MODELO MULTICRITÉRIO DE OTIMIZAÇÃO PARA PRIORIZAÇÃO DA REDUÇÃO DO TEMPO DE ESPERA EM OPERAÇÕES PORTUÁRIAS BRASILEIRAS

Dennis Caceta[1]

[1]Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, Brasil
(dennisdc@ita.br)

Resumo: Este trabalho propõe um modelo multicritério de otimização, desenvolvido na plataforma e em linguagem AMPL, para priorização dos esforços de redução do tempo de espera à atracação, em operações portuárias brasileiras, utilizando dados públicos da ANTAQ. O modelo combina impacto sistêmico e ineficiência operacional relativa sob restrições orçamentárias. Os resultados indicam predominância do granel sólido nos cenários ótimos e comportamento consistente com ganhos marginais decrescentes.

Palavras-chave: Otimização multicritério; Logística Portuária; Pesquisa Operacional; Teoria das Filas; ANTAQ.

INTRODUÇÃO

O sistema portuário brasileiro possui papel estratégico na competitividade econômica nacional, especialmente em segmentos associados à exportação de commodities agrícolas e minerais.

Nas últimas décadas, o crescimento da movimentação aquaviária ampliou significativamente a pressão sobre a infraestrutura logística do país, elevando a complexidade operacional dos portos e intensificando os problemas relacionados à formação de filas, à utilização de ativos e com relação à sincronização entre os modais terrestres e marítimos.

Segundo dados da Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ), a movimentação de cargas em navegação de longo curso ultrapassou a marca de 1 bilhão de toneladas no último ano (vide Tabela 1), com destaque para as operações de granel sólido.

Tabela 1. Movimentação de longo curso, em toneladas.
Fonte: Elaboração do autor e dados da ANTAQ.

Segmento	2022	2023	2024	2025
Granel Sólido	617.217.498	682.584.297	688.535.032	723.798.186
Granel Líquido e Gasoso	108.585.664	114.833.424	112.397.931	125.307.377
Carga Conteinerizada	90.026.264	89.401.822	105.144.023	112.598.193
Carga Geral	39.337.277	40.076.646	43.560.724	44.208.963
Total	**855.166.703**	**926.896.189**	**949.637.710**	**1.005.912.720**

Apesar dos avanços operacionais observados em diversos terminais, os elevados tempos médios de espera continuam presentes em diferentes naturezas de carga, produzindo impactos relevantes sobre os custos logísticos, na utilização das embarcações e na eficiência sistêmica da cadeia de suprimentos.

Do ponto de vista operacional, as filas portuárias representam um comportamento típico de sistemas que operam próximos de sua capacidade. Segundo Gross et al. (2008), pequenas oscilações na chegada das entidades ou na duração do atendimento tendem a provocar aumentos desproporcionais nos tempos de espera quando o sistema se aproxima da saturação. Em ambientes portuários, esse comportamento é particularmente relevante devido à elevada variabilidade associada à chegada de navios, a disponibilidade dos berços de atracação, das condições climáticas e da integração logística.

Nesse contexto, a simples ampliação da produtividade operacional nem sempre produz uma redução proporcional nas filas observadas. Em muitos casos, os ganhos operacionais internos passam apenas a sustentar o crescimento da demanda sem eliminar estruturalmente os gargalos logísticos. Esse fenômeno torna relevante a definição de critérios quantitativos capazes de apoiar a priorização dos investimentos e dos esforços de melhoria operacional.

Os problemas dessa natureza possuem forte aderência às técnicas de otimização matemática aplicadas à logística e à pesquisa operacional. Segundo Pinedo (2016), os modelos de otimização permitem apoiar decisões em ambientes complexos sujeitos a múltiplas restrições e aos objetivos conflitantes. No ambiente portuário, Bierwirth e Meisel (2010) destacam a ampla utilização de modelos matemáticos em problemas associados à programação operacional, na utilização de infraestrutura e na redução de congestionamentos.

Entretanto, grande parte da literatura concentra-se em problemas específicos de programação e alocação

operacional, existindo relativamente menos estudos voltados à priorização sistêmica multicritério entre diferentes segmentos de carga utilizando indicadores agregados com impacto logístico.

