



## Modelagem matemática para gestão energética de um sistema pátio-porto de granéis sólidos

### *Mathematical modeling for energy management of a solid bulk stockyard-port system*

Jeidson Lamborghini Coradi<sup>1,\*</sup>, Bruno dos Santos Moreira<sup>2</sup>, Marcos Wagner Jesus Servare Junior<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Aluno do Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo – Ufes, campus São Mateus, ES, Brasil

<sup>2</sup> Aluno do Curso de Ciência da Computação, Universidade Federal do Espírito Santo – Ufes, campus São Mateus, ES, Brasil

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

\*Autor para correspondência, E-mail: jeidsoncoradi@gmail.com

Received: 09 July 2025 | Accepted: 01 August 2025 | Published online: 03 August 2025

**Resumo:** À medida que o consumo energético se intensifica e as estratégias das indústrias precisam estar cada vez mais alinhadas ao novo cenário energético mundial, tem-se impulsionado o desenvolvimento de trabalhos voltados à eficiência energética integrada, à eficiência operacional e à sustentabilidade ambiental. Este estudo propõe uma modelagem matemática do fluxo energético em um sistema pátio-porto de granéis sólidos. Com base em um modelo existente do fluxo de material nesse sistema, este trabalho incorpora coeficientes de custo energético associados às cargas movimentadas por equipamentos como viradoras, empilhadeiras e recuperadoras, respeitando restrições de capacidade e assegurando o balanceamento do fluxo no sistema. O modelo foi testado computacionalmente por meio de faixas de valores aleatórios e cinco grupos de instâncias, utilizando o software comercial CPLEX, demonstrando potencial para apoiar a tomada de decisões com foco energético em operações portuárias. A proposta permite a adaptação a diferentes cenários, contribuindo para o desenvolvimento de cadeias logísticas mais eficientes e sustentáveis.

**Palavras-chave:** gestão energética; sistema pátio-porto; granéis sólidos; modelagem matemática; otimização logística.

**Abstract:** As energy consumption intensifies and industrial strategies increasingly need to align with the new global energy landscape, there has been a growing emphasis on developing approaches that integrate energy efficiency with operational efficiency and environmental sustainability. This study proposes a mathematical model for the energy flow in a solid bulk yard-port system. Based on an existing model of material flow in this system, the present work incorporates energy cost coefficients associated with the loads handled by equipment such as dumpers, stackers, and reclaimers, while respecting capacity constraints and ensuring flow balance within the system. The model was computationally tested using randomly generated value ranges and five groups of instances with the commercial software CPLEX, demonstrating its potential to support energy-focused decision-making in port operations. The proposed model allows adaptation to different scenarios, contributing to the development of more efficient and sustainable logistics chains.

**Keywords:** energy management; yard-port system; solid bulk; mathematical modelling; logistics optimization.

## 1. Introdução

No cenário de distribuição de matérias-primas, tais como grânéis sólidos, desde a sua aquisição do produto até o destino, é necessário que haja uma decisão estratégica, permitindo que o planejamento seja positivamente refletido na indústria global desta matéria-prima.

Baseado nisso, elucida-se o contexto do pátio de estocagem, que é um elo importante na cadeia logística, que por vezes pode ser evidenciado quando se trata do gargalo operacional, que impacta diretamente a performance do sistema logística no geral (Servare Junior et al., 2020). Nesse sentido o planejamento da alocação das pilhas em um sistema pátio-porto influencia diretamente na eficiência logística da cadeia de suprimentos, e o seu custo total está diretamente relacionada com o esforço energético das operações.

Além disso, a energia necessária para movimentação no sistema pátio-porto pode ter diferentes origens, podendo ser fornecida pela rede elétrica convencional ou adquirida de produtores independentes, cujos preços variam diariamente, exigindo uma gestão estratégica do consumo (Silva et al., 2020).

Em países em que se observa a principalmente fonte de energia baseada em recursos hídricos, como o Brasil, é necessário levar em relevância a preocupação quanto à escassez de chuvas, que eleva imediatamente os preços das tarifas energéticas e, como consequência, a elevação dos custos de produção e perdas econômicas (Soares et al., 2020).

Com isso, nota-se que a intensificação da demanda energética global traz consigo uma discussão ampla que faz parte das estratégias das indústrias, não apenas do ponto de vista da otimização de custos, mas também como estratégia para conquistar mais espaços no mercado global (Karaszewski, 2022).

Um gerenciamento eficiente dos recursos desempenha um papel importante no planejamento energético, uma vez que, por vezes a centralização do fornecimento desse recurso torna o gerenciamento ineficiente. Nesse modelo tradicional, a energia é majoritariamente fornecida por grandes geradores conectadas à rede elétrica principal, o que limita a flexibilidade das empresas quanto à gestão do consumo.

Desta forma, o fornecimento energético não acompanha as reais demandas da indústria, o que impede a adoção de estratégias mais dinâmicas, como a escolha de fornecedores alternativos com tarifas mais competitivas ou o uso de fontes renováveis locais (Fardin et al., 2018). Assim, um caminho estratégico alternativo é descentralizar o fornecimento energético, permitindo uma gestão mais controlável, o que favorece a redução dos custos por meio da compra de energia elétrica de produtos alternativos, incluindo geradores renováveis independentes (Khalaf e Wang, 2018) e autoprodutores industriais (De Oliveira et al., 2016), além de facilitar armazenamento de energia, como em baterias, para ser utilizada em tempos de custos elevados (Rocha et al., 2021; Fiorotti et al., 2023a; Fiorotti et al., 2023b).

Sabe-se de outras estratégias que podem ser abordadas a fim de reduzir o consumo energético da cadeia de suprimentos, aqui estão alguns trabalhos que foram analisados e que evidenciam diversas abordagens: Fernandes et al. (2022) discutem a programação da produção com foco em períodos de menor demanda energética; os usos de sistemas de monitoramento baseado em Internet of Things para medir o consumo energético em tempo real (Labaran e Masood, 2023); uma proposta de integração entre a produção logística para otimização das rotas (Beheshtinia e Fathi, 2023); e o uso de algoritmos inteligentes de agendamento energético inteligente em sistema de manufatura (Gao et al., 2020).

Tais estratégias têm sido importantes para serem discutidas e adotadas no contexto da Indústria 4.0, em que se caracterizam pela integração de tecnologias digitais avançadas aos processos industriais e à cadeia de suprimentos (Meng et al., 2018). Dessa forma, os métodos de otimização também têm sido formas estratégicas utilizadas para otimizar fatores energéticos em sistemas logísticos e industriais, sobretudo em contextos em que múltiplas variáveis e restrições envolvidas (Rébillé e Richerfort, 2014).

Diante disso, este artigo tem como objetivo propor um modelo matemático para otimização energética em sistemas pátio-porto de grânéis sólidos, integrando novas variáveis logísticas ao modelo, como a movimentação interna de carga e a quantidade de embarcações atendidas por período.

