₂ emissions, underscoring the urgent need for sustainable practices. Within this complex landscape, logistics management is framed as a multi-objective optimization problem aimed at meeting demand, enhancing competitiveness, and minimizing environmental impacts. The core contribution of this study is the development of a mathematical model for the allocation and loading of iron ore in yard-port systems, with a specific focus on minimizing greenhouse gas (GHG) emissions. Computational experiments validate the model's effectiveness up to instance 14, while instance 15 highlights limitations that indicate the need for alternative approaches. In conclusion, the proposed model serves as a valuable decision-support tool in port supply chains, emphasizing sustainability as a key strategic factor and pointing toward future research directions.

Keywords: sustainable supply chain; greenhouse gas emissions (GHG); stockyard-port system; port logistics; mathematical model.

1 Introdução

A cadeia de suprimentos portuária representa um elo fundamental na logística brasileira, especialmente na exportação de *commodities* como o minério de ferro. Em 2022, os portos nacionais movimentaram cerca de 361 milhões de toneladas desse insumo, gerando um faturamento aproximado de R\$ 135,5 bilhões (ANTAQ, 2022), especificamente, em maio de 2025 a região sudeste do Brasil apresentou um crescimento de quase 10 milhões de toneladas em um único mês se comparado com o mesmo período do ano anterior, saindo de 4,7 milhões de toneladas para 14,3 milhões de toneladas (Brasil, 2025). Essa expressiva movimentação reforça o papel estratégico dos terminais portuários e, em particular, dos pátios de estocagem, cuja função é coordenar a recepção, alocação e o carregamento do minério de ferro com eficiência e segurança.

O planejamento das operações nesses pátios é um problema complexo, que envolve restrições físicas, prioridades de embarque, janelas temporais e trajetos internos percorridos por equipamentos como carregadoras e empilhadeiras (Servare Junior et al., 2018). Além das exigências tradicionais de produtividade, o setor portuário enfrenta uma crescente pressão para reduzir o impacto ambiental de suas atividades logísticas. Diretrizes internacionais, como o Acordo de Paris, têm impulsionado empresas e governos a adotar práticas sustentáveis que limitem a emissão de gases de efeito estufa (GEE), o que torna a sustentabilidade uma dimensão essencial na tomada de decisão operacional (Kazancoglu et al., 2020; Zhu et al., 2008).

Na literatura, são recorrentes os estudos sobre alocação e carregamento em ambientes logísticos com diferentes enfoques. Modelos de *Stockyard Planning Problem* (SPP) com múltiplas pilhas de armazenagem, prioridades de navios, sequenciamento de carregamento e movimentação interna dos equipamentos foram explorados por autores como Savelsbergh e Smith (2014), Xiao et al. (2021), Servare Junior et al. (2019) e Pereira et al. (2022). No entanto, poucos trabalhos incorporam explicitamente critérios ambientais, como a minimização de emissões de GEE, na formulação desses problemas. Essa lacuna representa uma oportunidade relevante de pesquisa, especialmente considerando o impacto ambiental das decisões operacionais na cadeia logística mineral.

Dessa forma, o objetivo desse artigo é propor um modelo matemático de otimização para o problema de alocação e carregamento de minério de ferro em pátios portuários, com foco na sustentabilidade. O modelo visa minimizar as emissões de GEE associadas aos deslocamentos internos de equipamentos, respeitando as restrições operacionais do sistema e as janelas de carregamento dos navios. Ao adotar uma função objetivo ambientalmente orientada, o modelo contribui para decisões logísticas mais alinhadas às metas globais de descarbonização e à competitividade sustentável do setor mineral-portuário.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta o referencial teórico sobre os problemas de alocação e carregamento com ênfase na sustentabilidade; a Seção 3 descreve formalmente o problema abordado e o modelo matemático proposto; a Seção 4 apresenta as instâncias computacionais e os resultados obtidos; por fim, a Seção 5 discute as principais conclusões e direções para pesquisas futuras.

2 Revisão de literatura

Com o aumento das preocupações globais em relação à sustentabilidade e aos impactos ambientais causados pelo transporte de passageiros e mercadorias, *stakeholders* têm sido pressionados a incorporar aspectos socioambientais nas estratégias e iniciativas do setor logístico. De acordo com Chang e Qin (2009), tais preocupações consolidaram o conceito de Logística Verde, que envolve a adoção de medidas destinadas à mitigação dos impactos ambientais oriundos das atividades logísticas.

