

SEQUENCIAMENTO INTEGRADO DE NAVIOS EM PORTOS COM CANAL RESTRITO: ANÁLISE COMPARATIVA DAS POLÍTICAS DE DESPACHO

Luciano Pinto de Moraes Neto (Universidade de São Paulo)

Daniel de Oliveira Mota (Universidade de São Paulo)

Rui Carlos Botter (Universidade de São Paulo)



A eficiência das operações portuárias depende fortemente do sequenciamento adequado das embarcações, sobretudo em portos com restrições físicas no canal de acesso. Este trabalho propõe um modelo de scheduling integrado para navios, baseado em programação matemática, com o objetivo de analisar o impacto de diferentes políticas de despacho no desempenho do sistema. A modelagem foi inspirada na formulação de Corry e Bierwirth (2019) para o Berth Allocation Problem with Channel Restrictions e implementada em Python, com a utilização do solver Gurobi. O modelo considera simultaneamente a travessia do canal e a alocação nos berços, respeitando restrições operacionais como janelas de maré, profundidade dos berços, tipo de carga e tipo de embarcação. Três políticas de despacho são testadas: FIFO (First In, First Out), STPT (Shortest Processing Time) e LTPT (Longest Processing Time). Os resultados mostraram que, embora o tempo total de espera tenha se mantido constante entre os cenários, o makespan variou de acordo com a estratégia adotada, evidenciando a importância da escolha da política conforme as características da frota e do ambiente operacional. O modelo permite simular diferentes realidades e apoiar a tomada de decisão para reduzir tempos de espera e aumentar a eficiência portuária.

Palavras-chave: Programação matemática; Scheduling portuário; Gurobi; Políticas de despacho; Eficiência operacional.

1. Introdução

A eficiência das operações portuárias é um fator crucial para a competitividade logística de uma região, especialmente em contextos em que os canais de acesso apresentam restrições físicas que limitam o tráfego simultâneo de embarcações. Portos com canais estreitos, baixa profundidade e tráfego intenso enfrentam desafios significativos na coordenação da entrada e saída de navios, o que pode resultar em tempos de espera elevados, aumento de custos logísticos e redução da produtividade global do sistema.

Neste contexto, este estudo adota uma abordagem quantitativa, baseada em modelagem matemática e simulações computacionais, com o objetivo de avaliar diferentes políticas de ordenamento do tráfego de navios em um porto genérico com canal restrito. A formulação matemática foi inspirada no modelo proposto por Corry e Bierwirth (2019) para o *Berth Allocation Problem with Channel Restrictions* (BAPCR), o qual foi adaptado neste trabalho para refletir melhor a realidade operacional de portos brasileiros. Entre as principais extensões implementadas estão: a verificação automática da compatibilidade entre navios e berços (incluindo calado, tipo de carga, tipo de embarcação e capacidade), a inclusão de berços inoperantes, e a possibilidade de testar diferentes políticas de despacho.

A modelagem considera três terminais especializados (contêineres, granel sólido e granel líquido) e simula a chegada de 50 navios fictícios ao longo de uma janela de 1440 minutos (24 horas). Cada embarcação é caracterizada por seu tipo, calado, DWT, carga transportada e tempo de prontidão. O modelo define a ordem de entrada no canal, aloca os navios aos berços compatíveis, calcula os tempos de operação, respeita janelas de maré e impõe restrições de precedência e separação entre embarcações. O objetivo da otimização é minimizar o tempo total de espera dos navios e analisar o impacto de três políticas de despacho no sistema: FIFO (*First In, First Out*), STPT (*Shortest Processing Time*) e LTPT (*Longest Processing Time*). O desempenho de cada estratégia foi analisado por meio de métricas como o tempo total de espera e o *makespan* da operação, além de visualizações por gráficos de Gantt, que possibilitam a análise detalhada da ocupação dos recursos ao longo do tempo.

A formulação utilizada permite avaliar o impacto de diferentes estratégias sobre a eficiência portuária, sendo uma ferramenta útil para apoiar decisões relacionadas ao reordenamento do tráfego marítimo.

2. Revisão de literatura

2.1. Programação (*Scheduling*) em Sistemas Logísticos

A programação (*scheduling*) é um processo que aloca recursos as tarefas em um determinado período, objetivando a otimização de processos, como a minimização do tempo total de

processamento das tarefas ou maximizando a utilização dos recursos, onde é crucial em sistemas com múltiplas tarefas competem com recursos limitados (PINEDO, 2022).

Segundo Pinedo (2022), o *scheduling* pode ser aplicado em diferentes ambientes produtivos e envolve a organização das tarefas em máquinas para minimizar custos, atrasos ou tempos de espera. Os elementos principais do *scheduling* são as Máquinas, Tarefas e os critérios de desempenho.

Em um problema de *scheduling* portuário, as tarefas correspondem aos navios, que precisam ser processados dentro do sistema portuário, cada um com seu tempo de processamento. Nesse Contexto, as máquinas do problema podem ser representadas pelos recursos que garantem o fluxo das operações, como o canal de acesso, berços de atracação, pátios de armazenamento, rebocadores, entre outros. A alocação eficiente desses recursos é essencial para minimizar tempos de espera, otimizar a capacidade operacional do porto e garantir maior eficiência.

