

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE GESTÃO E NEGÓCIOS - FAGEN

VICTOR FREITAS DE SOUSA

**AVALIAÇÃO DAS OPERAÇÕES DO BERÇO 3 DO PORTO DE ITAJAÍ EM 2023 E
2024 SOB A ÓTICA DA TEORIA DAS FILAS**

Uberlândia - MG

2025

VICTOR FREITAS DE SOUSA

**AVALIAÇÃO DAS OPERAÇÕES DO BERÇO 3 DO PORTO DE ITAJAÍ EM
2023 E 2024 SOB A ÓTICA DA TEORIA DAS FILAS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Gestão e
Negócios da Universidade Federal de
Uberlândia como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Administração.

Orientadora: Profa. Dra. Valeriana Cunha

Uberlândia - MG

2025

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

S725 Sousa, Victor Freitas de, 2001-
2025 Avaliação das operações do berço 3 do Porto de Itajaí em 2023 e 2024 sob a ótica da Teoria das Filas [recurso eletrônico] / Victor Freitas de Sousa. - 2025.

Orientadora: Valeriana Cunha.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Uberlândia, Graduação em Administração.

Modo de acesso: Internet.

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Administração. I. Cunha, Valeriana, 1974-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Graduação em Administração. III. Título.

CDU: 658

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091

Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo avaliar as operações do berço 3 do Porto de Itajaí nos anos de 2023 e 2024 por meio da aplicação da teoria das filas. A pesquisa buscou determinar as taxas de chegada e de atendimento dos navios, calcular indicadores como tempo médio de espera, tempo de permanência no sistema e número médio de embarcações em fila, além de avaliar a capacidade de atendimento do berço. O estudo adotou como método a coleta e análise de dados operacionais do porto, os quais foram tratados por meio de modelos matemáticos de filas, possibilitando mensurar o desempenho do sistema e identificar padrões de comportamento nas operações. Os resultados evidenciaram a ocorrência de situações de equilíbrio, sobrecarga e subutilização, dependendo da intensidade da demanda, permitindo diagnosticar pontos de estrangulamento e oportunidades de melhoria. Observou-se que a teoria das filas oferece suporte consistente para a avaliação da eficiência operacional, possibilitando recomendações para reduzir os tempos de espera, otimizar a utilização dos berços e aumentar a fluidez das operações portuárias. Conclui-se que o uso de ferramentas quantitativas aplicadas ao gerenciamento das operações contribui de forma significativa para a tomada de decisão, reforçando a importância de análises baseadas em evidências na gestão portuária.

Palavras-chave: Porto de Itajaí. Teoria das filas. Eficiência operacional. Gestão portuária.

ABSTRACT

This study aims to evaluate the operations of berth 3 at the Port of Itajaí in the years 2023 and 2024 through the application of queuing theory. The research sought to determine ship arrival and service rates, calculate indicators such as average waiting time, time spent in the system, and the average number of vessels in the queue, in addition to assessing the service capacity of the berth. The study adopted as its method the collection and analysis of operational data from the port, which were processed through mathematical queuing models, enabling the measurement of system performance and the identification of operational patterns. The results revealed situations of balance, overload, and underutilization depending on demand intensity, allowing for the diagnosis of bottlenecks and opportunities for improvement. It was observed that queuing theory provides consistent support for evaluating operational efficiency, enabling recommendations to reduce waiting times, optimize berth utilization, and improve the flow of port operations. The study concludes that the use of quantitative tools applied to operations management contributes significantly to decision-making, reinforcing the importance of evidence-based analyses in port management.