O artigo está estruturado em 6 seções, após a introdução é realizada uma revisão de literatura na seção 2, seguida pela descrição do problema de pesquisa na seção 3. Na sequência, a seção 4 apresenta os resultados dos experimentos computacionais realizados e, por fim, a seção 5 são realizadas as considerações finais e, na sequência, as referências utilizadas neste trabalho.

## 2. Revisão bibliográfica

A adequada gestão de pátios portuários é reconhecida como um fator necessário para garantir o desempenho global de sistemas logísticos, promovendo um equilíbrio estratégico entre a maximização da

eficiência operacional e a minimização dos custos energéticos. Diante de um cenário em que a otimização energética faz parte de estratégias logísticas a fim de buscar novos mercados e equilibrar com seus custos operacionais, estudos que buscam estudar esses cenários ganham relevância. Nesse contexto, modelos matemáticos e técnicas de otimização têm se destacado como ferramentas promissoras para apoiar a tomada de decisão em ambientes complexos e dinâmicos, como os sistemas pátio-porto de graneis sólidos.

Assim, esta seção apresenta uma revisão da literatura científica com o objetivo de identificar e analisar os principais avanços relacionados à integração entre eficiência energética e planejamento operacional em terminais portuários. A revisão contempla trabalhos apresentados na Tabela 1, que tratam do agendamento de equipamentos, da alocação de recursos e do gerenciamento energético, abrangendo desde soluções baseadas em programação inteira mista (MILP) por exemplo até abordagens heurísticas e metaheurísticas aplicadas a terminais de contêineres, portos híbridos e sistemas automatizados. Esses trabalhos podem ser avaliados quanto aos autores, título, quantidade de citações e o periódico em que foram publicados. Isso auxilia a identificar os trabalhos mais relevantes que podem ser utilizados para avanços científicos

A análise dos estudos selecionados contribui não apenas para evidenciar as abordagens já consolidadas, mas também para identificar lacunas e oportunidades de pesquisa que fundamentam a proposta deste trabalho: o desenvolvimento de um modelo matemático voltado à otimização energética de sistemas pátio-porto de graneis sólidos, integrando variáveis operacionais e de consumo energético.

Tabela 1. Portfólio bibliográfico.

(continua)				
Item	Autores	Título	Citações	Periódico
1	He et al. (2015a)	<i>Yard crane scheduling in a container terminal for the trade-off between efficiency and energy consumption</i>	169	<i>Advanced Engineering Informatics</i>
2	He et al. (2015b)	<i>Integrated internal truck, yard crane and quay crane scheduling in a container terminal considering energy consumption</i>	219	<i>Expert Systems With Applications</i>
3	Yang; Zhu; Haghani, (2019)	<i>Multiple equipment integrated scheduling and storage space allocation in rail–water intermodal container terminals considering energy efficiency</i>	38	<i>Transportation Research Record</i>
4	Iris e Lam (2021)	<i>Optimal energy management and operations planning in seaports with smart grid while harnessing renewable energy under uncertainty</i>	135	<i>Omega-International Journal Of Management Science</i>
5	Zhang et al. (2022)	<i>Optimal port microgrid scheduling incorporating onshore power supply and berth allocation under uncertainty</i>	62	<i>Applied Energy</i>
6	Wang; Zhu, (2019)	<i>Container loading optimization in rail-truck intermodal terminals considering energy consumption</i>	29	<i>Sustainability</i>
7	Li et al. (2022)	<i>Multiobjective scheduling for cooperative operation of multiple gantry cranes in railway area of container terminal</i>	7	<i>Ieee Access</i>
8	Hong et al. (2023)	<i>The integrated scheduling optimization for container handling by using driverless electric truck in automated container terminal</i>	16	<i>Sustainability</i>

Tabela 1. Portfólio bibliográfico.

(continuação)				
Item	Autores	Título	Citações	Periódico
9	Zhong et al. (2023)	<i>Energy-aware integrated scheduling for container terminals with conflict-free agvs</i>	13	<i>Journal Of Systems Science And Systems Engineering</i>
10	Li et al. (2023)	<i>A decomposition-based optimization method for integrated vehicle charging and operation scheduling in automated container terminals under fast charging technology</i>	13	<i>Transportation Research Part E- Logistics And Transportation Review</i>
11	Li (2023)	<i>A heuristic algorithm for equipment scheduling at an automated container terminal with multi-size containers</i>	3	<i>Archives Of Transport</i>
12	Cai et al. (2024)	<i>Incorporation of energy-consumption optimization into multi-objective and robust port multi-equipment integrated scheduling</i>	6	<i>Transportation Research Part C- Emerging Technologies</i>
13	Wang et al. (2024)	<i>Integrated energy management and operations planning in oil-electric hybrid container terminals considering multi-energy supply</i>	4	<i>Advanced Engineering Informatics</i>
14	Zhen et al. (2024)	<i>Integrated planning model for two-story container ports</i>	3	<i>Transportation Research Part C- Emerging Technologies</i>
15	Servare Junior; Rocha; Salles, (2024)	<i>A smart energy scheduling under uncertainties of an iron ore stockyard-port system using a rolling horizon algorithm</i>	0	<i>Computers &amp; Operations Research</i>

As Tabelas 2 e 3 demonstram as contribuições dos trabalhos quanto aos equipamentos consumidores de energia que foram analisados pelos trabalhos, o tipo de carga de pátio e carga movimentada no sistema portuário, o tipo de programação que foram estabelecidas para encontrar a solução e os métodos de solução.

Tabela 2. Características operacionais dos trabalhos avaliados no portfólio bibliográfico.

(continua)				
Item	Autor	Equipamentos	Tipo de pátio	Categoria
1	He et al. (2015a)	GCs, GPs, CAIs	Terminal de Contêineres	Contêiner convencional
2	He et al. (2015b)	GPs	Terminal de Contêineres	Contêiner convencional
3	Yang; Zhu; Haghani, (2019)	GPs, GPTs, VEAs	Terminal intermodal de contêineres	Contêiner intermodal
4	Iris e Lam (2021)	GCs, GPs, CR, CI, GCsconf	Terminal de Contêineres Refrigerados	Contêiner especializado
5	Zhang et al. (2022)	NA, GCs, GPs, SAE	Terminal de Contêineres	Contêiner convencional
6	Cai et al. (2024)	GCs, VIs, GPs	Terminal de Contêineres	Contêiner convencional

Tabela 2. Características operacionais dos trabalhos avaliados no portfólio bibliográfico.