Em um problema de *scheduling* portuário, pode-se dizer que o objetivo é coordenar a entrada, alocação e saída de embarcações de forma eficiente, considerando restrições operacionais como janelas de maré, profundidade, capacidade dos berços e limitações de tráfego. A aplicação de estratégias de escalonamento adequadas contribui significativamente para a redução de congestionamentos e para o aumento da produtividade do sistema portuário.

2.2. Problema de Alocação de Berços com Restrições de Canal

O *Berth Allocation Problem* (BAP) é um dos problemas centrais na gestão portuária, sendo estruturado por Bierwirth e Meisel (2010, 2015) com base em quatro atributos principais:

- Atributo Espacial – Refere-se ao layout dos berços e às restrições de profundidade. Pode ser discreto, contínuo ou híbrido;
- Atributo Temporal – Descreve o processo de chegada das embarcações, podendo ser estático, dinâmico, cíclico ou estocástico;
- Atributo do Tempo de Operação – Define como os tempos de operação são tratados: fixos, dependentes da posição, com alocação e agendamento de guindastes ou estocásticos;
- Medida de Desempenho – Representa os critérios de otimização, incluindo tempo de espera, manuseio, conclusão, atrasos, uso de recursos e posicionamento.

Nos modelos tradicionais, o canal de acesso é tratado como uma restrição exógena, o que pode gerar gargalos, ociosidade e desperdício de janelas de maré. Para superar essas limitações, Corry e Bierwirth (2019) propuseram um modelo integrado que sincroniza o sequenciamento de navios no canal com a alocação nos berços, tratando o canal como um recurso compartilhado sujeito a restrições de separação, precedência e capacidade.

Complementando essa abordagem, o estudo de Li et al. (2023) ajuda a entender sobre a classificação *Hybrid Dynamic Berth Allocation and Scheduling Problem* (HDBASP), que se mostra adequada ao contexto do problema de múltiplos terminais. Esse tipo de modelo integra: (i) a natureza híbrida dos berços (discretos e contínuos), (ii) a necessidade de decisões dinâmicas devido às variações operacionais causadas, e (iii) a consideração de janelas de maré específicas para navios com maior calado.

Assim, a formulação adotada neste trabalho reflete um cenário realista de operação portuária, permitindo avaliar diferentes estratégias de despacho e seus impactos sobre a eficiência do sistema logístico portuário.

No contexto do canal de acesso, a definição da ordem de entrada e saída dos navios pode impactar diretamente o desempenho do sistema portuário. Meisel e Fagerholt (2019), em seu estudo sobre o Canal de Kiel, demonstraram que o sequenciamento adequado das embarcações reduz significativamente os tempos de espera e os congestionamentos, além de otimizar o uso das janelas de maré e dos recursos internos do terminal.

Além disso, Fagerholt e Christiansen (2000) destacam que a otimização da programação e alocação de embarcações no transporte marítimo contribui para a redução dos custos operacionais, melhora na utilização da frota e minimização de tempos ociosos. A programação integrada permite ainda maior capacidade de resposta às variações da demanda, redução de incertezas e atrasos, reforçando a importância estratégica de políticas eficientes de despacho.

Neste trabalho, são analisadas três políticas de despacho amplamente discutidas na literatura:

FIFO (*First In, First Out*) – prioridade de atendimento conforme a ordem de chegada;

STPT (*Shortest Processing Time Priority*) – priorização de navios com menor tempo de operação;

LTPT (*Longest Processing Time Priority*) – priorização de navios com maior tempo de operação.

A comparação entre essas abordagens visa avaliar como diferentes critérios de ordenamento influenciam o desempenho do sistema em termos de tempo de espera e utilização dos berços.

3. Metodologia

Neste estudo, o problema logístico analisado é caracterizado como um caso de *scheduling* integrado, que combina o agendamento do canal de acesso com o *scheduling* de berços, conforme o modelo proposto por Corry e Bierwirth (2019), conhecido como *Berth Allocation Problem with Channel Restrictions* (BAP-CR). O objetivo principal, como mencionado anteriormente, é propor e avaliar diferentes políticas de despacho aplicadas ao sequenciamento de navios em um porto genérico, a fim de identificar a mais eficiente em termos operacionais,

considerando simultaneamente a alocação das embarcações aos berços e o ordenamento do fluxo marítimo no canal de acesso.

A abordagem adotada baseia-se na modelagem matemática por meio de uma formulação MIP (*Mixed-Integer Programming*), implementada na linguagem Python com o uso da biblioteca Gurobi Optimizer, amplamente utilizada na resolução de problemas de otimização combinatória. O modelo foi desenvolvido com base na formulação original de Corry e Bierwirth (2019), incorporando as mesmas restrições relacionadas ao canal de acesso e à alocação de berços, com ajustes pontuais realizados para adequação ao novo problema proposto, o qual contempla cenários de despacho distintos em um porto genérico com múltiplos terminais especializados.