Keywords: Port of Itajaí. Queuing theory. Operational efficiency. Port management.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	7
REFERENCIAL TEÓRICO	8
Funcionamento de um porto	8
Teoria das Filas	9
Cálculos no modelo M/M/1	13
Cálculos no modelo M/M/C	14
METODOLOGIA.....	14
APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS	15
O Porto de Itajaí.....	15
Desempenho operacional real do Berço 3 entre janeiro e outubro de 2023 e 2024....	18
Cenários que estabilizam o sistema de atendimento no Berço 3	19
Simulação de redução das chegadas	19
Meses com sobrecarga em 2023 (julho, setembro e outubro)	20
Mês com sobrecarga em 2024 (julho).....	21
Simulação de aumento da capacidade de atendimento	22
Meses com sobrecarga em 2023 (julho, setembro e outubro)	22
Mês com sobrecarga em 2024 (julho).....	23
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	24
REFERÊNCIAS	25

1 INTRODUÇÃO

Desde os primórdios da história do Brasil, há uma relação íntima entre o país e o mar. Essa relação é mediada pelo porto, que não apenas possibilitou o envio de produtos extraídos e cultivados em território nacional para Portugal, como também viabilizou o fluxo de pessoas entre a metrópole e a colônia (Santos Júnior, 2016). Foi o meio de transporte utilizado para o tráfico de escravos africanos e, posteriormente, em 1808, desempenhou papel primordial na vinda da família real portuguesa para seu exílio em terras tropicais (Santos Júnior, 2016). Após a mudança temporária da realeza de Portugal para o Brasil, ocorreu a primeira abertura significativa das exportações para outras nações, ainda sob o intermédio português, marcando o início do comércio internacional de bens brasileiros (Santos Júnior, 2016).

Santos Júnior (2016) destaca que com a independência do Brasil, em 1822, o comércio com outros países se intensificou, e iniciou-se a construção e o desenvolvimento de portos em diferentes localidades do território nacional. O controle portuário, que passou inicialmente pelo Ministério da Marinha e pela Capitania dos Portos, tornou-se responsabilidade, em 1873, do Ministério da Agricultura, Comércio e Obras Públicas. Essa mudança reforçou a conexão funcional entre a estrutura industrial, agrícola e produtiva do país e os serviços portuários prestados em cada região (Santos Júnior, 2016). Conforme apontam Silva e Cocco (1999, p.16), por muitos anos os portos brasileiros apresentaram um perfil de alta setorização, voltado à movimentação de cargas específicas, sem flexibilidade “às variações da natureza do produto, às modificações da tecnologia dos transportes ou às alternativas de mercado”.

Assim, embora a atividade portuária esteja intimamente ligada à história do Brasil, marcada por uma colonização de caráter extrativista e pela limitação dos serviços portuários ao atendimento quase exclusivo das necessidades nacionais, observa-se uma lacuna de desenvolvimento quando comparado às grandes nações europeias. Como o modelo de gestão portuária brasileiro era, em sua maioria, de competência federal, a participação privada restringia-se a operações específicas, como a movimentação de minérios (Santos Júnior, 2016). Desse modo, prevalecia um monopólio estatal sobre cargas gerais e containerizadas, com acordos de trabalho coletivos e forte dependência de financiamento público para projetos de infraestrutura e aquisição de equipamentos de grande porte (Silva; Cocco, 1999).

Apenas em 1993, com a criação da Lei de Modernização dos Portos (Lei 8.630/93), o Brasil iniciou um processo de reestruturação do setor portuário. Essa legislação visava descentralizar o poder estatal sobre as instalações e promover melhorias estruturais, ampliando a possibilidade de participação do setor privado (Brasil, 2004). Contudo, foi somente em 2013, com a promulgação da Lei 12.815/13, que essa participação se tornou mais efetiva. A nova lei dispensou as empresas da exigência de possuir carga própria para transportar cargas de terceiros em terminais privados e trouxe maior clareza aos direitos concessórios, arrendatários e de autorização, por meio de critérios mais bem estabelecidos e uma maior segurança jurídica, incentivando investimentos privados nesse modal (Santos Júnior, 2016).