(continuação)				
Item	Autor	Equipamentos	Tipo de pátio	Categoria
7	Wang; Zhu, (2019)	GPTs	Terminal intermodal de contêineres	Contêiner intermodal
8	Li et al. (2022)	GCs, CA	Terminal intermodal de Contêineres	Contêiner intermodal
9	Hong et al. (2023)	GCDTs, VGAs, GPTs	Terminal de contêineres	Contêiner convencional
10	Zhong et al. (2023)	GPs, VGAs	Terminal de contêineres	Contêiner convencional
11	Li et al. (2023)	VGAs	Terminal Automatizado de Contêineres	Contêiner convencional
12	Li (2023)	GCs, GPs, VEAs, CAEs	Terminal de Contêiner Automatizado Terra-Marítimo	Contêiner automatizado
13	Wang et al. (2024)	NA, GCs, GPs, CE/CDs	Terminais híbridos óleo-elétrico	Contêiner híbrido
14	Zhen et al. (2024)	GCTTs	Terminais de dois andares	Contêiner especializado
15	Servare Junior; Rocha; Salles, (2024)	RCs	Pátio de Estocagem	Minério a granel

A Tabela 3 se torna importante porque é onde conseguimos enxergar quais as modelagens que têm sido mais relevantes quando os métodos de solução e as inovações propostas por esses trabalhos. Isso torna a proposta desse trabalho relevante, fazendo com que haja uma projeção melhor sob futuros trabalhos explorados através dessas perspectivas.

Tabela 3. Modelagens matemáticas e métodos de solução dos trabalhos avaliados.

(continua)				
Item	Autor	Modelagem	Objetivo	Método de solução
1	He et al. (2015a)	PIM	Minimizar o atraso dos navios e o consumo de energia de transporte	GA+PSO
2	He et al. (2015b)	PIM	Minimizar atraso e consumo energético	GA+PSO
3	Yang; Zhu; Haghani, (2019)	PIEAE	Minimizar manuseio de contêineres e consumo energético (GPs, VGAs)	GA
4	Iris e Lam (2021)	PLIM	Minimizar custos operacionais portuários e consumo energético (GCs, GPs, AGVs)	-
5	Zhang et al. (2022)	PLIM	Minimizar consumo energético e emissões de CO <sub>2</sub>	-
6	Cai et al. (2024)	PIM	Minimizar energia em movimento e repouso (VGAs, GPs)	AGNS - II
7	Wang; Zhu, (2019)	PIM	Maximizar eficiência energética e eficiência logística	GA
8	Li et al. (2022)	PIM	Minimizar consumo energético	ABC
9	Hong et al. (2023)	PNILM	Minimizar consumo energético total	GA , EA. RS+GA
10	Zhong et al. (2023)	PIM	Minimizar consumo energético (VGAs e GPs)	BGA

Tabela 3. Modelagens matemáticas e métodos de solução dos trabalhos avaliados.

(continuação)

Item	Autor	Modelagem	Objetivo	Método de solução
11	Li et al. (2023)	PIM	Minimizar o custo energético dos VGAs	ADI
12	Li (2023)	PIM	Minimizar consumo energético dos GCs, VEAs e GPs	GA
13	Wang et al. (2024)	PLIM	Minimizar custo de energia (compra de eletricidade, hidrogênio)	ALNS + Gurobi
14	Zhen et al. (2024)	PLIM	Maximizar uso de energia renovável para minimizar custos operacionais	CSNS
15	Servare Junior, Rocha e Salles, (2024)	PNILM	Minimizar custos com eletricidade	RH

A literatura analisada demonstra avanços significativos no campo do agendamento de equipamentos portuários, com foco particular na conciliação entre eficiência operacional e consumo energético.

He et al. (2015a) propõem um modelo de agendamento exclusivo para guindastes de pátio, cujo objetivo é minimizar simultaneamente o atraso nas tarefas e o consumo energético. O problema é formulado como um Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows (VRPSTW), um tipo de modelagem inovadora para esse contexto, que permite representar o roteamento dos guindastes com flexibilidade temporal. Para solucioná-lo, os autores empregam uma abordagem híbrida baseada em simulação, combinando algoritmos genéticos com otimização por enxame de partículas. Os resultados indicam que é possível alcançar reduções relevantes no consumo energético com sacrifícios mínimos em eficiência, evidenciando a existência de trade-offs vantajosos entre esses dois objetivos.

Já em um segundo trabalho, He et al. (2015b) complementam com uma abordagem mais abrangente: em vez de tratar apenas os guindastes de pátio, os autores integram o agendamento de três equipamentos essenciais em terminais de contêineres: guindastes de cais, caminhões internos e guindastes de pátio. O modelo proposto é formulado por meio de programação inteira mista, incorporando uma rede de tarefas interdependentes que representa a complexidade operacional dos terminais. A abordagem de solução segue uma lógica semelhante à do primeiro estudo, com uma análise híbrida GA+PSO acoplada à simulação. Contudo, o desafio aqui é evidentemente maior, pois requer a coordenação simultânea dos três equipamentos para garantir o fluxo contínuo de operações sem desperdício energético.

Observa-se nos trabalhos citados anteriormente que, ao se integrar os diferentes equipamentos operacionais do terminal, atinge-se uma maior significância no modelo proposto. Essa abordagem integrada se mostra mais vantajosa por refletir de forma mais realista a interdependência das operações no contexto portuário.

Yang et al. (2019) propõem um modelo de otimização biobjetivo para o agendamento integrado de equipamentos e alocação de espaço de armazenamento em terminais intermodais ferro-fluviais, com foco na eficiência operacional e energética. Os autores utilizam um algoritmo genético heurístico; o estudo minimiza simultaneamente o tempo total de operação e o consumo de energia. Essa abordagem considera a interação entre guindastes sobre trilhos, veículos de elevação automatizados e guindastes de pátio. Os resultados computacionais demonstram a eficácia do modelo tanto em problemas de pequena quanto de grande escala, destacando-se como uma contribuição inovadora na integração de eficiência energética em decisões operacionais de terminais intermodais.

Wang e Zhu (2019) estudam um modelo de otimização também em terminais intermodais. No estudo, os autores consideram a operação do guindaste pórtico sobre trilho sob três condições: (I) operando no carregamento, (II) em movimento vazio e (III) em operação de recolocação, e assim avaliam o consumo energético do equipamento, podendo tomar decisões baseadas em um cenário mais realístico.

Li et al. (2022) propõem um modelo de escalonamento cooperativo multiobjetivo para a operação de múltiplos guindastes pórticos em terminais intermodais ferroviários. O diferencial deste trabalho reside na introdução da estratégia *Conflict-Free Hybrid Indirect loading/unloading* (CFHI), que incorpora caminhões como elementos estratégicos para evitar conflitos operacionais entre guindastes. Essa solução híbrida permite reduzir significativamente os tempos de deslocamento vazios, os conflitos de trajeto e, conseqüentemente, o consumo total de energia dos equipamentos envolvidos. O modelo é formulado como um problema de programação inteira mista e resolvido por meio de um algoritmo evolutivo artificial, o

EMOABC (*Effective Multi-Objective Artificial Bee Colony*), ou seja, o uso de entropia de correlação difusa permite ao algoritmo avaliar melhor a qualidade das soluções, mesmo em cenários incertos ou complexos, e com isso identificar de forma mais eficiente um conjunto diverso e equilibrado de soluções ótimas que representam diferentes formas de equilibrar tempo e energia.