O modelo proposto por Corry e Bierwirth (2019) representa um porto com canal de acesso restrito, modelado como uma sequência de segmentos unidimensionais que conectam o fundeadouro aos berços de atracação. O canal é sujeito a restrições operacionais relevantes, como a impossibilidade de ultrapassagem entre embarcações que navegam na mesma direção e a proibição de cruzamento entre navios em sentidos opostos em determinados segmentos, especialmente nos trechos mais estreitos. Além disso, a alocação de berços é feita de forma discreta, ou seja, cada berço atende apenas uma embarcação por vez. Essas características foram incorporadas à modelagem desenvolvida neste trabalho, a fim de reproduzir um cenário realista de restrição de tráfego marítimo.

O sistema portuário modelado é composto por três terminais especializados, cada um destinado a um tipo específico de carga: contêineres, granel sólido e granel líquido. Foram simulados 20 navios, com tempos de operação distintos e características compatíveis com os terminais designados, de modo a representar um ambiente portuário dinâmico e congestionado.

A caracterização do problema de sequenciamento considera três componentes fundamentais da notação α , β e γ :

- α (Alpha): caracteriza o tipo do problema como um *scheduling* com recursos limitados e restrições de precedência, onde os navios (*jobs*) compartilham recursos (canal e berços) sob diferentes regras de ordenamento;
- β (Beta): define as restrições operacionais envolvidas, incluindo separação mínima entre navios no canal, impossibilidade de ultrapassagem, janelas de tempo e compatibilidade de berço com o tipo de carga;
- γ (Gamma): representa o objetivo da modelagem, que neste caso é minimizar o tempo total de ocupação do canal e dos berços, bem como avaliar o impacto operacional das diferentes políticas de despacho.

Para análise comparativa, o modelo foi executado sob três diferentes políticas de ordenamento de navios:

- FIFO (*First In, First Out*);
- STPT (*Shortest Processing Time Priority*);
- LTPT (*Longest Processing Time Priority*).

A modelagem permitiu representar com precisão o fluxo marítimo e a interação entre as restrições dos recursos envolvidos, proporcionando uma base sólida para a análise dos efeitos causados pela escolha de políticas de despacho em ambientes portuários com canais de acesso restritos.

4. Restrições base para a modelagem

A modelagem desenvolvida neste trabalho segue a formulação de Corry e Bierwirth (2019) para o *Berth Allocation Problem with Channel Restrictions* (BAP-CR), integrando o agendamento do canal de acesso à alocação de berços. Foram implementadas 27 restrições no modelo, agrupadas em três blocos principais: *scheduling* do canal, restrições de maré e *scheduling* de berço. A função objetivo (R1, R16 e R21), apresentada na Figura 1, visa minimizar a soma dos tempos de espera, evitando ociosidade no fundeadouro ou nos berços.

Figura 1 – Função Objetiva

$$\text{minimize} \rightarrow \sum_{a \in T^{wait}} w_a$$

Fonte: Corry e Bierwirth (2019).

Conforme apresentado por Corry e Bierwirth (2019), as restrições são organizadas em 3 blocos principais:

- Formulação para o *Scheduling* de Canal;
- Restrições de Maré;
- Formulação para o *Scheduling* de Berço.

4.1. Formulação para o *Scheduling* de Canal

Esse bloco assegura a coordenação segura da navegação, respeitando restrições operacionais, ordem de entrada e separação entre embarcações:

- R2: Início do canal apenas após o tempo de prontidão (T_{ready});
- R3: Sem ultrapassagem em segmentos consecutivos;
- R4: Entrada no canal só após concluir operação no berço;
- R5–R6: Separação mínima entre navios na mesma direção;
- R7–R8: Impede cruzamentos simultâneos em sentidos opostos;
- R9–R10: Intervalo entre saídas consecutivas do berço;

- R11: Manutenção da ordem ao longo do canal;
- R12: Permite aplicação de prioridades (ex: por tipo de carga);
- R13–R15: Domínio das variáveis (tempos ≥ 0 , binárias $\in \{0,1\}$).

4.2. Restrições de Maré

Visam garantir que navios com calado elevado só transitem durante janelas de maré adequadas: Restrição de escolha da janela de maré (R17): Garante que apenas uma janela de tempo seja selecionada para cada trânsito no segmento, garantindo que o modelo siga corretamente os horários viáveis conforme o nível da água;

- R17: Escolha de apenas uma janela de maré;
- R18–R19: Garantia de início e fim do trânsito dentro da janela;
- R20: Definição das variáveis binárias associadas.

4.3. Formulação para o *Scheduling* de Berço.

Controla a alocação e operação dos navios nos berços, prevenindo conflitos e respeitando compatibilidades:

- R22: Alocação única e compatível para cada navio;
- R23: Tempo mínimo de operação no berço;
- R24: Tempo de espera entre término da operação e saída;
- R25–R26: Sequenciamento entre navios no mesmo berço;
- R27: Domínio binário das variáveis de alocação.