Com a coexistência de portos públicos, privados e arrendados, o cenário nacional passou a apresentar maior competitividade no mercado de exportação e importação. Fatores como tempo de carregamento e descarregamento, número de berços disponíveis para atracação, capacidade de receber embarcações de diferentes portes, entre outros, tornaram-se determinantes para a qualidade do atendimento prestado por cada terminal (Santos Júnior, 2016). Outrossim, visando auxiliar o escoamento de safra e colocar a região sul dentro dos planos governamentais para distribuição de insumos agrícolas no

futuro, ter noção da real capacidade operacional do porto faz com que planos mais adequados a realidade sejam aplicados. Na região norte, o governo tem desenvolvido planos nacionais de integração de transportes terrestres e marítimos para escoar a safra das regiões norte e nordeste (Ministério dos Transportes, 2025). Seria interessante contar com a participação da região sul em planos futuros, pois é a principal produtos de suínos, fumo, arroz, trigo, além de outros grãos (Castro, 2014).

O objetivo geral deste estudo é avaliar as operações do Porto de Itajaí, no ano de 2023 e 2024, a partir da aplicação da teoria das filas. Especificamente, busca-se determinar as taxas de chegada e de atendimento dos navios no porto; calcular os principais indicadores de filas, como tempo médio de espera, tempo no sistema e número médio de embarcações na fila; avaliar a capacidade de atendimento dos berços e o nível de utilização do porto sob diferentes cenários de demanda; e refletir sobre possíveis melhorias operacionais com base nos resultados obtidos, visando aumentar a eficiência do fluxo de navios e reduzir os tempos de espera. O porto de Itajaí, localizado no litoral catarinense, foi selecionado como objeto de análise devido à disponibilidade dos dados em seu próprio *website*, assim como pela disponibilidade dos responsáveis pelo setor logístico em disponibilizar outros dados através do e-mail. Ressalta-se que, para fins comparativos, foram considerados apenas os meses de janeiro a outubro de 2023, pois, no momento da finalização da coleta de dados, os valores de 2024 estavam disponíveis apenas até outubro.

Além dos objetivos supracitados, busca-se através deste trabalho atingir ou facilitar o alcance de alguns ODS (Objetivos de Desenvolvimento Sustentável) estipulados Organização das Nações Unidas (ONU) a fim de garantir o fim da pobreza, a proteção do meio ambiente e prosperidade, paz e qualidade de vida para as pessoas. Neste trabalho, abordar-se-á com mais ênfase os objetivos de número: nove, que visa “construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização exclusiva e sustentável e fomentar a inovação”; onze, que procura “tornar as cidades e comunidades mais inclusivas, seguras, resilientes e sustentáveis”; treze, que busca “adotar medidas urgentes para combater as alterações climáticas e os seus impactos”; e, principalmente, o objetivo quatorze que aspira “conservar e usar de forma sustentável os oceanos, mares e os recursos marinhos para o desenvolvimento sustentável” (Nações Unidas, [s. d.]).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Funcionamento de um porto

Inicialmente, cabe-se destacar que se tem quatro tipos de portos através de uma perspectiva acerca do tipo de carga que movimentam, assim podem ser Contêiner, no qual suas cargas são armazenadas nestes; Granel Sólido (*Dry Bulk*), que engloba produtos secos transportados em grandes volumes, sem embalagem, tais como soja, cimento ou carvão; Granel Líquido (*Liquid Bulk*), que também engloba produtos carregados em grande quantidade em estado líquido, como gasolina e óleos; e Carga Geral ou Terminais Multipropósito, que movimenta tanto produtos containerizados como cargas a granel (Azevedo; Chaves; Salles Neto, 2014).



Figura 1: Exemplo de Terminal Multipropósito no Porto de Itajaí, da empresa Poly Terminal.
Fonte: Poly (2023).

Neste trabalho, dar-se-á enfoque a carga containerizada, assim faz-se interessante compreender como ocorre a sua movimentação. Antes de se adotar o modelo dos contêineres, as cargas eram manuseadas manualmente, o que fazia com o que o tempo de carregamento fosse grande, pois carregar e descarregar estas embarcações demandava muito tempo (Fitzgerald, 1986). Ainda segundo Fitzgerald (1986), após a adoção do contêiner, foi possível carregar a mesma embarcação, que antes demorava uma grande quantidade de dias, desta vez em poucas horas.