Iris e Lam (2021) focam no gerenciamento da energia consumida e suprida, considerando diferentes esquemas de precificação de energia e o comércio bidirecional de energia entre fontes (como rede elétrica, fontes renováveis e sistemas de armazenamento). Eles propõem uma modelagem MILP que alia planejamento operacional e gestão energética sob incertezas.

Zhang et al. (2022) também inserem nas suas restrições a demanda energética dos navios atracados, demonstrando como estes também podem ser integrados a sistemas energéticos locais por meio de *microgrids*. Diferentemente das *smart grids*, que operam em redes amplas com múltiplas fontes e consumidores, as *microgrids* aplicadas aos navios priorizam a autonomia energética e a coordenação com o fornecimento terrestre (*onshore power supply*). Assim, embora os enfoques variem, ambos os trabalhos convergem ao destacar a integração da eletrificação do navio atracado aos equipamentos do porto.

Na comparação entre os trabalhos de Hong et al. (2023) e Zhong et al. (2023), observa-se uma diferença fundamental quanto à tecnologia adotada para o transporte horizontal de contêineres em terminais automatizados. Enquanto Zhong et al. (2023) focam nos veículos guiados automaticamente (VGAs), abordando detalhadamente desafios operacionais como conflitos de rota e limitação de buffers, Hong et al. (2023) propõem uma solução mais moderna ao integrar VGAs a guindastes de pátio nas restrições sob quatro condições: VGAs carregados, vazios, em espera e os guindastes em espera. Assim, embora ambos os trabalhos compartilhem o objetivo de otimizar o desempenho energético, Hong et al. apresentam uma evolução mais eficiente ao tornar o modelo mais próximo da realidade.

Li et al. (2023) também discutem sobre veículos guiados automaticamente em terminais portuários. Eles apresentam um modelo de programação inteira mista que integra o agendamento de carregamento de veículos e o agendamento de operações em terminais de contêineres automatizados, a fim de minimizar os custos de carregamento e os custos de penalidade associados ao tempo de operação. Assim, a contribuição deles é notória ao reconhecer que o agendamento do carregamento interfere diretamente na eficiência do terminal, algo não considerado por Zhong et al. (2023).

Já Li (2023) traz um modelo de programação inteira mista para otimizar o tempo de conclusão das operações e o consumo de energia em terminais de contêineres automatizados que operam com cargas de tamanhos variados (20 e 40 pés). O autor considera a integração de vários recursos operacionais, como guindastes de cais, veículos autônomos e guindastes de pátio, com o objetivo de minimizar o tempo total de operação e o consumo de energia. Devido à complexidade do problema, classificado como NP-difícil, o modelo é resolvido por meio de um algoritmo heurístico baseado em um algoritmo genético aprimorado. Esse algoritmo incorpora estratégias específicas, como o agrupamento de contêineres menores para transporte conjunto, buscando eficiência tanto no tempo quanto no uso de energia. Resultados experimentais demonstram que o método proposto é eficaz em diferentes configurações operacionais, indicando sua aplicabilidade prática em terminais automatizados.

Cai et al. (2024) se destacam porque, além de pensar na otimização de energia, inovam ao se preocupar com a robustez, ou seja, com a capacidade do plano funcionar bem mesmo quando as coisas saem do esperado. Para isso, criam o *Anti-cascade Effect and Robustness Evaluation Index* (AEREI), um índice que avalia o risco de atrasos em uma tarefa causarem atrasos em outra. Esse índice ajuda o sistema a montar planos diante das incertezas nos tempos de operação dos equipamentos. O algoritmo também é ajustado para evitar soluções frágeis. Esse trabalho tenta garantir que o plano funcione de verdade na prática, mesmo com imprevistos, o que torna o modelo muito mais útil no dia a dia dos portos.

Wang et al. (2024) apresentam contribuições relevantes ao explorar o desafio da transição energética em terminais de contêineres híbridos, caracterizados pelo uso simultâneo de equipamentos movidos a óleo e eletricidade. Mediante a formulação de um modelo de programação inteira mista e o desenvolvimento do algoritmo AGH (*Adaptive Large Neighborhood Search + Gurobi Heuristic*), os autores propõem uma solução integrada que alia o planejamento operacional à gestão eficiente de um sistema multi-energético. Os resultados dos experimentos computacionais evidenciam que o AGH supera métodos tradicionais, como o uso isolado do solver Gurobi, principalmente em cenários de larga escala, tanto em tempo computacional quanto na qualidade das soluções obtidas.

Zhen et al. (2024) desenvolvem um modelo integrado de otimização para portos de contêineres de dois andares, incorporando restrições energéticas baseadas em energia solar. A infraestrutura do porto inclui painéis solares no telhado, usados como fonte primária para alimentar guindastes e operações portuárias. O modelo matemático considera a geração de energia variável ao longo do dia, limitando o uso

simultâneo de guindastes conforme a disponibilidade energética. O trabalho apresenta uma formulação baseada em programação estocástica de dois estágios, considerando incertezas no tempo de chegada dos navios e volume de contêineres. Os resultados mostram que a restrição de carga total por turno garante que o consumo energético não ultrapasse a produção solar. O modelo promove o uso eficiente de recursos sustentáveis e contribui para o conceito de portos verdes, com redução de até 25,63% nos custos operacionais.

Servare Junior, Rocha e Salles (2024) apresentam contribuições ao sistema pátio-porto de minério de ferro. Nesse trabalho, os autores realizam um planejamento energético em tempo real de um sistema porto-pátio para minério de ferro, enfrentando incertezas operacionais e múltiplos fornecedores de energia. O modelo é formulado como um problema de programação inteira não linear mista (MINLP), refletindo a complexidade do fluxo simultâneo de materiais e energia. Dada a dificuldade de resolver o modelo diretamente, os autores propõem uma heurística baseada em algoritmo de horizonte de rolagem (*rolling horizon algorithm*). Esse método permite replanejamentos sucessivos com base em dados atualizados, adequando-se a ambientes com alta variabilidade. Além disso, a formulação é convertida em um modelo MILP equivalente sempre que possível para reduzir a complexidade computacional. Os resultados mostram reduções significativas de custo energético e demonstram a viabilidade do algoritmo em aplicações de larga escala.

### 3. Otimização do sistema pátio-porto de granéis sólidos

Para compreender a base da presente proposta de otimização energética no sistema pátio-porto de granéis sólidos, é fundamental apresentar o modelo matemático desenvolvido por Servare Junior, Rocha e Salles, (2019).

Esse modelo de programação linear inteira mista (MILP) visa otimizar o planejamento de alocação de pilhas de minério de ferro e atendimento de navios, considerando diferentes produtos, capacidades operacionais dos equipamentos e infraestrutura disponível nos pátios portuários.

A seguir, são descritas os principais conjuntos, parâmetros, variáveis, função objetivo e restrições que compõem o modelo original, o qual será utilizado como ponto de partida para a expansão proposta neste trabalho, com foco na eficiência energética do sistema logístico portuário.