5. Resultados

Para a análise dos cenários simulados, o problema de *scheduling* integrado foi estruturado seguindo a lógica clássica de sistemas produtivos, segundo Pinedo (2022), onde as embarcações representam as tarefas (*jobs*) a serem sequenciadas, e os recursos portuários, como o canal de acesso e os berços de atracação, representam as máquinas (*machines*) necessárias para o processamento de cada tarefa.

Essa estrutura permite a aplicação de diferentes políticas de despacho e a avaliação de seus impactos sobre o desempenho global do sistema. Métricas como o tempo médio de espera, a ocupação dos recursos e o *makespan* (tempo total da operação) são utilizadas para mensurar a eficiência das estratégias simuladas.

5.1. Geração da Frota e Parâmetros do Modelo

A frota de navios utilizada na simulação é gerada de forma aleatória, respeitando os limites operacionais dos terminais e berços. Para cada embarcação, são sorteadas as seguintes características:

- Tipo de embarcação (navio ou barcaça);

- Tipo de carga transportada (contêiner, granel líquido, granel sólido ou carga geral);
- Calado (em metros);
- DWT (*Deadweight Tonnage*), representando o porte da embarcação;
- Tempo de Prontidão do navio (T_{ready}) para a travessia do canal, onde foram distribuídos aleatoriamente dentro de uma janela de 1440 minutos, equivalente a 24 horas, representando um ciclo operacional completo de chegada de embarcações;
- Tempo de travessia do canal (p_a), calculado com base no tamanho do navio.

Esses dados estão consolidados na Tabela 1, que apresenta os navios gerados com seus respectivos parâmetros operacionais.

Tabela 1 - Dados dos Navios Gerados

Navio	Tipo de Embarcação	Tipo de Carga	Calado (m)	DWT (t)	T_{ready} (min)	p_a (canal, min)
N1	Barcaça	Carga Geral	4,5	6230	19	22
N2	Barcaça	Granel Líquido	4,8	7002	40	24
N3	Barcaça	Carga Geral	4,3	5010	53	20
N4	Navio	Contêiner	6	2646	63	15
N5	Barcaça	Granel Líquido	2,9	8955	67	27
N6	Navio	Contêiner	3,8	6801	76	23
N7	Navio	Granel Sólido	4,8	2145	85	14
N8	Barcaça	Granel Sólido	3,9	1173	85	12
N9	Barcaça	Granel Líquido	4	11036	90	32
N10	Navio	Granel Líquido	3,7	8625	109	27
N11	Navio	Granel Sólido	4	10492	134	30
N12	Barcaça	Carga Geral	2,2	6012	154	22
N13	Navio	Granel Sólido	5,9	10635	156	31
N14	Navio	Granel Líquido	3,7	4846	220	19
N15	Navio	Contêiner	2,2	5173	236	20
N16	Navio	Granel Líquido	4,9	4929	244	19
N17	Navio	Granel Sólido	6,4	841	244	11
N18	Navio	Carga Geral	4	2702	320	15
N19	Barcaça	Granel Sólido	2,7	3703	422	17
N20	Navio	Granel Sólido	6,2	504	434	11
N21	Navio	Carga Geral	7,3	6339	508	22
N22	Navio	Granel Sólido	3,3	3953	540	17
N23	Navio	Granel Líquido	6,1	8668	586	27
N24	Navio	Carga Geral	3,5	5570	617	21
N25	Navio	Granel Sólido	7,2	10900	620	31
N26	Barcaça	Granel Sólido	1,9	8792	663	27
N27	Barcaça	Granel Sólido	4,3	894	699	11
N28	Barcaça	Granel Líquido	4,8	2408	722	14
N29	Navio	Granel Sólido	4	6560	757	23
N30	Navio	Granel Sólido	6,9	6820	862	23
N31	Navio	Granel Líquido	6,6	2389	891	14
N32	Navio	Granel Líquido	5,9	4069	1021	18
N33	Navio	Contêiner	2,7	2503	1023	15
N34	Navio	Contêiner	6,4	3465	1033	16
N35	Navio	Carga Geral	6,6	2753	1042	15
N36	Navio	Contêiner	4,5	8818	1068	27
N37	Navio	Granel Sólido	3,1	9579	1080	29
N38	Barcaça	Carga Geral	3	2591	1135	15
N39	Barcaça	Granel Líquido	4	5595	1142	21
N40	Navio	Contêiner	2	3276	1165	16
N41	Navio	Carga Geral	4,1	3243	1222	16
N42	Navio	Granel Líquido	6,5	4250	1233	18
N43	Navio	Granel Sólido	4,5	5215	1247	20
N44	Navio	Granel Sólido	4,5	6027	1256	22
N45	Navio	Granel Líquido	6,8	3243	1326	16
N46	Navio	Granel Sólido	2,9	1295	1331	12
N47	Barcaça	Granel Líquido	4,7	2800	1354	15
N48	Barcaça	Carga Geral	2	1827	1366	13
N49	Barcaça	Carga Geral	1,7	5560	1376	21
N50	Barcaça	Granel Líquido	1,6	7617	1387	25

Fonte: Autor (2025)

Em seguida, o modelo verifica automaticamente a compatibilidade entre cada navio e os berços disponíveis, considerando:

- Terminal
- Profundidade e a capacidade máxima de cada berço;
- O tipo de carga permitido;
- O tipo de embarcação aceito (navio ou barcaça);
- O status operacional do berço.