Diante desse cenário, o presente trabalho propõe um modelo multicritério de otimização matemática, desenvolvido em AMPL e alimentado por dados públicos da ANTAQ, para apoiar a priorização dos esforços na redução dos tempos de espera à atracação em operações portuárias brasileiras. O modelo combina simultaneamente indicadores de impacto sistêmico agregado e de ineficiência operacional relativa, permitindo, portanto, avaliar como diferentes critérios de priorização influenciam a distribuição ótima dos recursos operacionais sob restrições orçamentárias.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo utilizou dados públicos disponibilizados pela Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ), considerando:

- movimentação de longo curso;
- tempo médio de espera;
- tempo médio operacional;
- e volume movimentado.

Os dados foram agrupados nas seguintes naturezas de carga:

- granel sólido;
- granel líquido e gasoso;
- carga conteinerizada;
- carga geral.

O período analisado compreendeu o ano de 2025. Foram então, definidos dois indicadores principais.

- Índice de Impacto Sistêmico (IIS)

O IIS busca representar a massa logística sujeita à espera operacional:

$$IIS_c = volume_c \times espera_c \quad (1)$$

onde:

$volume_c$: volume (tonelada) movimentado da carga c;

$espera_c$: tempo médio (hora) de espera da carga c.

Para evitar problemas de escala numérica, o indicador foi regulado em milhões de tonelada-hora.

- Índice de Ineficiência Operacional (IIO)

O IIO busca representar o desequilíbrio relativo entre os tempos (hora) de espera e operação:

$$IIO_c = \frac{espera_c}{operacao_c} \quad (2)$$

onde:

$operacao_c$: tempo médio operacional da carga c.

A Tabela 2, demonstra a base de dados do problema e os valores dos índices calculados.

Tabela 2. Base de dados e índices do problema.
Fonte: Elaboração do autor e dados da ANTAQ.

Natureza	Volume (t)	Tempo médio de espera (h)
Granel Sólido	723.798.186	186,59
Granel Líquido/Gasoso	125.307.377	78,49
Contêiner	112.598.193	37,42
Carga Geral	44.208.963	117

Natureza	Tempo médio de operação (h)	IIS	IIO
Granel Sólido	70,01	135.053,50	2,6652
Granel Líquido/Gasoso	73,43	9.835,38	1,0689
Contêiner	19,59	4.213,42	1,9102
Carga Geral	64,57	5.172,45	1,812

O modelo foi estruturado como um problema de otimização linear multicritério em que, a variável de decisão x_c representa o percentual de redução da espera associado à carga c.

A função objetivo busca maximizar a distribuição ótima dos esforços de redução de espera (x_c) entre as diferentes naturezas de carga, priorizando os segmentos que apresentam maior relevância sistêmica segundo um score multicritério composto pelos indicadores normalizados de impacto sistêmico (IIS) e ineficiência operacional relativa (IIO).

$$score_c = \alpha \cdot IISnorm_c + \beta \cdot IIOnorm_c \quad (3)$$

Os índices pertinentes à cada carga foram normalizados pela razão entre, seus próprios valores e àquele maior dentre todas as categorias.

A função objetivo é dada por:

$$max \sum score_c \cdot x_c \quad (4)$$

sujeita à restrição:

$$\sum x_c \leq B \quad (5)$$

onde:

B: orçamento operacional disponível

Foram então analisados 20 cenários distintos, combinando diferentes pesos para:

- impacto sistêmico (α);
- ineficiência relativa (β);
- e orçamento operacional disponível (B).

Os valores de α e β variaram entre:

- 100% impacto sistêmico;
- combinações híbridas;
- e 100% ineficiência relativa.

O orçamento operacional variou entre:

- 0,10;
- 0,20;
- 0,30;
- 0,40.

O modelo foi implementado em AMPL e resolvido utilizando o solver Gurobi em notebook ACER provido com I7 11th Gen., 64GB RAM DDR4.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 3 apresenta as principais respostas obtidas para os cenários mais representativos analisados pelo modelo multicritério.