A navegação passa também por três tipos de classificação, a navegação pode ser Navegação de Cabotagem, que é realizada entre portos brasileiros, utilizando-se obrigatoriamente de vias marítimas, podendo se utilizar de vias interiores também; Navegação Interior (fluvial e lacustre), que é a navegação utilizando exclusivamente as vias interiores entre portos brasileiros; e a Navegação de Longo Curso, que é realizada entre portos brasileiros e estrangeiros, podendo ela acontecer por vias marítimas, fluviais ou lacustre (Presidência da República, 2020).

Quanto a operação de um porto, essa se inicia através da programação de navios, nos quais são analisadas as condições de navegabilidade e prevê-se as operações durante um determinado tempo (Porto de Santos, *[s. d.]*). Ao chegar em um porto, o navio pode atracar diretamente em um berço, ou aguardar em um espaço chamado Área de Fundeio, que representa uma área no qual o navio pode ancorar próximo a costa, é nestes espaços que são formadas as filas (Porto de Santos, *[s. d.]*).

2.2 Teoria das Filas

A Teoria das Filas estuda situações em que a demanda por atendimento ou processamento excede temporariamente a capacidade disponível, gerando tempos de espera. Está presente em diferentes contextos, do comércio à indústria, e fornece ferramentas para analisar e equilibrar custos e tempos de atendimento, contribuindo para decisões mais eficientes e maior produtividade dos sistemas (Taha, 2008).

Jensen e Bard (2003) destacam que uma fila é formada quando a demanda excede a capacidade de atendimento de um serviço. Em outras palavras, trata-se da situação em

que é necessário aguardar para que um serviço ou processo seja realizado, devido à indisponibilidade momentânea de operadores para efetuar o atendimento.

A teoria das filas corresponde ao estudo sistemático das diversas formas de espera, tendo como objetivo otimizar o tempo e os custos associados a esse processo. Pode ser aplicada em situações cotidianas, como a chegada de um usuário a um estabelecimento e sua espera para ser atendido, ou em contextos industriais, como em uma linha de produção com número limitado de máquinas, o que provoca espera entre as etapas do processo produtivo. Embora não seja uma técnica de otimização propriamente dita, a teoria das filas busca, por meio da análise do desempenho do sistema, promover mudanças e aperfeiçoamentos que aumentem sua eficiência, equilibrando custos e tempos de espera (Hillier; Lieberman, 2013 e Taha, 2008).

Dessa forma, o estudo das filas pode ser utilizado para reduzir custos ou diminuir o tempo de espera. O custo de oportunidade, nesse contexto, envolve a escolha entre investir na ampliação da capacidade do sistema, por exemplo, aumentando o número de estações de atendimento, ou assumir os custos decorrentes da espera do cliente (Jensen; Bard, 2003). Em muitos casos, eliminar totalmente o tempo de espera implica despesas desproporcionais, motivo pelo qual se busca um equilíbrio que resulte em custos e tempos aceitáveis. Há, ainda, sistemas que não apresentam custos financeiros diretos, mas sim custos associados ao tempo que o usuário permanece na fila e à insatisfação causada pela demora. Nesses casos, deve-se considerar a comparação entre atender um usuário e atender outro que esteja em situação semelhante, utilizando a teoria das filas para encontrar soluções que beneficiem ambos sem sobrecarregar o sistema. (Taha, 2008).

A Figura 2 ilustra a relação entre o nível de serviço e os custos envolvidos em sistemas de atendimento. Observa-se que o custo de clientes à espera por unidade de tempo diminui à medida que o nível de serviço aumenta, enquanto o custo operacional da instalação de serviço por unidade de tempo cresce. O custo total resulta da soma dessas duas parcelas, apresentando um ponto mínimo que corresponde ao nível ótimo de serviço. Esse ponto representa o equilíbrio entre eficiência operacional e custos, sendo o ideal para minimizar despesas sem comprometer a qualidade do atendimento (Taha, 2008).