As características dos berços modelados, agrupadas por terminal, estão descritas na Tabela 2.

Tabela 2 - Características dos berços considerados no modelo

Índice	Nome do Berço	Terminal	Profundidade (m)	Capacidade (t)	Operacional?	Tipo de Embarcação	Tipo de Carga
0	101	1	8	10000	Sim	Navio	Carga Geral
1	102	1	8	10000	Sim	Navio	Carga Geral
2	103	1	8	10000	Sim	Navio	Carga Geral
3	104	1	4,8	8000	Sim	Barcaça	Carga Geral
4	105	1	9	15000	Sim	Navio	Contêiner, Granel Sólido
5	106	1	9	15000	Sim	Navio	Contêiner, Granel Sólido
6	107	1	9	15000	Sim	Navio	Granel Sólido
7	101	2	7,92	10000	Sim	Navio, Barcaça	Granel Líquido
8	102	2	2,5	10000	Sim	Barcaça	Granel Líquido
9	103	2	0	0	Não	Nenhum	Nenhuma
10	201	2	7,92	15000	Sim	Navio, Barcaça	Granel Líquido
11	202	2	0	0	Não	Nenhum	Nenhuma
12	203	2	1,75	8000	Sim	Barcaça	Granel Líquido
13	101	3	10	40000	Sim	Navio, Barcaça	Granel Sólido
14	102	3	8	15000	Sim	Navio, Barcaça	Granel Sólido
15	201	3	8	6000	Sim	Barcaça	Granel Sólido
16	202	3	5	250	Sim	Barcaça	Granel Sólido

Fonte: Autor (2025)

5.2. Descrição do Modelo Criado Para o Problema

Com o uso da linguagem Python e da biblioteca de otimização Gurobi, foi desenvolvido um modelo para o *scheduling* integrado de navios, que contempla tanto a travessia do canal de acesso quanto a alocação nos berços de atracação. O processo inicia-se com a geração de uma frota fictícia de navios, cujas características são determinadas de forma aleatória, respeitando os limites operacionais definidos para o porto, como mencionado anteriormente. A seguir, o modelo verifica automaticamente a compatibilidade entre cada navio gerado e os berços disponíveis, com base em critérios como profundidade, capacidade máxima, tipo de carga permitida e tipo de embarcação aceito. Caso o navio não possua nenhum berço viável, um novo sorteio de parâmetros é realizado até garantir sua viabilidade operacional.

Na segunda etapa, é determinado o tempo de operação total em cada berço viável. Esse tempo é calculado a partir da soma do tempo de pré-operação, tempo proporcional ao DWT da embarcação (com base em um fator por tipo de carga) e o tempo de pós-operação. Também é gerado o tempo de prontidão de cada navio, ou seja, o instante aleatório em que ele se torna disponível para iniciar sua entrada no canal.

O modelo então formula o problema de otimização com o objetivo de minimizar o tempo total de espera dos navios, considerando as seguintes decisões: ordem de entrada no canal, alocação

do navio a um berço, tempos de início e fim das operações e cumprimento das janelas de maré para navios com calado elevado. As restrições incluem separação entre embarcações no canal (mesmo e sentido oposto), no uso sequencial de berços, precedência entre navios, janelas de maré, e operação dos berços.

A programação permite ainda a escolha de diferentes políticas de despacho, como FIFO (ordem de chegada), LPTP (prioridade para maior tempo de operação) e STPT (prioridade para menor tempo de operação), com o objetivo de testar o impacto de cada estratégia sobre a eficiência portuária. Os resultados da otimização são exportados em formato tabular e visualizados por meio de gráficos de Gantt, nos quais é possível observar a sequência e a duração da operação de cada navio ao longo do tempo.

O modelo desenvolvido possibilita uma análise detalhada da operação portuária sob diferentes estratégias de agendamento, promovendo maior flexibilidade para simulação de cenários e oferecendo subsídios para intervenções voltadas à redução do tempo de espera e ao aumento da eficiência operacional.

Para adequar o modelo original de Corry e Bierwirth (2019) à realidade operacional estudada, foram incorporadas ao modelo proposto neste trabalho diversas restrições adicionais. Essas extensões têm como objetivo garantir a viabilidade prática da alocação de navios, considerando as particularidades dos terminais e berços analisados. Entre as principais restrições adicionadas, destacam-se:

- (i) verificação da compatibilidade entre o tipo de carga do navio e os tipos de carga aceitos por cada berço;
- (ii) verificação da compatibilidade entre o tipo de embarcação (navio ou barcaça) e os tipos aceitos em cada berço;
- (iii) exclusão de berços inoperantes da alocação;
- (iv) a inclusão de diferentes políticas de despacho (FIFO, STPT e LTPT).