Tabela 3. Principais resultados obtidos

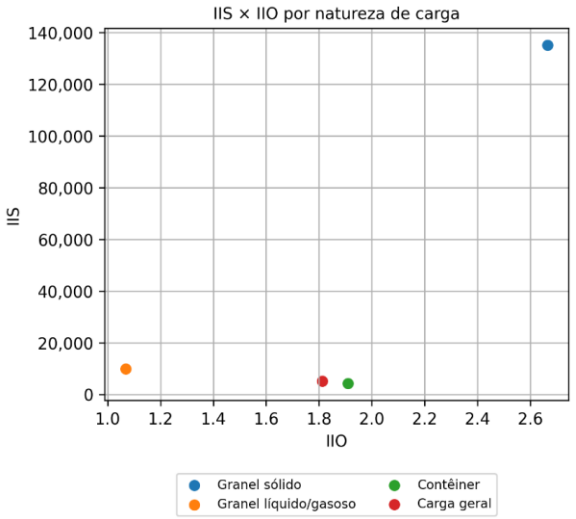
Cenário	α	β	B	Z	Dual	Priorização dominante
C1	1,0	0,0	0,10	0,10	0,07	Granel sólido
C3	0,5	0,5	0,10	0,10	0,37	Granel sólido
C5	1,0	0,0	0,20	0,11	0,11	Granel sólido
C7	0,5	0,5	0,20	0,14	0,37	Granel sólido
C9	1,0	0,0	0,30	0,11	0,04	Granel sólido
C11	0,5	0,5	0,30	0,17	0,36	Granel sólido
C13	1,0	0,0	0,40	0,11	0,00	Granel sólido
C15	0,5	0,5	0,40	0,20	0,00	Granel sólido
C17	0,0	1,0	0,10	0,10	0,72	Granel sólido
C20	0,0	1,0	0,40	0,28	0,00	Granel sólido

Os resultados evidenciam a forte estabilidade estrutural da solução ótima ao longo dos diferentes cenários analisados. Mesmo com as alterações significativas nos pesos associados ao impacto sistêmico e à ineficiência operacional relativa, o modelo manteve o comportamento consistente na priorização das intervenções operacionais.

Esse resultado sugere que o sistema portuário brasileiro apresenta elevada concentração de impacto logístico em um conjunto relativamente restrito de operações associadas às cargas de maior escala e persistência de fila. Em outras palavras, a combinação simultânea entre a elevada movimentação de carga e os altos tempos médios de espera à atracação das escalas produz dominância estrutural suficientemente forte para que o segmento permaneça prioritário mesmo sob diferentes estratégias multicritério.

A Figura 1 apresenta a dispersão entre o Índice de Impacto Sistêmico (IIS) e o Índice de Ineficiência Operacional (IIO) para as diferentes naturezas de carga analisadas.

Figura 1 – Dispersão entre IIS e IIO por natureza de carga



Observa-se que determinados segmentos apresentam simultaneamente elevada relevância sistêmica e altos níveis de desequilíbrio operacional relativo, posicionando-se de forma claramente distinta em relação às demais cargas. Esse comportamento ajuda a explicar a persistência da priorização observada ao longo dos diferentes cenários multicritério analisados pelo modelo.

Do ponto de vista operacional, esse comportamento é particularmente relevante pois sugere que determinados gargalos possuem caráter sistêmico e não apenas conjuntural. Assim, ganhos pontuais de

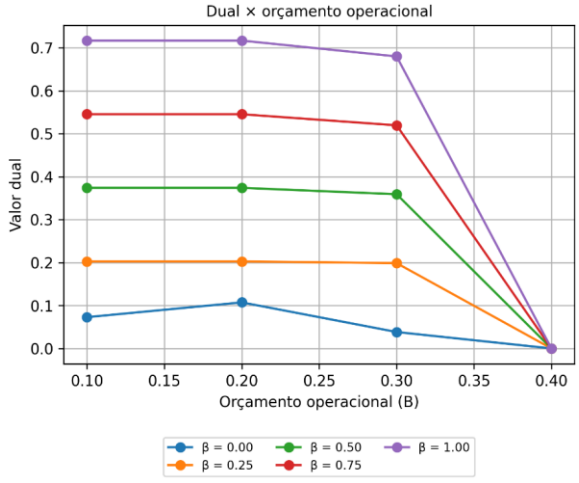
produtividade podem não ser suficientes para alterar significativamente a dinâmica global das filas caso o crescimento da demanda continue pressionando o sistema em intensidade semelhante.

Outro aspecto importante refere-se ao comportamento da função objetivo ao longo dos cenários. À medida que o peso associado à ineficiência relativa aumentou, observou-se um crescimento progressivo deste valor, indicando que os modelos orientados à eficiência operacional relativa tendem a atribuir maior relevância marginal aos esforços de melhoria.