McKinnon et al. (2010) destacaram que empresas ao redor do mundo vêm buscando promover credenciais ambientais positivas por meio da gestão logística, refletindo uma tendência de integração entre eficiência operacional e responsabilidade ambiental. Belov et al. (2014) propuseram um modelo baseado em Programação por Restrições para otimizar o planejamento do pátio de estocagem, considerando aspectos como a programação de recuperadores e a chegada de navios. O modelo demonstrou ganhos relevantes na eficiência do sistema portuário. Em continuidade, Belov et al. (2015) expandiram o estudo com o uso de uma abordagem de busca em grandes vizinhanças, reforçando os ganhos operacionais obtidos com o modelo anterior.

Por sua vez, Nurjanni et al. (2017) identificaram uma lacuna relevante na literatura quanto à modelagem matemática de cadeias de suprimentos ecológicas. Os autores ressaltaram a ausência, até então, de estudos que tratassem redes *closed loop* por meio de modelos multiobjetivo que incorporassem simultaneamente os custos totais e as emissões de CO₂. Zubedi et al. (2018) argumentaram que o

desenvolvimento sustentável deve orientar investimentos em tecnologias de baixo consumo energético e priorizar fontes renováveis. Os autores alertaram que a redistribuição de investimentos estrangeiros pode deslocar os riscos ambientais para países receptores, comprometendo a sustentabilidade local.

Marinot et al. (2018) desenvolveram um modelo de programação linear inteira mista para integrar o problema de alocação de berços (*Berth Allocation Problem*) com o problema de programação de projetos com restrições de múltiplos recursos (*Multi-mode Resource Constrained Project Scheduling Problem*). Aplicado a um porto capixaba, o modelo buscou reduzir o tempo de permanência dos navios, destacando o comprimento do cais como variável crítica. Já Rupolo e Mantovani (2018) propuseram uma metodologia para o planejamento integrado de redes de distribuição de energia elétrica de média e baixa tensão, considerando a incorporação de fontes renováveis. Os resultados mostraram que a geração distribuída pode contribuir significativamente para a redução das emissões de gases poluentes, além de melhorar o desempenho técnico e econômico da rede.

Tautenhain e Nascimento (2019) realizaram uma revisão sistemática sobre a aplicação de modelos e métodos de otimização multiobjetivo na gestão sustentável de cadeias de suprimentos. A pesquisa apontou que a maioria dos modelos desconsidera a incerteza dos sistemas, o que pode estar relacionado à alta complexidade computacional envolvida em sua modelagem. Oliveira Junior et al. (2019) analisaram o aproveitamento de excedentes de energia por autoprodutores industriais, como os do setor siderúrgico, demonstrando sua viabilidade como estratégia complementar à gestão energética convencional.

Servare Junior et al. (2019) propuseram um modelo matemático para o sistema de armazenamento de minério de ferro em pátios portuários, com o objetivo de maximizar a quantidade de navios atendidos. O estudo contribuiu para a melhoria do desempenho logístico ao garantir o carregamento com a quantidade e qualidade exigidas, no menor tempo possível. Servare Junior et al. (2020) analisaram a influência do planejamento da alocação em forma pilhas de minério de ferro e do sequenciamento de uso de recursos no custo energético total do manuseio de grãos sólidos em pátios portuários. O estudo evidencia que o uso estratégico da energia, aliado ao planejamento detalhado das operações, é essencial para a redução de custos operacionais.

Xiao et al. (2021) investigaram a cadeia de suprimentos da remanufatura de aço, considerando a redução de emissões como uma restrição no cálculo do custo ótimo do sistema. Os resultados mostram que as emissões de transporte estão associadas ao volume de compras, enquanto as emissões industriais variam com a qualidade das matérias-primas e os métodos de produção utilizados. Silva e Silva (2021) avaliaram os impactos da manufatura avançada sob a ótica da produção sustentável e propuseram um modelo de *green flow shop scheduling*. O modelo visa minimizar o consumo energético nas operações fabris, ao mesmo tempo em que melhora a eficiência produtiva.

Branco et al. (2023) reforçaram a importância da Logística Verde como estratégia fundamental para mitigar os impactos ambientais do setor logístico. Os autores enfatizaram que o desempenho energético e a emissão de CO₂ são determinantes na construção de sistemas de transporte mais eficientes e sustentáveis. Por fim, Servare Junior et al. (2024) avançaram na investigação do uso estratégico da energia em operações portuárias, propondo modelos que integram planejamento energético à otimização logística, contribuindo para um sistema mais sustentável e economicamente viável.