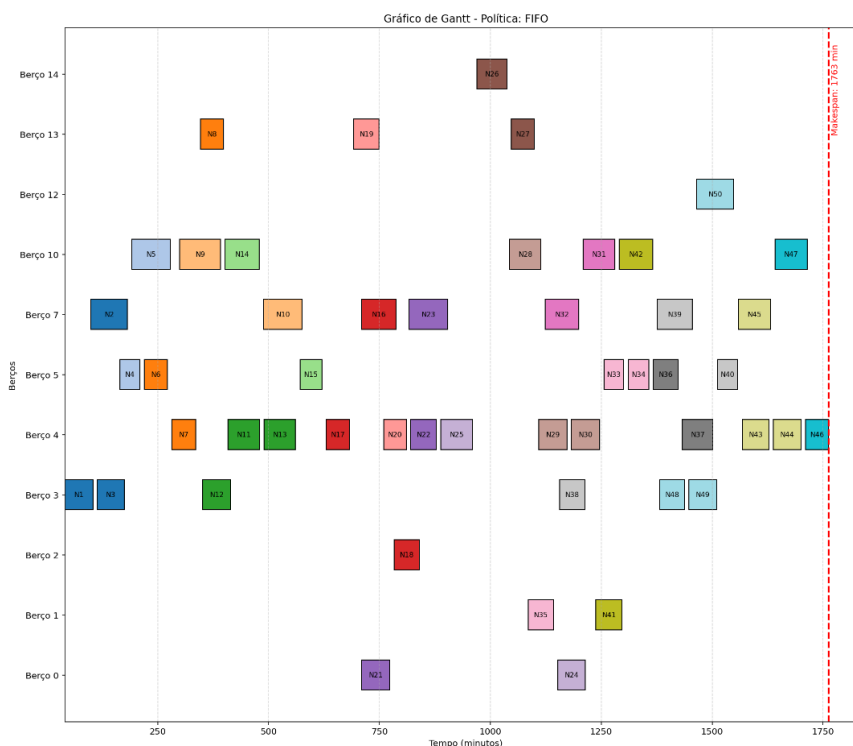
5.3. Resultados da Ordem de despacho FIFO

A primeira política de despacho simulada foi a FIFO (*First In, First Out*), que prioriza os navios com menor tempo de prontidão (T_{ready}) no fundeadouro. Essa estratégia é frequentemente adotada em operações portuárias por sua simplicidade e previsibilidade operacional.

A simulação considerando a política FIFO resultou em um tempo total de espera de 2642,00 minutos e um *makespan* (tempo total de operação do sistema) de 1792,88 minutos. A Figura 2 apresenta o gráfico de Gantt correspondente à execução da política FIFO. Cada barra horizontal representa a operação de um navio em seu respectivo berço, permitindo observar a ordem de

atendimento e os períodos de ocupação dos recursos. A linha tracejada vermelha marca o *makespan*.

Figura 2 – Gantt da ordem de atracação com política FIFO



Fonte: Autor (2025)

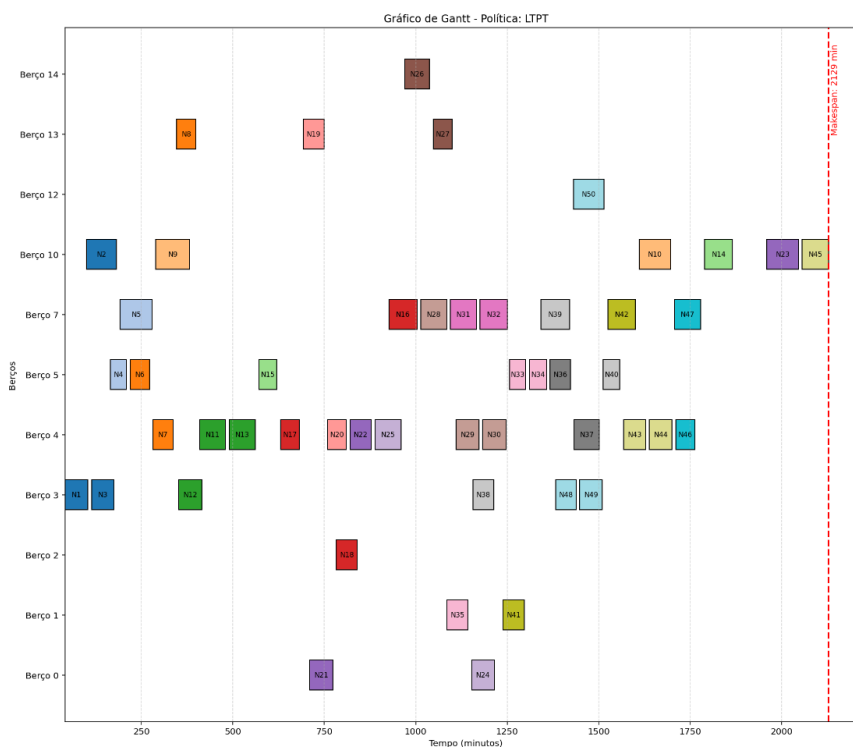
Visualmente, observa-se uma distribuição equilibrada entre os berços disponíveis, com uso mais intenso no berço 4.