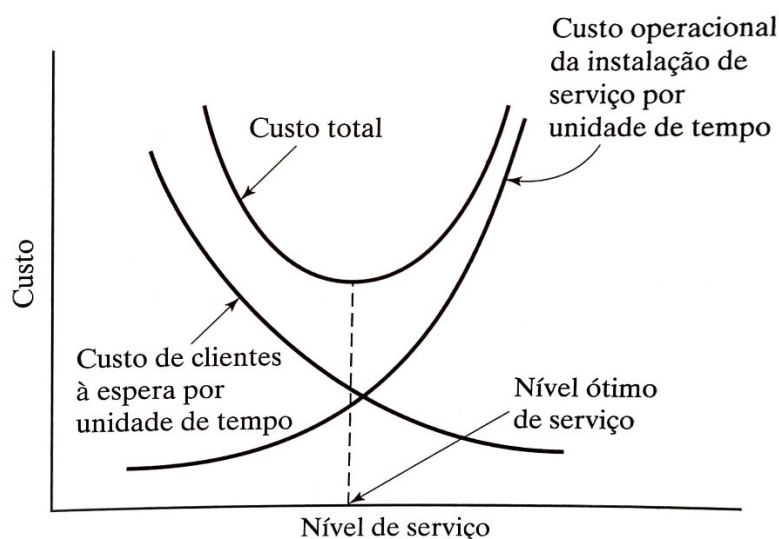


Figura 2: Modelo de Decisão de Filas Baseado em Custo.
Fonte: Taha (2008).

O sistema de filas é composto por cinco elementos: modelo de chegada dos usuários, modelo de serviço, número de atendentes, capacidade do estabelecimento e ordem de atendimento (Bronson, 1985).

O modelo de chegada representa o tempo entre chegadas e define também o número de possíveis clientes distintos a entrar no sistema (população solicitante). Pode ser determinístico ou definido por uma variável aleatória. É necessário identificar se o sistema dependerá do número de usuários já alocados ou se será independente, bem como verificar se os clientes chegam à fila de maneira isolada ou em grupo. Duas variáveis importantes devem ser consideradas nesse modelo: o impedimento, que ocorre quando o usuário, ao chegar, decide não entrar na fila devido ao seu comprimento; e a renegação, que ocorre quando o usuário já está na fila, mas desiste do atendimento em razão da demora (Bronson, 1985 e Hillier; Lieberman, 2013). Normalmente, o padrão estatístico que melhor representa a geração dos clientes ao longo do tempo é o processo de *Poisson*, no qual as chegadas ocorrem de forma aleatória e não são influenciadas pelo intervalo entre uma chegada e outra (Taha, 2008). Nesse caso, adota-se uma taxa média fixa, que desconsidera o número de clientes já presentes na fila e considera-se a fonte de entradas como infinita (Hillier; Lieberman, 2013).

O modelo de serviço refere-se ao tempo necessário para o atendimento de um usuário. Assim como o modelo de chegada, esse tempo pode ser determinístico ou definido por uma variável aleatória e pode depender do número de usuários já presentes no sistema. É relevante identificar se um único atendente é suficiente para concluir o serviço ou se serão necessários mais de um atendimento ou atendente (Bronson, 1985). Nesse modelo, também se considera o número de atendentes, sua disposição e a variação no tempo de atendimento, que pode ser diferente entre cada um dos atendentes (Hillier; Lieberman, 2013).

Ainda conforme Hillier e Lieberman (2013), o número de atendentes corresponde à quantidade de canais paralelos de serviço disponíveis no sistema (por exemplo, 1, 2 ou c canais). Esse parâmetro afeta diretamente a capacidade de processamento e os indicadores de desempenho (filas e tempos). Sistemas com um só atendente (um canal) e mais de um atendente (vários canais) têm fórmulas e comportamentos distintos; aumentar c reduz o tempo de espera, mas eleva o custo operacional, exigindo análise de equilíbrio entre custos e benefícios (Hillier; Lieberman, 2013).