#### 3.1 Descrição do fluxo de granéis sólidos

Para descrever o um sistema pátio-porto de granéis sólidos, esse fluxo usa como exemplo o minério de ferro como produto. Nesse sistema pátio-porto, estão presentes os principais elementos da cadeia logística de granéis sólidos, incluindo terminais de descarga (viradoras), pátios de estocagem, empilhadeiras, recuperadoras e berços de atracação dos navios. A Figura 1 elucida as etapas desde a concepção da matéria prima até o seu destino dentro do sistema pátio-porto.

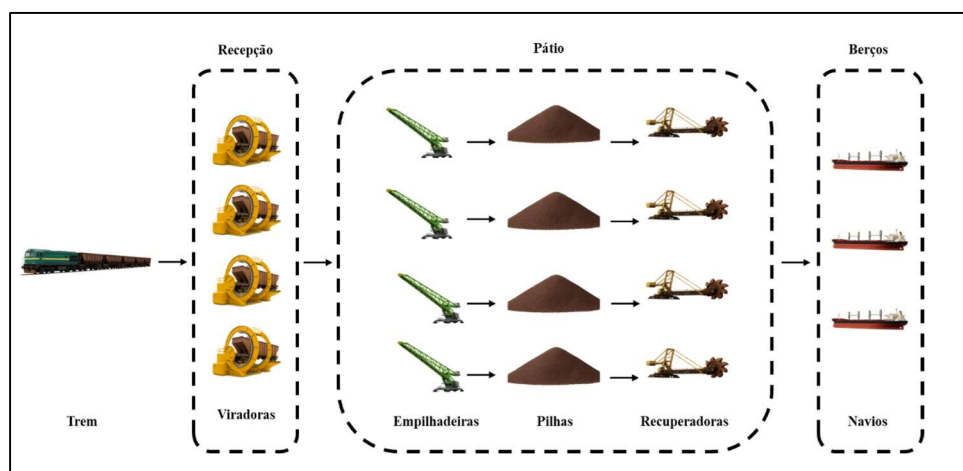


Figura 1. Fluxograma do sistema pátio-porto de granéis sólidos.

O processo tem início com o transporte do produto extraído, que é enviado por ferrovias até os terminais de descarga. Nesses terminais, os vagões são girados para descarregar o produto em correias transportadoras, que direcionam o material para as empilhadeiras. Essas, por sua vez, realizam o empilhamento nos pátios de estocagem.



Nos pátios, o produto é armazenado em pilhas organizadas por posições previamente definidas. A formação de todas as pilhas destinadas ao carregamento de um único navio pode levar vários dias. Quando o navio chega ao berço, as pilhas correspondentes são recuperadas por meio de uma recuperadora de roda de balde, e o material é imediatamente transferido para o navio para embarque.

### 3.2 Modelagem matemática

Servare Junior, Rocha e Salles (2019) definem em seus trabalhos que após a chegada dos lotes de minério aos terminais de descarga, o material é direcionado para as empilhadeiras, que realizam o empilhamento nos pátios de estocagem. As pilhas permanecem armazenadas nesses pátios até o momento em que o navio correspondente chega ao berço designado.

A proposta dessa modelagem é transformar o fluxo do produto em um sistema pátio-porto em um fluxo de energia. Logo, esse projeto incorpora novas contribuições, como um coeficiente energético, que é o ponto de partida para que o modelo passe por aperfeiçoamento e novas incorporações futuras.

Abaixo estão descritos os conjuntos, parâmetros e variáveis do modelo que servem como um ponto inicial para uma adaptação e expansão alinhados ao objetivo deste trabalho:

Conjuntos

A – Conjunto de minas

B – Conjunto de Viradores

C – Conjunto de Empilhadeiras, Pátios, Recuperadoras e tipos de produtos

D – Conjunto de pilhas

F – Conjunto de berços

Parâmetros

$Dem_f$  – Demanda total de navio/berço f

$Cape_b$  – capacidade da viradora b

$Cape_c$  – Capacidade da empilhadeira c

$Capr_c$  – Capacidade da recuperadora c

$Capb_f$  – Capacidade do berço f

$Capp$  – Capacidade da pilha

$\gamma_b^{vir}$  – Custo energético associado as viradoras

$\gamma_c^{emp}$  – Custo energético associado as empilhadeiras

$\gamma_e^{rec}$  – Custo energético associado as recuperadoras

$\gamma_e^{pil}$  – Custo energético associado as pilhas

$\gamma_e^{car}$  – Custo energético associado as carregadoras

Variáveis

$P_{ab}$  – Quantidade de minério transportado da mina a para o virador b

$Q_{bc}$  – Quantidade de minério transportado do virador b para a empilhadeira ou pátio c

$R_{cd}$  – Quantidade de minério transportado da empilhadeira ou pátio c para pilha d

$S_{cd}$  – Quantidade de minério do tipo c transportado da pilha d para a recuperadora do pátio c

$T_{cf}$  – Quantidade de minério do tipo c transportado da recuperadora do pátio c para o berço f

Então o modelo proposto pelos autores passa a ser tratado a princípio como um modelo de programação linear. Então desta forma deseja-se expandir e adaptar às condições energéticas desse sistema se baseando desse princípio.

Abaixo está a função objetiva e suas respectivas restrições após ser transformada em não mais em um fluxo de produto, mas o fluxo energético dentro de um sistema pátio-porto de granéis sólidos.

$$\begin{aligned} \min Z = & \gamma^{vir} \sum_{a \in A} \sum_{b \in B} P_{ab} + \gamma^{emp} \sum_{b \in B} \sum_{c \in C} Q_{bc} + \gamma^{pil} \sum_{c \in C} \sum_{d \in D} R_{cd} + \\ & \gamma^{rec} \sum_{d \in D} \sum_{c \in C} S_{dc} + \gamma^{car} \sum_{c \in C} \sum_{f \in F} T_{cf} \end{aligned} \quad (1)$$

Sujeito a:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\sum_{c \in C} T_{cf} = Dem_f \quad \forall f \in F \quad (12)$$

$$P_{ab}, Q_{bc}, R_{cd}, S_{dc}, T_{cf}, \in R^+ \quad (13)$$

$$\forall a \in A, \forall b \in B, \forall c \in C, \forall d \in D, \forall f \in F \quad (14)$$

A função objetivo apresentada na Eq. (1) incorpora o coeficiente  $\gamma$ , que representa o custo unitário de energia por tonelada movimentada. Dessa forma, cada etapa do fluxo logístico do produto tem um custo energético associado, refletindo diretamente no desempenho e eficiência do sistema.

As restrições demonstradas pelas Eq. (2) a e Eq. (7) estabelecem os limites de capacidade dos equipamentos e do espaço disponível no porto, conforme discutido anteriormente. Por exemplo,  $Capv_b$  representa a capacidade operacional das viradoras.

Já as restrições demonstradas pelas Eq. (8) a Eq. (11) asseguram o balanceamento do sistema, ou seja, garantem que o volume que chega a um equipamento ou pátio seja igual ao volume que dele sai, mantendo a consistência dos fluxos. Por fim, a restrição constatada pela Eq. (12) garante que a demanda de cada berço seja plenamente atendida. As Eq. (13) e Eq. (14) demonstram o domínio das variáveis.