Desse modo, com o intuito de proporcionar uma visão voltada para características de cada problema discutido nessa seção é proposta uma codificação para as principais características utilizadas na classificação dos artigos, sendo elas:

- Função objetivo: Contém a principal informação, no qual os autores desejam Minimizar (Mi) ou Maximizar (Ma) o objetivo geral determinado.
- Critério: Utilizado para determinar se o artigo analisado aborda aspectos Econômicos (Ec) ou Sustentáveis (S).
- Definição do problema: Apresenta o problema em foco, categorizado como Planejamento (P), Emissão de gases poluentes (E), Logística verde (Lv), Cadeia de suprimentos (Cs) e Impactos ambientais (Im).
- Setor: Indica o segmento em que o trabalho está situado, incluindo Logística de transportes (LTr), Logística Portuária (LP) e Indústria (I).
- Técnicas para solução: Nesta seção os artigos foram classificados de acordo com o tipo de programação matemática utilizada, tais quais, Programação Estocástica Mista Inteira (SMIP), Programação Linear Inteira Mista (MILP), Programação Não Linear Inteira Mista (MINLP) e Programação Linear (PL).

Com isso, as principais características dos artigos, relacionadas aos impactos ambientais gerados pela programação da produção, são resumidamente apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Resumo dos artigos conforme codificação definida.

Artigo	Definição do problema	Objetivo	Sector	Critério	Técnica de solução
Chang e Qin (2009)	Lv; P; Im	Mi	LTr	S	-
Belov et al. (2014)	Cs; P	Mi	LPo	Ec	SMIP
Belov et al. (2015)	Cs; P	Mi	LPo	Ec	SMIP
Oliveira Junior et al. (2016)	P	Mi	I	Ec	MILP
Nurjanni et al. (2017)	Cs; Im	Mi	I	S; Ec	MILP
Marinot et al. (2018)	P	Mi	LTr	Ec	MILP
Rupolo e Mantovani (2018)	P	Mi	-	Ec	MINLP
Zubedi et al. (2018)	E; Im	-	LTr	S; Ec	-
Tautenhain e Nascimento (2019)	Cs; P; Im	Mi; Ma	I	Ec	-
Servare Junior et al. (2019)	Cs; P	Mi	LPo	Ec	MILP
Servare Junior et al. (2020)	Cs; P	Mi	LPo	Ec	MILP
Xiao et al. (2021)	E; P	Mi	I	S; Ec	PL
Silva e Silva (2021)	P; Im	Mi; Ma	I	S	MILP
Branco et al. (2023)	E	Mi	LTr	S	-
Servare Junior et al. (2024)	P; E	Mi	LPo	S; Ec	MINLP

Diante desses aspectos, percebe-se que as organizações estão pressionadas a considerar toda a cadeia de suprimentos a fim de torná-la mais sustentável, sem comprometer sua competitividade. Nesse sentido, esse problema é categorizado como uma otimização objetivo, exigindo a utilização da modelagem matemática para planejar os fluxos ao longo das etapas da cadeia de suprimentos, suprindo a demanda e maximizando a competitividade econômica, enquanto se minimizam as emissões de GEE.

3 Modelo matemático

O caso simulado será desenvolvido com base na quantidade de equipamentos disponíveis em uma empresa do setor de mineração, de modo a refletir uma situação real. Dessa forma, no sistema pátio-porto neste trabalho, o minério de ferro é transportado por um conjunto de rotas, interligando os terminais de descarga (recepção) com viradoras, pátios de estocagem e berços de navios. O minério de ferro sai das minas para os terminais de descarga (viradoras), situados na recepção do sistema pátio-porto, por meio de ferrovias. Nesses terminais de descarga, os vagões descarregam seu conteúdo em correias transportadoras para conduzir esse material até as empilhadeiras. Estas máquinas depositam o minério de ferro em pilhas localizadas em diferentes posições do pátio para armazenamento, conforme mostrado na Figura 1.