Esse comportamento então sugere que, sob a ótica multicritério, recursos operacionais adicionais tornam-se progressivamente mais "valiosos" quando direcionados a segmentos com maior desequilíbrio entre espera e operação. Em termos práticos, isso significa que as intervenções voltadas à redução da variabilidade operacional, à melhoria de sincronização logística e à coordenação dos fluxos podem produzir impactos sistêmicos relevantes mesmo sem expansão proporcional da infraestrutura física.

A Figura 1 apresenta a evolução do valor dual associado à restrição orçamentária em função dos diferentes níveis de orçamento operacional considerados no modelo.

Figura 2 – Evolução do valor dual em função do orçamento operacional e dos pesos multicritério.
Elaboração: Autor



O valor dual representa o ganho marginal associado a uma unidade adicional de orçamento operacional disponível para redução de espera. Em termos conceituais, o indicador pode ser interpretado como o "valor sistêmico" de recursos adicionais de intervenção operacional.

Os resultados mostram um comportamento consistente com os princípios clássicos da análise de sensibilidade em programação linear. Nos cenários com a menor disponibilidade de recursos, o valor dual permaneceu elevado, indicando forte escassez relativa de orçamento operacional. Nesses casos, algumas pequenas expansões na capacidade de intervenção tendem a produzir ganhos proporcionalmente relevantes sobre a função objetivo.

À medida que o orçamento operacional aumenta, observa-se a redução progressiva do valor dual, indicando um comportamento compatível com ganhos marginais decrescentes. Em outras palavras, os primeiros recursos alocados ao sistema produzem benefícios relativamente elevados, enquanto que, as expansões sucessivas passam a gerar retornos progressivamente menores.

Esse comportamento é particularmente relevante em sistemas logísticos sujeitos a saturação operacional. Quando o sistema opera próximo de sua capacidade, pequenas melhorias iniciais podem reduzir significativamente os efeitos de propagação das filas. Entretanto, após determinado nível de intervenção, os benefícios adicionais tendem a diminuir devido à redução gradual da sensibilidade do sistema.

Outro resultado relevante refere-se ao comportamento dos valores pertinentes ao dual nos cenários em que o peso da ineficiência relativa (β) aumenta. Observou-se um crescimento consistente do valor à medida que o modelo passou a valorizar mais intensamente os desequilíbrios operacionais entre os tempos de espera e operação.

Esse resultado sugere que os sistemas orientados à eficiência relativa apresentam uma maior sensibilidade marginal à disponibilidade dos recursos operacionais. Em termos práticos, isso indica que as estratégias voltadas à melhoria da coordenação logística, à redução de variabilidade operacional e da sincronização entre os fluxos, podem gerar impactos proporcionalmente mais relevantes do que as intervenções puramente associadas à expansão física da capacidade.

Nos cenários em que $B = 0{,}40$, o valor dual tornou-se nulo. Esse comportamento indica a saturação da restrição orçamentária, uma vez que o limite máximo de redução permitido para todas as cargas já havia sido atingido. Matematicamente, isso significa que os recursos adicionais deixam de produzir benefício marginal dentro das condições impostas pelo modelo.

Do ponto de vista gerencial, a análise dual produz uma contribuição particularmente interessante para apoio à

decisão. Mais do que identificar quais segmentos devem ser priorizados, o modelo também permite estimar o retorno marginal esperado associado à ampliação dos recursos operacionais, fornecendo uma métrica quantitativa potencialmente útil para a priorização dos investimentos, planejamento da capacidade e definição das políticas públicas voltadas à eficiência logística portuária.

CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou um modelo multicritério de otimização para priorização dos esforços na redução do tempo de espera para atracação em operações portuárias brasileiras, baseando-se nos dados publicados pela ANTAQ. A modelagem desenvolvida em AMPL permitiu integrar simultaneamente os critérios de impacto sistêmico agregado e ineficiência operacional relativa, possibilitando analisar como as diferentes estratégias de priorização influenciam a distribuição ótima dos recursos operacionais sob as restrições orçamentárias.

Os resultados obtidos evidenciaram que, o segmento das cargas sólidas à granel é aquele em que os investimentos geram melhor resposta. Ainda quando o modelo atribui maior relevância à ineficiência operacional relativa, o granel sólido permanece como principal prioridade da solução ótima. Esse comportamento sugere elevada robustez estrutural do gargalo associado a esse segmento, resultado compatível com a elevada participação na movimentação portuária brasileira e com os persistentes tempos médios de espera observados nos dados públicos analisados.