5.4. Resultados da Ordem de despacho LTPT

A segunda política de despacho simulada foi a LTPT (*Longest Total Processing Time*), que prioriza os navios com maior tempo total de operação no berço. Essa abordagem visa antecipar o atendimento das embarcações que demandam maior tempo de processamento, buscando minimizar a ocupação prolongada dos recursos portuários.

A simulação com a política LTPT resultou em um tempo total de espera de 2642,00 minutos e um *makespan* (tempo total de operação do sistema) de 2128,84 minutos. A Figura 3 apresenta o gráfico de Gantt correspondente à execução da política LTPT. Cada barra horizontal representa a operação de um navio em seu respectivo berço, permitindo observar a ordem de atendimento, a ocupação dos recursos e o momento de término das operações. A linha tracejada vermelha indica o *makespan* obtido.

Figura 3 - Gantt da ordem de atracação com política LTPT



Fonte: Autor (2025)

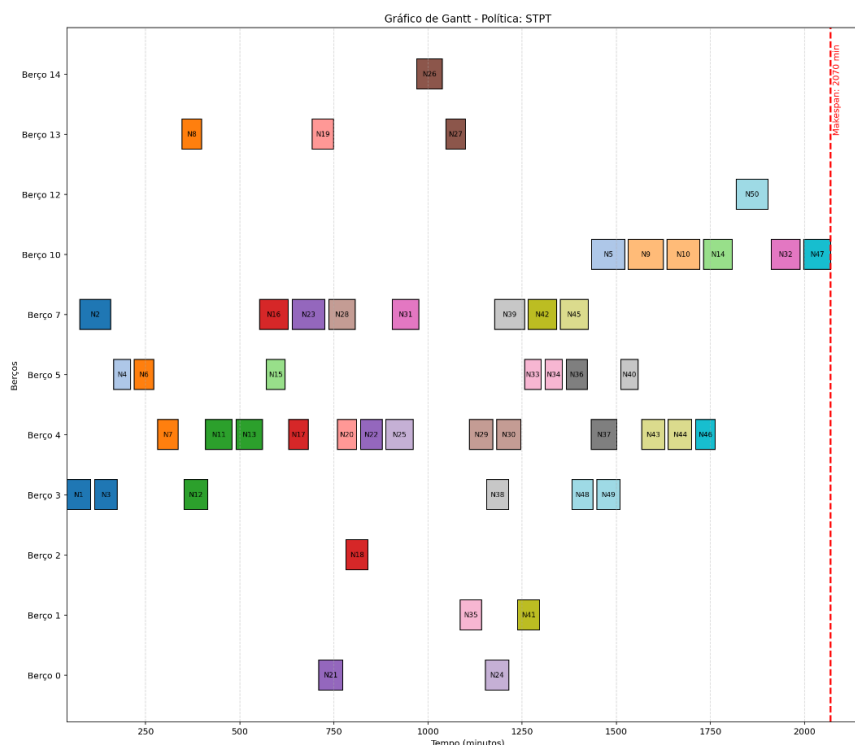
Visualmente, observa-se que alguns navios com tempos de operação menores foram postergados em função da priorização dos navios com operações mais longas. Esse comportamento tende a aumentar o *makespan*, como identificado nos resultados, embora o tempo total de espera permaneça constante devido à função objetivo do modelo, que busca exclusivamente minimizá-lo.

5.5. Resultados da Ordem de despacho STPT

A terceira política de despacho simulada foi a STPT (*Shortest Total Processing Time*), que prioriza os navios com menor tempo total de operação no berço. Essa estratégia busca agilizar o fluxo de embarcações por meio do atendimento rápido das tarefas mais curtas, com o objetivo de liberar os recursos mais rapidamente e potencialmente reduzir o *makespan*.

A simulação com a política STPT resultou em um tempo total de espera de 2642,00 minutos e um *makespan* (tempo total de operação do sistema) de 2069,59 minutos. A Figura 4 apresenta o gráfico de Gantt referente à execução da política STPT. Assim como nos demais gráficos, cada barra horizontal representa a operação de um navio no berço ao qual foi alocado, destacando os períodos de ocupação e a sequência de atendimento. A linha tracejada vermelha indica o *makespan*.

Figura 4 – Gantt da ordem de atracação com política STPT



Fonte: Autor (2025)

Visualmente, nota-se uma maior alternância entre operações curtas nos diferentes berços, o que pode ter contribuído para a obtenção de um *makespan* reduzido. A política STPT demonstrou desempenho próximo ao FIFO em termos de *makespan*, mas com uma dinâmica distinta de utilização dos recursos, o que pode influenciar decisões gerenciais conforme o perfil de demanda do porto.