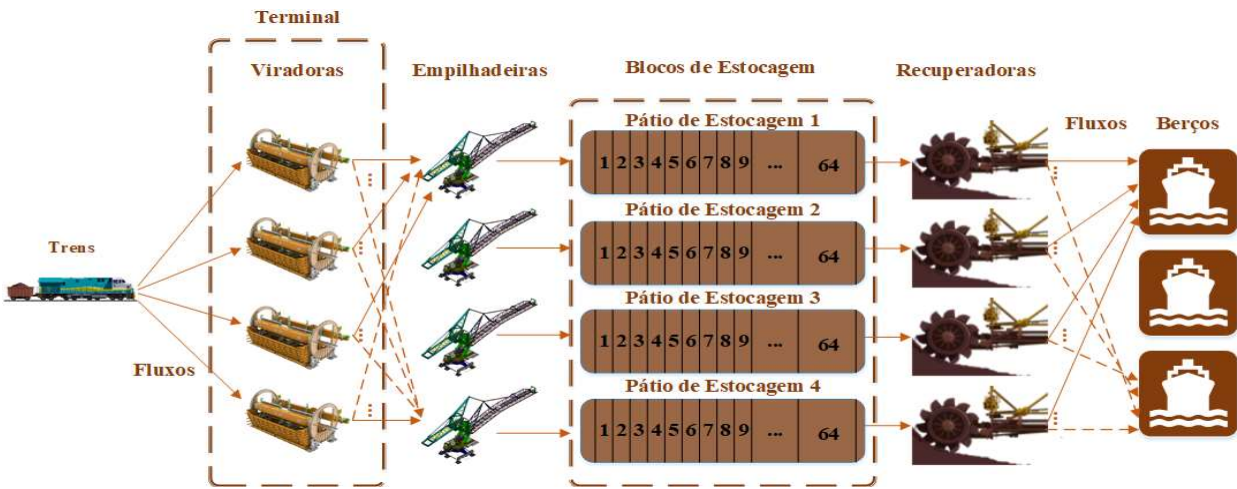


Figura 1. Layout do pátio simulado. Fonte: Adaptado de Servare Junior et al. (2019).

Dessa forma, o caso simulado será desenvolvido com base na quantidade de equipamentos disponíveis em uma empresa do setor de mineração, de modo a refletir uma situação real. Conforme Figura 1, o sistema de pátios tem início em quatro terminais de descarga, responsáveis pela recepção da matéria-prima proveniente das minas, a qual é transportada por meio de linhas férreas. Ao chegar aos terminais, os lotes

de minério de ferro são encaminhados, por esteiras transportadoras, às empilhadeiras, que realizam o empilhamento do material no pátio de estocagem.

A área de estocagem é subdividida em sessenta e quatro posições específicas para a alocação das pilhas de minério de ferro, conforme ilustrado na Figura 1. A formação de todas as pilhas destinadas ao carregamento de um único navio pode demandar vários dias. Para a expedição, uma pilha é recuperada por uma recuperadora do tipo roda de caçambas, que direciona o minério de ferro diretamente para os navios.

O pátio é composto por quatro terminais de descarga (estações de despejo), quatro áreas de estocagem, quatro empilhadeiras, quatro recuperadoras e três berços destinados ao atracamento de navios. As empilhadeiras operam em todos os terminais de descarga e pátios de estocagem, enquanto as recuperadoras são restritas às áreas de estocagem. Ambos os equipamentos possuem mobilidade para atender diferentes posições e pilhas de estocagem dentro dos pátios, respeitando uma distância mínima de segurança a fim de evitar colisões durante as operações.

Para fins de modelagem, considera-se um único tipo de minério de ferro ao longo de todo o processo, desconsiderando variações na qualidade do produto. Após a solicitação de um pedido, os fluxos logísticos são definidos e os trens são despachados com os lotes (ou vagões) de minério de ferro para os terminais de descarga. Uma vez descarregados, os lotes são transportados para as empilhadeiras, que realizam o empilhamento nos pátios de estocagem, onde permanecem até o momento da atracação do navio.

Para um conjunto específico de navios que chegam ao porto, é necessário alocar os primeiros aos respectivos berços de atracação, observando-se o horário estimado de chegada previamente estabelecido. Após a atracação, inicia-se o processo de recuperação das pilhas de minério de ferro. O tempo necessário para o carregamento do navio é diretamente proporcional à quantidade de pilhas recuperadas.

O modelo matemático proposto neste trabalho e apresentado pelas Eq. (1) à Eq. (15) é adaptado para logística verde a partir do modelo proposto Servare Junior et al. (2019) a partir da minimização da emissão de GEE com a utilização dos equipamentos para movimentação do minério de ferro.

$$\min Z = \sum_{n \in N} \sum_{f \in F} E n_n X_f^n + Et \left(\sum_{a \in A} \sum_{b \in B} P_{ab} + \sum_{b \in B} \sum_{c \in C} Q_{bc} + \sum_{c \in C} \sum_{d \in D} R_{cd} + \sum_{d \in D} \sum_{c \in C} S_{dc} + \sum_{c \in C} \sum_{f \in F} T_{cf} \right) \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{b \in B} P_{ab} \leq Prod_a \quad \forall \quad a \in A \quad (2)$$