A capacidade do sistema corresponde ao número máximo de usuários que podem estar simultaneamente em atendimento ou aguardando na fila. Essa capacidade pode ser ilimitada ou limitada. No caso de capacidade limitada, quando se atinge a ocupação máxima, impede-se a entrada de novos clientes na fila (Bronson, 1985).

Por fim, a disciplina das filas determina a ordem de atendimento dos usuários. Os principais tipos são: ordem de chegada, na qual o primeiro a chegar é o primeiro a ser atendido (FIFO – *First In, First Out*); ordem inversa de chegada, na qual o último a chegar é o primeiro a ser atendido (LIFO – *Last In, First Out*); e outros métodos de organização (Bronson, 1985). Quando se adota algum critério de preferência ou prioridade, podem ser necessárias fórmulas e disciplinas adicionais para calcular as probabilidades de tempo de espera (Jensen; Bard, 2003).

Para representar as características de uma fila, utiliza-se a notação de *Kendall*, em que $v/w/x/y/z$ indicam: v , o modelo de chegada; w , o modelo de serviço; x , o número de atendentes; y , a capacidade do sistema; e z , a disciplina da fila. Quando y e z não são especificados, considera-se $y = \infty$ (capacidade infinita) e $z = \text{FIFO}$ (Bronson, 1985). A Figura 3 apresenta as letras (e seus significados), que podem ser utilizados para designar o tipo de fila.

M	Distribuição Exponencial (Markoviana)
D	Distribuição Degenerada ou Determinística (tempos constantes)
E_k	Distribuição de Erlang (parâmetro de forma = k) sendo ($k = 1, 2, \dots$)
G	Distribuição Geral (não específica)

Figura 3: Símbolos e significados para classificação de Filas.

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Hillier e Lieberman (2013) e Bronson (1985).

A terminologia e a notação adotadas neste trabalho seguem as definições apresentadas por Hillier e Lieberman (2013), que descrevem variáveis e medidas de desempenho dos sistemas de filas. Nesse contexto, o estado do sistema indica o número total de clientes presentes no sistema (em atendimento e aguardando na fila), enquanto o comprimento da fila refere-se apenas ao número de clientes que esperam para iniciar o atendimento (Hillier; Lieberman, 2013). As demais notações utilizadas são apresentadas na Figura 4.

$N(t)$	Número de clientes no sistema de filas no instante t ($t \geq 0$)
$P_n(t)$	Probabilidade de n clientes no sistema de filas no instante t , dado o número no instante 0
S	Número de atendentes
λ_n	Taxa média de chegada (número de chegadas esperado por unidade de tempo) de novos clientes quando n clientes se encontram no sistema.
μ_n	Taxa média de atendimento (número de clientes que completam o atendimento por unidade de tempo) quando n clientes se encontram no sistema.

Figura 4: Notações Básicas de um Sistema de Filas.

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Hillier e Lieberman (2013).

Quando n for uma variável constante, não é necessária a sua representação explícita para a taxa média de atendimento e para a taxa média de chegada, utilizando-se apenas as notações μ e λ , respectivamente (Hillier; Lieberman, 2013). Ademais, quando n se mantém invariante, aplicam-se as fórmulas apresentadas na Figura 5.

$1/\lambda$	Tempo esperado entre atendimentos
$1/\mu$	Tempo de atendimento esperado
$\rho = \lambda/(s\mu)$	Fator de utilização para a instalação de atendimento. $\lambda/(s\mu)$ representa a fração de capacidade de atendimento que está sendo utilizada por clientes entrantes.

Figura 5: Notações para n constante.

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Hillier e Lieberman (2013).

O sistema pode apresentar uma condição transiente ou estável. A condição transiente ocorre no início da operação do sistema de filas, quando o número de clientes e o tempo de espera variam de forma significativa. Já o estado estável é caracterizado pelo equilíbrio do sistema, no qual essas variáveis apresentam um comportamento constante ao longo do tempo (Hillier; Lieberman, 2013). A Figura 6 apresenta algumas notações que dependem do estado estável do sistema para serem aplicadas.