#### 4. Experimentos computacionais

Para a verificação e validação do modelo proposto neste estudo, foram conduzidos experimentos computacionais utilizando o solver comercial CPLEX IBM ILOG *Optimization Studio* 22.1.1. Dada a indisponibilidade de dados reais que permitissem observar o comportamento do sistema em cenários

concretos, recorreu-se à geração de valores aleatórios para representar a capacidade dos equipamentos, produção da mina e a demanda dos berços, possibilitando assim a criação de instâncias simuladas.

Os experimentos foram executados em um computador com processador *Intel Core i5*, 2,2 GHz, e 4 GB de memória RAM. As Tabelas 4 e 5 apresentam, respectivamente, os parâmetros adotados e os conjuntos que compõem cada instância gerada, permitindo a comparação entre os diferentes cenários simulados.

Tabela 4. Parâmetros do modelo definidos segundo uma distribuição uniforme para criação das instâncias.

Parâmetro	Mínimo	Máximos
Demanda	50	100
Produção na Mina A	150	200
Capacidade da Viradora (A)	300	600
Capacidade da Empilhadeira (C)	300	600
Capacidade da Recuperadora (C)	300	600
Capacidade da Recuperadora (F)	300	600
Capacidade da Pilha (D)	20	50

Os valores máximos e mínimos foram definidos com base em uma distribuição randômica uniforme, utilizada para atribuição dos parâmetros dentro dos respectivos intervalos. Cada parâmetro, em cada uma das instâncias analisadas neste estudo, foi gerado respeitando essas faixas.

As instâncias, por sua vez, foram construídas com base no dimensionamento do problema, ou seja, variando-se a quantidade de equipamentos, produção da mina e a demanda dos berços. Esse escalonamento busca refletir o aumento gradual da complexidade do sistema, servindo como base para avaliar a eficiência e aplicabilidade da metodologia proposta diante de diferentes níveis de exigência computacional.

A Tabela 5 apresenta a classificação das instâncias em grupos, de acordo com o porte do problema representado. No primeiro grupo (instâncias 1 a 5), a variação dos cenários está concentrada no aumento do número de viradores e na quantidade de pátios.

No segundo grupo (instâncias 6 a 10), com maior complexidade, as mudanças envolvem o aumento da produção (por meio da ampliação do número de minas), do tamanho dos pátios e da quantidade de berços que o sistema é capaz de atender, no terceiro conjunto (instâncias 11 a 15), ocorre um crescimento simultâneo em todos os conjuntos, com o objetivo de verificar os limites de escalabilidade e desempenho do modelo frente a instâncias de maior dimensão. Entre as instâncias 16 a 25 foram elaboradas para avaliar o comportamento do modelo em cenários de alta carga operacional e dimensionalidade, com aumentos expressivos no número de minas (A), pilhas (D) e nos conjuntos de equipamentos. Estas instâncias testam os limites de desempenho computacional da formulação.

Além disso os custos energéticos por tonelada ( $\gamma$ ) para viradora, empilhadeiras, pilhas, recuperadoras e carregadora correspondem respectivamente: 50,100,150,200 e 300.

Tabela 5. Instâncias modeladas para o problema.

(continua)						
Grupo	Instância	A	B	C	D	F
1	1	1	1	1	10	1
	2	1	2	2	10	1
	3	1	5	2	10	1
	4	1	5	5	10	1
	5	2	10	10	10	1

Tabela 5. Instâncias modeladas para o problema

(continuação)						
2	6	3	10	10	15	1
	7	8	15	10	20	1
	8	10	15	10	30	1

3	9	10	15	10	30	2
	10	10	15	10	50	2
	11	10	15	10	50	8
	12	10	20	10	50	10
	13	15	20	10	50	15
	14	20	20	15	75	20
	15	25	20	20	75	20
4	16	25	20	20	100	20
	17	30	20	20	125	20
	18	35	20	20	150	20
	19	40	20	20	175	20
	20	45	20	20	200	20
5	21	45	40	40	200	20
	22	45	45	45	200	20
	23	45	50	50	200	20
	24	45	55	55	200	20
	25	45	60	60	200	20

Com base nessa análise e nas expressões (1) a (14), foram utilizadas as informações apresentadas nas Tabelas 4 e 5 para a formulação do modelo matemático. Para isso, desenvolveu-se um código em linguagem *Optimization Programming Language* (OPL) com o objetivo de gerar os dados, estruturar o modelo em um formato compatível com a leitura pelo solver e, posteriormente, permitir a otimização de cada cenário proposto.

A Tabela 6 apresenta os resultados computacionais obtidos a partir da implementação das instâncias, sendo o esforço computacional registrado em segundos (ou frações de segundo) necessários para que o solver encontrasse a solução ótima, representada pela Função Objetivo (FO), para cada instância avaliada.

Tabela 6. Resultados obtidos.

(continua)

Grupo	Instância	FO	Tempo (s)
1	1	67500	0,14
	2	74700	0,12
	3	70800	0,12
	4	83100	0,15
	5	124200	0,28
2	6	187500	0,15
	7	411300	0,17
	8	535800	0,23
	9	269100	0,39
	10	258600	0,28
3	11	675600	0,34
	12	759300	0,34
	13	1204500	0,29
	14	1453500	0,86
	15	1711800	1,72

Tabela 6. Resultados obtidos.

(continuação)

4	16	1777800	3,28
	17	2071200	3,61
	18	2285700	5,34

5	19	2549700	6,78
	20	2828700	8,9
	21	2813400	55,36
	22	2824500	85,83
	23	2828400	117,74
	24	2830800	155,32
	25	2829000	228,07

O grupo 1 de instâncias simula cenários de menor escala, com poucos elementos nos conjuntos de minas, viradoras, empilhadeiras e berços. Os tempos de execução do modelo nestes casos permaneceram muito baixos, variando entre 0,12 e 0,28 segundos, o que demonstra uma excelente performance computacional em problemas de pequena dimensão. Isso indica que o modelo é eficiente e de rápida resolução quando aplicado a sistemas de porte reduzido.

No grupo 2, houve um aumento progressivo no número de minas, pilhas e berços, o que elevou a complexidade do modelo. Ainda assim, o tempo de execução permaneceu dentro de uma faixa estreita e controlada, entre 0,15 e 0,28 segundos, evidenciando que o modelo mantém uma boa escalabilidade em cenários de porte médio.

Nas instâncias de 11 a 15 (grupo 3), observa-se um crescimento simultâneo de todos os conjuntos, caracterizando cenários de maior complexidade. O tempo de resolução começou a apresentar variação mais significativa, subindo de 0,29 até 1,72 segundos. Esse crescimento, embora ainda gerenciável, indica o início de uma tendência de aumento mais expressivo na carga computacional à medida que a dimensão do problema se expande.