$$\sum_{c \in C} Q_{bc} \leq Capv_b \quad \forall \quad b \in B \quad (3)$$

$$\sum_{d \in D} R_{cd} \leq Cape_c \quad \forall \quad c \in C \quad (4)$$

$$\sum_{d \in D} S_{dc} \leq Capr_c \quad \forall \quad c \in C \quad (5)$$

$$\sum_{f \in F} T_{cf} \leq Capb_f \quad \forall \quad f \in F \quad (6)$$

$$R_{cd} \leq Capp_{cd} \quad \forall \quad c \in C, \quad \forall \quad d \in D \quad (7)$$

$$\sum_{a \in A} P_{ab} = \sum_{c \in C} Q_{bc} \quad \forall \quad b \in B \quad (8)$$

$$\sum_{b \in B} Q_{bc} = \sum_{d \in D} R_{cd} \quad \forall \quad c \in C \quad (9)$$

$$R_{cd} \leq S_{dc} \quad \forall \quad c \in C, \quad \forall \quad d \in D \quad (10)$$

$$\sum_{d \in D} S_{dc} = \sum_{f \in F} T_{cf} \quad \forall \quad c \in C \quad (11)$$

$$\sum_{c \in C} T_{cf} = \sum_{n \in N} D_n X_f^n \quad \forall \quad f \in F \quad (12)$$

$$\sum_{f \in F} X_f^n = 1 \quad \forall \quad n \in N \quad (13)$$

$$X_f^n \in \{0,1\} \quad \forall \quad n \in N, \quad \forall \quad f \in F \quad (14)$$

$$P_{ab}, Q_{bc}, R_{cd}, S_{dc}, T_{cf} \quad \forall a \in A, \forall b \in B, \forall c \in C, \forall d \in D, \forall f \in F \quad (15)$$

sendo A o conjunto de minas, B o conjunto de viradoras, C o conjunto de empilhadeiras, pátios e recuperadoras, D o conjunto de pilhas de minério de ferro, F o conjunto de berços e N o conjunto de navios. A demanda do navio $n \in N$ é dada por D_n . A capacidade de produção da mina $a \in A$ é representada por $Prod_a$, enquanto $Capv_b$ corresponde à capacidade da viradora $b \in B$. As capacidades da empilhadeira e da recuperadora do pátio $c \in C$ são indicadas, respectivamente, por $Cape_c$ e $Capr_c$. A capacidade da pilha $d \in D$, localizada no pátio $c \in C$, é indicada por Cap_{cd} , e a capacidade do berço $f \in F$ é dada por $Capb_f$. O parâmetro En_n refere-se à emissão de gases de efeito estufa associada ao atendimento do navio n , enquanto Et representa a emissão de gases de efeito estufa resultante do transporte do minério de ferro. Além disso, as variáveis de decisão incluem X_f^n , que assume valor 1 caso o navio n seja atendido no berço f , e 0 caso contrário; P_{ab} , que representa a quantidade de minério de ferro (em toneladas) transportada da mina a para a viradora b ; Q_{bc} , correspondente à quantidade transportada da viradora b para o pátio ou empilhadeira c ; R_{cd} , que representa a quantidade transportada da empilhadeira/pátio c para a pilha d ; S_{dc} , que indica a quantidade transportada da pilha d para a recuperadora do pátio c ; e T_{cf} , que representa a quantidade transportada da recuperadora do pátio c para o berço f .

Com isso, a função objetivo representada pela Eq. (1) minimiza a quantidade de emissões de CO_2 na atmosfera através de calcular a quantidade de gases efeito estufa para transportar o minério de ferro e atender o navio. O conjunto de restrições indicados na Eq. (2) garante que tudo que é enviado de uma mina ao sistema seja menor que a capacidade produtiva desta mina. Já a Eq. (3) define que toda a carga transportada da viradora para uma empilhadeira não ultrapasse a capacidade de processamento suportada pela viradora, de maneira semelhante, as restrições representadas nas Eq. (4) à Eq. (7) impedem que sejam transportados além das capacidades da empilhadeira, recuperadora, berços e pilhas de minério de ferro de cada pátio, respectivamente.

O conjunto de restrições apresentados nas Eq. (8) à Eq. (11) garante que todo o fluxo que chega a um equipamento seja igual ao que sai dele, para viradora, empilhadeira, pilha de cada pátio e recuperadora, respectivamente. A restrição definida pela Eq. (12) assegura que o material transportado seja para abastecer cada navio que tem sua demanda atendida em cada berço. A restrição apresentada pela Eq. (13) garante que um navio só pode ser atendido por no máximo um berço. Por fim, as restrições relacionadas ao domínio e natureza das variáveis de decisão do modelo matemático proposto são observadas nas Eq. (14) e Eq. (15).