Do ponto de vista conceitual, os resultados reforçam um aspecto importante da teoria das filas aplicada à logística portuária: sistemas que operam próximos a saturação tendem a apresentar crescimento desproporcional das filas mesmo diante de pequenas oscilações operacionais. Nesse contexto, ganhos localizados de produtividade nem sempre são suficientes para reduzir estruturalmente os tempos de espera, especialmente quando o crescimento da demanda ocorre em velocidade semelhante ou, ainda, superior à expansão da capacidade efetiva do sistema.

Um outro resultado relevante refere-se ao comportamento dos valores duais associados à restrição orçamentária. Observou-se um aumento do ganho marginal do orçamento à medida que o modelo passou a valorizar mais fortemente a ineficiência relativa das operações. Em termos práticos, isso sugere que intervenções direcionadas à redução de desequilíbrios operacionais produzem impactos sistêmicos relevantes mesmo sem grandes expansões físicas de infraestrutura.

Além disso, verificou-se um comportamento consistente com ganhos marginais decrescentes. À medida que o orçamento operacional aumenta, o valor dual associado à restrição de recursos tenda a reduzir-se progressivamente até atingir valores nulos nos cenários limite de intervenção. Esse comportamento indica que as primeiras ações tendem a produzir benefícios proporcionais mais elevados, enquanto que expansões sucessivas, apresentam retorno marginal progressivamente menor.

Os resultados também sugerem que estratégias voltadas exclusivamente à ampliação da capacidade física podem não ser suficientes para reduzir estruturalmente os tempos de espera no ambiente portuário. Em diversos casos, a melhoria da coordenação operacional e da previsibilidade logística pode produzir ganhos relevantes de eficiência sistêmica. Nesse contexto, os mecanismos associados ao melhor agendamento das escalas, a sincronização entre os modais, a gestão dinâmica das janelas operacionais para atracação e dos modelos de sequenciamento das embarcações podem representar alternativas relevantes à mitigação das filas observadas.

A elevada persistência do granel sólido como segmento dominante sugere, inclusive, potencial aplicação de modelos mais sofisticados de otimização integrada, envolvendo simultaneamente:

- programação de chegadas de embarcações;
- alocação dinâmica de berços;
- sincronização ferroviária e rodoviária;
- gerenciamento de estoques;
- e controle de variabilidade operacional.

Da mesma forma, os modelos híbridos que combinam otimização matemática, teoria das filas e simulação computacional podem representar uma evolução natural da abordagem desenvolvida neste estudo, permitindo capturar aspectos dinâmicos associados à variabilidade temporal das chegadas, sazonalidade da demanda e propagação do congestionamentos ao longo da cadeia logística.

Do ponto de vista gerencial, os resultados reforçam a importância da utilização de dados públicos atuais e aferidos, além de ferramentas quantitativas para a realização de estudos que orientem a priorização dos investimentos e decisões operacionais. A utilização integrada de indicadores sistêmicos e modelos multicritério permite reduzir as subjetividades na definição das prioridades, contribuindo para uma

visão mais estruturada da eficiência logística portuária.

Por fim, o trabalho demonstra que a integração entre:

- dados públicos;
- pesquisa operacional;
- teoria das filas;
- e otimização multicritério;

possui elevado potencial para apoiar decisões estratégicas em sistemas logísticos complexos. Como trabalhos futuros, sugere-se incorporar custos operacionais explícitos, indicadores ambientais, variabilidade temporal das filas e modelagens regionais ou portuárias específicas, ampliando a capacidade analítica e operacional do modelo proposto.

REFERÊNCIAS

BIERWIRTH, C.; MEISEL, F. A survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals. European Journal of Operational Research, v. 202, n. 3, p. 615–627, 2010.

GROSS, D.; SHORTLE, J. F.; THOMPSON, J. M.; HARRIS, C. M. Fundamentals of Queueing Theory. 4. ed. Hoboken: Wiley, 2008.

Pinedo, M. Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems. 5. ed. New York: Springer, 2016.

ANTAQ. Painel Estatístico Aquaviário. Disponível em: https://www.gov.br/antaq. Acesso em: 2026.