A partir do grupo 4, com o aumento expressivo do número de minas (A) e pilhas (D), o tempo de execução passou a crescer de forma mais acentuada. Nas Instâncias 16 a 20, os tempos variaram entre 3,28 e 8,9 segundos.

Observa-se no grupo 5 que, embora os parâmetros A e D tenham sido mantidos constantes, o número de equipamentos foi progressivamente aumentado. Nesse cenário, o tempo de execução cresceu exponencialmente, indo de 55,36 segundos na Instância 21 para 228,07 segundos na Instância 25.

Esse aumento evidencia que a ampliação dos conjuntos decisórios, com variação de demanda e produção dentro da faixa estipulada, impacta fortemente a carga de processamento exigida pelo solver. Isso ocorre devido ao crescimento do número de combinações possíveis na alocação dos fluxos, tornando o processo de otimização mais custoso em termos computacionais.

Dessa forma, a análise dos tempos de execução revela um comportamento estável e tempos de resposta bastante baixos até a Instância 20, mesmo diante do aumento gradual na quantidade de minas, equipamentos e pilhas. Essa performance demonstra que o modelo é capaz de capturar a complexidade do sistema porto-pátio e resolver instâncias relevantes com rapidez, o que o torna apropriado para aplicações em planejamento e apoio à decisão.

Ainda que, nas instâncias maiores (21 a 25), o tempo de execução cresça de forma expressiva, esse comportamento é esperado em modelos de programação linear com elevado número de variáveis e restrições. Portanto, o modelo é considerado funcional, pois atende aos critérios de validade, estabilidade computacional e coerência lógica na formulação e nos resultados obtidos, sendo uma ferramenta apropriada para representar e otimizar o sistema.

Portanto, o modelo se mostrou funcional e computacionalmente viável, pois converge com os critérios de validade. Mostrou-se também adaptável ao fluxo energético, que poderá ser expressado de diversas maneiras sendo suscetível a extensões futuras com a incorporação de novas restrições, de acordo com diferentes cenários operacionais que estejam em convergência com os novos cenários que serão adotados. Além disso, os grupos de instâncias resultaram em comportamentos aderentes ao esperado, reforçando a confiabilidade da proposta.

## 5. Considerações finais

O presente estudo teve como objetivo desenvolver e aplicar um modelo matemático capaz de otimizar o consumo energético em um sistema pátio-porto para granéis sólidos. A proposta se mostrou eficaz tanto do ponto de vista computacional, apresentando resultados consistentes em termos de desempenho, escalabilidade e viabilidade de aplicação.

A implementação do modelo em linguagem OPL e sua resolução via o solver CPLEX permitiram simular um conjunto abrangente de cenários operacionais, mesmo na ausência de dados reais, por meio da geração de instâncias com parâmetros definidos de forma aleatória dentro de faixas estabelecidas. A análise dos resultados evidenciou que o modelo responde bem a diferentes níveis de complexidade, com tempos de execução baixos em problemas de pequena e média escala e comportamento computacional esperado em instâncias de maior dimensão.

A progressão dos tempos de execução frente ao aumento da complexidade das instâncias mostra que o modelo é estável, apresentando boa escalabilidade até um certo limite computacional. Mesmo nos cenários de maior carga operacional, embora os tempos tenham crescido de forma expressiva, o modelo manteve sua funcionalidade, confirmando sua capacidade de representar de forma adequada a dinâmica operacional e energética do sistema estudado.

Além disso, a modelagem proposta se mostrou adaptável à estrutura do sistema, permitindo não apenas a representação eficiente do fluxo energético, como também abrindo espaço para futuras extensões. A inclusão de novas variáveis, restrições ou critérios, como janelas de tempo, custos com diferentes tarifas a depender de horários e fornecedores de energia ou regras logísticas específicas, poderá ser realizada com base na formulação atual, mantendo sua coerência estrutural.

Os resultados obtidos validam o uso do modelo como ferramenta de apoio à decisão, oferecendo subsídios para o planejamento operacional de sistemas logísticos portuários focados em eficiência energética. A aderência dos comportamentos simulados às expectativas teóricas reforça a confiabilidade da abordagem proposta, contribuindo para o avanço da modelagem matemática aplicada à logística de grãos sólidos.

Por fim, como sugestões para pesquisas futuras, indica-se o aprimoramento do modelo proposto por meio da consideração de aspectos temporais, como janelas de atendimento e tarifação horária de energia elétrica. Outra possibilidade é a integração do modelo com fontes renováveis de energia e sistemas de armazenamento, simulando estratégias de autoprodução energética. Além disso, a aplicação de heurísticas e metaheurística podem ser exploradas para resolver instâncias de maior porte com menor tempo computacional, contribuindo para sua aplicação em tempo real em ambientes industriais complexos.

## Referências

- Beheshtinia, MA and Fathi, M (2023) ‘Energy-efficient and sustainable supply chain in the manufacturing industry’, *Energy Science and Engineering*, vol. 1, no. 1, pp.357–382. <https://doi.org/10.1002/ese3.1337>.
- Cai, L, Li, W, Li, H, Zhou, B, He, L and Guo, W (2024) ‘Incorporation of energy-consumption optimization into multi-objective and robust port multi-equipment integrated scheduling’, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, [e-journal], vol.166, pp.104-304. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2024.104755>.
- De 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], v.164, pp.462–474. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.043>.
- Fardin, JF., Rocha, HRO, Donadel, CB and Fiorotti, R (2018) ‘Distributed Generation Energy in Relation to Renewable Energy: Principle, Techniques, and Case Studies’, *Advances in Renewable Energies and Power Technologies*, [e-journal], v.2, pp.345–375. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813185-5.00006-1>
- Fernandes, JMRC, Homayouni, SM and Fontes, DBMM. (2022) ‘Energy-Efficient Scheduling in Job Shop Manufacturing Systems: A Literature Review’, *Sustainability*, [e-journal], v.14, no.10, pp.1–34. <https://doi.org/10.3390/su14106264>.
- Fiorotti, R, Rocha, HRO, Coutinho, CR, Rueda-Medina, AC, Nardoto, AF and Fardin, JF (2023a) ‘A novel strategy for simultaneous active/reactive power design and management using artificial intelligence techniques’, *Energy Conversion and Management*, [e-journal], v.294, no.4, pp.117-565. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117565>.
- Fiorotti, R, Yahyaoui, I, Rocha, H.R.O., Honorato, Í, Silva, J and Tadeo, F (2023b) ‘Demand planning of a nearly zero energy building in a PV/grid-connected system’, *Renewable Energy Focus*, [e-journal], v. 45, pp.220–233. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2023.04.005>.