4 Experimentos computacionais

Para realizar a verificação e validação do modelo proposto neste estudo, conduzimos experimentos computacionais utilizando o *solver* comercial CPLEX 12.6 (IBM, 2013). Dado que não era possível fornecer valores reais para observar o comportamento real dos cenários, foram utilizados valores aleatórios para determinar a demanda de cada navio e criar instâncias simuladas. Os experimentos foram conduzidos em um computador equipado com um processador Intel Core i3 de 2,20 GHz e 4 GB de memória RAM.

A escolha dos valores máximos e mínimos foi realizada por meio de uma distribuição uniforme aleatória para a atribuição dos parâmetros, contemplando todos os parâmetros em cada instância examinada neste estudo, conforme Tabela 2. Essas instâncias foram definidas considerando o tamanho do problema, onde a escala exerce uma influência direta. À medida que a quantidade de equipamentos e as opções de navios e berços de atracação são aumentadas, sugere-se um aumento na complexidade, servindo como um ponto de avaliação para determinar a viabilidade contínua da metodologia até certo limite.

Com isso, foram criados 15 cenários diferentes para realizar uma análise do comportamento a partir do aumento do número de conjuntos declarados. Assim, três grupos de instâncias foram produzidos de acordo com o número de participantes em cada cenário. O primeiro grupo inclui as instâncias 1-5, com uma quantidade pequena de personagens para cada tipo de instalação, aumentando essa quantidade nas instâncias 6-10 e, ainda mais, nas instâncias 11-15. A Tabela 3 apresenta as instâncias de teste.

Tabela 2. Intervalo de valores para os parâmetros do problema. Fonte: Adaptado de Servare Junior et al. (2019).

Parâmetro	Mínimo	Máximo
Demanda	92	320
Capacidade do berço	10.000	20.000
Capacidade de recuperação	3.500	6.000
Capacidade de empilhamento	2.500	6.000
Capacidade da pilha	1.000	2.000
Capacidade do virador	4.000	6.000
Capacidade da mina	100.000	200.000
Emissão de gás de efeito estufa para atender o navio	2.6	2.6
Emissão de gás de efeito estufa transportar o minério de ferro	2.6	2.6

Tabela 3. Instâncias utilizadas para validação do modelo matemático.

Instância	A	B	C	D	F	N
1	1	1	8	1	1	10
2	1	2	8	1	1	10
3	1	4	8	1	1	10
4	1	5	8	1	1	10
5	1	5	10	1	1	10
6	2	8	8	10	2	10
7	2	10	10	15	2	10
8	2	10	10	25	2	10
9	2	10	10	25	2	15
10	2	10	10	30	2	15
11	2	15	15	50	3	15
12	2	15	15	60	3	15
13	2	20	20	60	4	15
14	3	20	20	70	4	15
15	5	25	25	80	5	20

A partir dessa análise e considerando as expressões definidas pelas Eq. (1) à Eq. (15), foram utilizadas as informações contidas nas Tabelas 3 e 4 para criação do modelo matemático. Para tanto, foi desenvolvido um código na linguagem de programação Python para que os dados fossem gerados, o modelo escrito no formato que o CPLEX (IBM 2013) realize a sua leitura e, por fim, pudesse realizar a otimização de cada um dos cenários. Por fim, na Tabela 4 encontram-se os resultados computacionais da implementação das instâncias, com o esforço computacional medido em segundos ou fração de segundo, para que o solver CPLEX indicasse a solução ótima (Função Objetivo – FO) para a instância em questão.

Tabela 4. Resultados da implementação das Instâncias para validação do modelo matemático.

Instância	FO (em ton de CO ₂)	Tempo (s)
1	25.610,00	0,17
2	54.704,00	0,13
3	102.362,00	0,46
4	127.946,00	0,12
5	127.946,00	0,16
6	204.698,00	0,36
7	255.866,00	0,19
8	255.866,00	0,24
9	375.606,00	0,37
10	375.606,00	0,50
11	563.394,00	0,35
12	563.394,00	0,45
13	751.159,00	0,40
14	869.999,00	0,42
15	-	1,32*

* O CPLEX parou por falta de memória.

No âmbito deste estudo, optou-se por uma abordagem matemática para enfrentar desafios no planejamento de navios, utilizando o CPLEX (IBM, 2013) nas instâncias 1 a 14, alcançando uma solução ótima em um horizonte de planejamento restrito.