5.6. Análise Comparativa entre Políticas de Despacho

Após a execução dos três cenários de simulação com as políticas de despacho FIFO, LTPT e STPT, foram comparadas as principais métricas de desempenho operacional, conforme apresentado na Figura 5.

Figura 5 - Comparativo final entre as políticas de despacho

=== COMPARATIVO FINAL ENTRE POLÍTICAS ===		
Política	Espera Total (min)	Makespan (min)
FIFO	2642.00	1762.88
LTPT	2642.00	2128.84
STPT	2642.00	2069.59

Fonte: Autor (2025)

Os resultados indicam que, embora o tempo total de espera tenha permanecido constante entre as três estratégias (devido à função objetivo do modelo estar centrada na minimização da espera), o *makespan* variou significativamente. A política FIFO apresentou o menor *makespan*, seguida pela STPT e, por último, a LTPT, que prioriza tarefas com maior tempo de processamento e, por consequência, tende a postergar o término das operações.

6. Conclusão

A análise comparativa das políticas de despacho evidencia que os resultados obtidos estão diretamente relacionados às características específicas das embarcações geradas aleatoriamente em cada simulação. Fatores como tipo de carga, DWT, calado e compatibilidade com os berços disponíveis afetam significativamente o comportamento do sistema e podem alterar qual política de despacho apresenta o melhor desempenho para o cenário simulado. Neste estudo, as embarcações foram geradas com tempos de prontidão distribuídos ao longo de um intervalo de 1440 minutos, correspondente a uma janela de 24 horas de operação portuária contínua, refletindo uma dinâmica realista de chegada de navios ao fundeadouro.

Dessa forma, não há uma política universalmente superior, o desempenho ideal dependerá do perfil da frota em análise. Em situações com maior presença de navios de operação mais longa, a política STPT pode acelerar a liberação de recursos. Já em frotas com navios de alta rotatividade, a política FIFO pode proporcionar melhor distribuição dos recursos. Essa flexibilidade do modelo permite simular diferentes realidades portuárias e identificar a estratégia mais eficaz para cada contexto.

Outro ponto importante observado é que o tempo total de espera permaneceu constante entre as três políticas (2642 minutos). Isso se deve ao fato de que a função objetivo do modelo foi definida para minimizar a soma dos tempos de espera, e, por isso, o Gurobi encontrou soluções ótimas equivalentes em termos desse critério, independentemente da ordem de despacho adotada. O que variou entre os cenários foi o *makespan*, que depende da forma como as tarefas são distribuídas no tempo ao longo dos berços e do canal.

Esse resultado ressalta a importância estratégica da escolha da política de despacho, que, embora não altere a quantidade total de espera acumulada, pode impactar a duração global da operação portuária, a liberação dos recursos e o planejamento das próximas janelas de atracação. Em um ambiente portuário real, isso pode se traduzir em maior rotatividade de berços, melhor aproveitamento das marés e maior previsibilidade das operações logísticas.

Portanto, a aplicação do modelo proposto permite avaliar previamente o desempenho de diferentes políticas sob variados cenários operacionais, oferecendo um suporte relevante à tomada de decisão e à gestão eficiente dos recursos portuários.

7. Agradecimentos

O autor agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro, por meio da concessão de bolsa de pesquisa, fundamental para a viabilização deste trabalho. Agradece também ao Centro de Inteligência Logística e Inovação

Portuária (CILIP) pelo suporte técnico, acadêmico e institucional, bem como pelo ambiente colaborativo que contribuiu significativamente para o desenvolvimento da pesquisa.

Estende ainda sua gratidão à família e aos amigos pelo apoio incondicional, incentivo contínuo e compreensão ao longo da trajetória acadêmica. O suporte emocional e a presença nos momentos mais desafiadores foram fundamentais para a conclusão deste estudo.

REFERÊNCIAS

CORRY, Paul; BIERWIRTH, Christian. *The berth allocation problem with channel restrictions*. *Transportation Science*, v. 53, n. 3, p. 708-727, 2019. DOI: 10.1287/trsc.2018.0865.

PINEDO, Michael L. *Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems*. 6th ed. New York: Springer, 2022.

FAGERHOLT, K.; CHRISTIANSEN, M. *A combined ship scheduling and allocation problem*. *Journal of the Operational Research Society*, v. 51, n. 7, p. 834-842, 2000. DOI: 10.1057/palgrave.jors.2600973.

MEISEL, Frank; FAGERHOLT, Kjetil. *Scheduling two-way ship traffic for the Kiel Canal: Model, extensions, and a matheuristic*. *European Journal of Operational Research*, v. 279, n. 2, p. 486-501, 2019.

BIERWIRTH, C.; MEISEL, F. *A follow-up survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals*. *European Journal of Operational Research*, v. 244, n. 3, p. 675-689, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.12.030>.

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. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.05.031>.

LI, Bokang et al. *Berth allocation and scheduling at marine container terminals: a state-of-the-art review of solution approaches and relevant scheduling attributes*. *Journal of Computational Design and Engineering*, [S.l.], v. 10, n. 4, p. 1707-1735, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/jcde/qwad075>. Acesso em: 23 abr. 2025.