- Gao, K, Huang, Y, Sadollah, A and Wang, L (2020) ‘A review of energy-efficient scheduling in intelligent production systems’, *Complex and Intelligent Systems*, [e-journal], v.6, no.23, pp.237–249. <https://doi.org/10.1007/s40747-019-00122-6>.
- He, J, Huang, Y, Yan, W and Wang, S (2015a) ‘Integrated internal truck, yard crane and quay crane scheduling in a container terminal considering energy consumption’, *Expert Systems with Applications*, [e-journal], v.42, no.5, pp.2464–2487. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.11.016>.
- He, J, Huang, Y and Yan, W (2015b) ‘Yard crane scheduling in a container terminal for the trade-off between efficiency and energy consumption’, *Advanced Engineering Informatics*, [e-journal], v.29, no.1, pp.59–75. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101285>.
- Hong, C, Guo, Y, Wang, Y and Li, T (2023) ‘The Integrated Scheduling Optimization for Container Handling by Using Driverless Electric Truck in Automated Container Terminal’, *Sustainability*, [e-journal], v.15, no.6, pp. 5536. <https://doi.org/10.3390/su15065536>.
- IBM. (2022). IBM ILOG CPLEX Optimization Studio, Version 22.1.1.
- Iris, Ç and Lam, JSL (2021) ‘Optimal energy management and operations planning in seaports with smart grid while harnessing renewable energy under uncertainty’, *Omega (United Kingdom)*, [e-journal], v.103, no.3, pp.102–445. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2021.102445>.
- Karaszewski, R (2022) ‘Strategic Planning and Management in Energy’, *Energies*, [e-journal], v.15, no.21, pp.7900. <https://doi.org/10.3390/en15217900>.
- Khalaf, AF and Wang, Y (2018) ‘Energy-cost-aware flow shop scheduling considering intermittent renewables, energy storage, and real-time electricity pricing’, *International Journal of Energy Research*, [e-journal], v.42, no.12, pp.3928–3942. <https://doi.org/10.1002/er.4130>.
- Labaran, MJ and Masood, T (2023) ‘Industry 4.0 Driven Green Supply Chain Management in Renewable Energy Sector: A Critical Systematic Literature Review’, *Energies*, [e-journal], v.16, no.19, pp.6977. <https://doi.org/10.3390/en16196977>.
- Lacerda, RTO, Ensslin, L and Ensslin, SR (2012) ‘Uma análise bibliométrica da literatura sobre estratégia e avaliação de desempenho’, *Gestão & Produção*, [e-journal], v.1, no.1, pp.59–78. <https://doi.org/10.1590/S0104-530X2012000100005>.
- Li, H (2023) ‘A heuristic algorithm for equipment scheduling at an automated container terminal with multi-size containers’, *Archives of Transport*, [e-journal], v.65, no.1, pp.67–86. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0016.2478>.
- Li, W, Du, S, Zhong, L and He, L (2022) ‘Multiobjective scheduling for cooperative operation of multiple gantry cranes in railway area of container terminal’, *IEEE Access*, [e-journal], v.10, pp.46772–46781. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3170902>.
- Li, X, Peng, Y, Tian, Q, Feng, T, Wang, W, Cao, Z and Song, X (2023) ‘A decomposition-based optimization method for integrated vehicle charging and operation scheduling in automated container terminals under fast charging technology’, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, [e-journal] v.180, pp.103–338. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2023.103338>.
- Meng, Y, Yang, Y, Chung, H, Lee, PH and Shao, C (2018) ‘Enhancing sustainability and energy efficiency in smart factories: A review’, *Sustainability*, [e-journal], v.10, no.12, pp.1–28. <https://doi.org/10.3390/su10124779>.
- Rebillé, Y and Richefort, L (2014) ‘Equilibrium existence and uniqueness in network games with additive preferences’, *European Journal of Operational Research*, [e-journal], v.232, no.3, pp.601–606. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.07.014>.
- Rocha, HRO, Honorato, IH, Fiorotti, R, Celeste, WC, Silvestre, LJ and Silva, JAL (2021) ‘An artificial intelligence based scheduling algorithm for demand-side energy management in smart homes’, *Applied Energy*, [e-journal], v.15, pp.116–145. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116145>.
- Servare Junior, MWJ, De Oliveira Rocha, HR and Salles, JLF (2024) ‘A smart energy scheduling under uncertainties of an iron ore stockyard-port system using a rolling horizon algorithm’, *Computers and Operations Research*, [e-journal], v.164, no.2, pp.106–518. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2023.106518>.

- Servare Junior, MWJ, Rocha, HRO and Salles, JLF (2019) ‘Modelo Matemático Multi-Produtos para Planejamento de Alocação de Pilha de Minérios’, *In: Anais do LI SBPO*, [e-journal], pp.108-119. <https://doi.org/10.59254/sbpo-2019-106881>.
- Servare Junior, MWJ, Rocha, HRO and Salles, JLF (2020) ‘A Linear Relaxation-Based Heuristic for Iron Ore Stockyard Energy Planning’, *Energies*, [e-journal] v.13, no.19, p.5232. <https://doi.org/10.3390/en13195232>.
- Silva, VA, Aoki, AR and Lambert-Torres, G (2020) ‘Optimal day-ahead scheduling of microgrids with battery energy storage system’, *Energies*, [e-journal], v.13, no.19, pp.5188. <https://doi.org/10.3390/en13195188>.
- Soares, M and Katarina de Medeiros Costa, HO (2022) ‘O segmento de distribuição de energia elétrica no Brasil: uma avaliação das crises hídricas enfrentadas em 2001 e 2021’, *Conjecturas*, [e-journal], v.22, no.2, pp.307–321. <https://doi.org/10.53660/CONJ-676-719>.
- Wang, L and Zhu, X (2019) ‘Container loading optimization in rail-truck intermodal terminals considering energy consumption’, *Sustainability (Switzerland)*, [e-journal], v.22, no.2, pp.307-321. <https://doi.org/10.3390/su11082383>.
- Wang, Z, Qu, C, Zeng, Q and Qu, X (2024) ‘Integrated energy management and operations planning in oil-electric hybrid container terminals considering multi-energy supply’, *Advanced Engineering Informatics*, [e-journal], v.60, pp.102-391. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102391>.
- Yang, Y, Zhu, X and Haghani, A (2019) ‘Multiple Equipment Integrated Scheduling and Storage Space Allocation in Rail–Water Intermodal Container Terminals Considering Energy Efficiency’, *Transportation Research Record*, [e-journal], v. 2673, no.3, pp.199–209. <https://doi.org/10.1177/0361198118825474>.
- Zhang, Y, Liang, C, Shi, J, Lim, G and Wu, Y (2022) ‘Optimal port microgrid scheduling incorporating onshore power supply and berth allocation under uncertainty’ *Applied Energy*, [e-journal], v.313, no.7, pp.118-856. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118856>.
- Zhen, L, Yang, Z, Wang, S, Hu, H and Fan, T (2024) ‘Integrated planning model for two-story container ports’, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, [e-journal], v.160, no.3, pp.104-535. Integrated planning model for two-story container ports. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2024.104535>.
- Zhong, Z, Guo, Y, Zhang, J and Yang, S (2023) ‘Energy-aware integrated scheduling for container terminals with conflict-free AGVs’, *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, [e-journal], v.32, no.4, pp.413–443. <https://doi.org/10.1007/s11518-023-5563-y>.