Apesar da eficácia do modelo, especialmente diante da limitação de navios e capacidade de equipamentos, foram identificados desafios ao lidar com a instância 15. Nesse contexto, o *solver* comercial não conseguiu encontrar uma solução devido à limitação de memória. Diante desse obstáculo, recomenda-se explorar alternativas, como a utilização de máquinas mais robustas ou a adaptação de técnicas alternativas para enfrentar esse desafio, não apenas na instância 15, mas também em situações mais complexas no futuro.

É crucial observar que, em cenários reais com um horizonte de planejamento mais abrangente e um número maior de navios, a abordagem matemática ainda se configura como uma ferramenta valiosa. Contudo, a adaptação contínua e a consideração de soluções alternativas são essenciais para enfrentar os desafios emergentes em contextos mais complexos.

O crescimento da função objetivo em cada conjunto de instâncias decorre do aumento de fornecedores e da demanda dos clientes, além de uma maior conectividade entre as instalações. No entanto, destaca-se uma observação significativa nas instâncias 2, 4 e 7, onde o tempo de resolução do modelo diminuía à medida que os conjuntos B e C se aproximavam ou igualavam ao conjunto D. Além disso, nota-se que, ao ampliar o conjunto F, o modelo apresentava uma solução ótima de maneira mais eficiente.

5 Conclusões

Diante das crescentes exigências regulatórias e da conscientização ambiental dos consumidores, torna-se essencial que as cadeias de suprimentos, especialmente as do setor portuário, alinhem eficiência operacional à sustentabilidade. Este estudo contribui com esse cenário ao propor um modelo de programação inteira mista voltado ao planejamento sustentável de sistemas pátio-porto de graneis sólidos. A seguir, destacam-se os principais avanços obtidos:

- a) Proposição de um modelo matemático original que considera simultaneamente os aspectos operacionais e ambientais da cadeia de suprimentos pátio-porto, com foco na alocação e carregamento de minério de ferro;
- b) Incorporação da quantificação das emissões de CO₂ ao modelo de otimização, elemento inédito em estudos sobre alocação de pilhas de armazenagem no contexto portuário, o que confere uma perspectiva sustentável à tomada de decisão logística;
- c) Avaliação de desempenho computacional por meio de diferentes instâncias, demonstrando que a técnica exata utilizada (CPLEX 12.6) é eficiente para problemas de pequena e média escala, mas enfrenta limitações em instâncias maiores, indicando oportunidades para o uso de métodos heurísticos e metaheurísticos;
- d) Identificação de oportunidades para pesquisas futuras, como a consideração das distâncias percorridas pelos equipamentos e a análise de tipos de combustíveis utilizados, visando aprimorar a estimativa das emissões e ampliar o realismo do modelo.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Centro Universitário Salesiano pelo financiamento desta pesquisa através do Programa Institucional de Iniciação Científica do UniSales.

Referências bibliográficas

Agência Nacional de Transportes Aquaviários. (2022) ‘Painel Estatístico Aquaviário’ [Relatório]. ANTAQ. Disponível em: <https://web3.antaq.gov.br/ea/sense/index.html#pt> (accessed: 09 September 2023).

Belov, G, Boland, N, Savelsbergh, MWP and Stuckey, PJ (2014) ‘Local search for a cargo assembly planning problem’, in *Integration of AI and OR Techniques in Constraint Programming*. Springer International Publishing, pp. 159–175.

Belov, G, Boland, N, Savelsbergh, MWP and Stuckey, PJ (2015) ‘Local search for a cargo assembly planning problem’, in *Integration of AI and OR Techniques in Constraint Programming*. Springer International Publishing, pp. 159–175. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1504.00445>.

Branco, JEH, Bartholomeu, DB, Alves Junior, PN and Caixeta Filho, JV (2023) ‘Ações e políticas para redução da emissão de CO₂ no transporte de cargas do Brasil’, *TRANSPORTES*, 31(2), e2415. <https://doi.org/10.58922/transportes.v31i2.2415>.

Brasil (2025) ‘Com destaque para soja, minério e petróleo, portos do Sudeste movimentaram 60 milhões de toneladas em maio’. Disponível em: <https://www.gov.br/portos-e-aeroportos/pt-br/assuntos/noticias/2025/07/com-destaque-para-soja-minerio-e-petroleo-portos-do-sudeste-movimentaram-60-milhoes-de-toneladas-em-maio> (accessed: 24 July 2025).

Chang, Q and Qin, R (2009) ‘Analysis on Development Path of Tianjin Green Logistics’, *International Journal of Business and Management*, [e-journal], no. 3. <https://doi.org/10.5539/ijbm.v3n9p96>.

IBM (2013) IBM ILOG CPLEX Optimization Studio, Version 12.6.0.0. Armonk, NY: IBM Corporation.

Kazancoglu, Y, Sagnak, M, Kayikci, Y and Mangla, SK (2020) ‘Operational Excellence in a Green Supply Chain for Environmental Management: a Case Study’, *Business Strategy and the Environment*, [e-journal], no. 29, pp. 1532–1547. <https://doi.org/10.1002/bse.2451>.

Marinot, PP, Rosa, R, Neves, BS and Rodrigues, ALMV (2018) ‘Modelo Matemático para Planejamento da Fila de Navios Integrado à Alocação de Recursos do Porto’, in *Anais do Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, Rio de Janeiro. Campinas: Galoá. <https://proceedings.science/sbpo/sbpo-2018/trabalhos/modelo-matematico-para-planejamento-da-fila-de-navios-integrado-a-alocacao-de-re?lang=pt-br> (accessed: 09 March 2025).

McKinnon, A (2010) ‘Green logistics: the carbon agenda’, *Electronic Scientific Journal of Logistics*, 6(3).

Nurjanni, KP, Carvalho, MS and Costa, L (2017) ‘Green supply chain design: A mathematical modeling approach based on a multi-objective optimization model’, *International Journal of Production Economics*, 183(Part B), pp. 421–432. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.08.028>.

Oliveira Junior, VB, Pena, JGC and Salles, JLF (2016) ‘An improved plant-wide multiperiod optimization model of a byproduct gas supply system in the iron and steel-making process’, *Applied Energy*, [e-journal], 164, pp. 462–474. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.043>.

Rupolo, D and Mantovani, JRS (2018) ‘Planejamento integrado de sistemas de distribuição de MT/BT, com fontes de geração de energia renováveis e controle de emissões de gases poluentes’, in *Anais do Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, Rio de Janeiro. Campinas: Galoá. <https://proceedings.science/sbpo/sbpo-2018/trabalhos/planejamento-integrado-de-sistemas-de-distribuicao-de-mtbt-com-fontes-de-geracao?lang=pt-br> (accessed: 10 March 2025).

Servare Junior, MWJS, Rocha, H and Salles, JLF (2019) ‘Modelo matemático multi-produtos para planejamento de alocação de pilha de minério’, in *Anais do LI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, Limeira, SP. Campinas: Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional. <https://proceedings.science/sbpo/sbpo-2019/trabalhos/modelo-matematico-multi-produtos-para-planejamento-de-alocacao-de-pilha-de-miner?lang=pt-br> (accessed: 31 March 2025). <https://doi.org/10.59254/sbpo-2019-106881>.

Servare Junior, MWJ, Rocha, H, Salles, J and Perron, S (2020) ‘A Linear Relaxation-Based Heuristic for Iron Ore Stockyard Energy Planning’, *Energies*, [e-journal], 13, 5232. <https://doi.org/10.3390/en13195232>.

Servare Junior, MWJ, Rocha, HRO and Salles, JLF (2024) ‘A smart energy scheduling under uncertainties of an iron ore stockyard-port system using a rolling horizon algorithm’, *Computers & Operations Research*, [e-journal], 106518. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2023.106518>.

Silva, VA and Silva, MVAO (2021) ‘Green Flow Shop Scheduling Problem: Uma Revisão com Foco na Produção Sustentável’, in *Anais do Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP)*. https://doi.org/10.14488/enegep2021_tn_sto_356_1835_42892.

Tautenhain, CPS and Nascimento, M (2019) ‘Modelos e métodos para otimização de cadeias de suprimentos sustentáveis’, in *Anais do LI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, Limeira, SP. Campinas: Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional. <https://proceedings.science/sbpo/sbpo2019/trabalhos/modelos-e-metodos-paraotimizacao-de-cadeias-de-suprimentossustentaveis?lang=pt-br> (accessed: 31 March 2025).

Xiao, LZG, Chen, X and Yang, W (2021) ‘Research on Carbon Emissions Reduction of Iron and Steel Remanufacturing Industry Supply Chain’, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, [e-journal], 647, 012153. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/647/1/012153>.

Zhu, Q, Sarkis, J and Lai, K (2008) ‘Confirmation of a measurement model for green supply chain management practices implementation’, *International Journal of Production Economics*, [e-journal], 111(2), pp. 261–273. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2006.11.029>.

Zubedi, A, Jianqiu, Z, Ali, Q, Memon, I, Khan, S, Khan, MS and Zhang, Y (2018) ‘Sustaining low-carbon emission development: An energy efficient transportation plan for CPEC’, *Journal of Information Processing Systems*, [e-journal], 14, pp. 322–345. <https://doi.org/10.3745/JIPS.04.0067>.