P_n	Probabilidade de se ter exatamente n clientes no sistema
$L = \sum_{n=0}^{\infty} nP_n$	Número de clientes esperado no sistema de filas
$L_q = \sum_{n=s}^{\infty} n - s(P_n)$	Comprimento esperado da fila, com exceção dos que já estão sendo atendidos
W	Tempo de espera médio no sistema
W_q	Tempo de espera na fila para cada cliente individual

Figura 6: Notações para sistemas estáveis.

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Hillier e Lieberman (2013).

Outrossim, podem ser estabelecidas algumas relações entre as variáveis apresentadas anteriormente (vide Figura 7).

$L = \lambda W$	Fórmula de Little (para esta fórmula ser aplicada λ tem de ser constante para todo n)
$L_q = \lambda W_q$	Fórmula de Little aplicada à fila
$W = W_q + 1/\mu$	Considera-se para a existência dessa relação que o tempo de atendimento médio é constante e igual a $1/\mu$ para todo $n \geq 1$

Figura 7: Relações entre as variáveis L , W , L_q e W_q .

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Hillier e Lieberman (2013).

2.2.1 Cálculos no modelo M/M/1

O modelo M/M/1, que representa o atendimento realizado por apenas um atendente, apresenta indicadores são fundamentais para a compreensão da fila e de sua dinâmica. Entre eles, destaca-se o cálculo do número de indivíduos na fila (N_f); tempo de espera na fila (T_f); número de indivíduos no sistema, que engloba tanto a fila quanto o atendimento em si (N_s) e o tempo em sistema, que também une o atendimento à espera (T_s). Por fim, tem-se o cálculo para determinar qual a probabilidade de o sistema estar vazio na chegada de um novo cliente, ou seja, qual a possibilidade de este novo indivíduo chegar e ser imediatamente atendido (P_0) (Ferreira, 2017). A Figura 8 apresenta os cálculos para se encontrar o valor de cada um destes indicadores para o modelo M/M/1.

N_f	$\frac{\lambda^2}{\mu(\mu - \lambda)}$
T_f	$\frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)}$
N_s	$\frac{\lambda}{(\mu - \lambda)}$
T_s	$\frac{1}{(\mu - \lambda)}$
P_n	$\left(1 - \frac{\lambda}{\mu}\right) \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n$

Figura 8: Cálculos para variáveis modelo M/M/1.

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Andrade (2009).

2.2.2 Cálculos no modelo M/M/C

Além do modelo M/M/1, é possível simular o comportamento de uma fila com múltiplos atendentes. Esse modelo é denominado M/M/C, em que “C” corresponde ao número de estações de atendimento alimentadas por uma mesma fila (Ferreira, 2017). Diferentemente da notação utilizada por Hillier e Lieberman (2013), o autor consultado como referência para esse modelo, adotam a letra c em lugar de s para indicar a quantidade de atendentes. A maior disponibilidade de servidores impacta diretamente o desempenho do sistema, exigindo, portanto, métricas de cálculo específicas (vide figura 9).

C	Número de atendentes
$\vartheta = \text{Probabilidade de filas}$	$\frac{(c\rho)^c}{c! (1 - \rho)^{\rho^0}}$
N_f	$\frac{\rho\vartheta}{(1 - \rho)}$
T_f	$\frac{\vartheta}{\bar{\lambda}}$
N_s	$c\rho + \frac{\rho\vartheta}{(1 - \rho)}$
T_s	$\frac{1}{\mu} (1 + \frac{\vartheta}{c (1 - \rho)})$
P_0	$(1 + \frac{(c\rho)^c}{c! (c - \rho)} + \sum_{n=0}^{c-1} \frac{(c\rho)^n}{n!})^{-1}$

Figura 9: Cálculos para variáveis modelo M/M/C.

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Jain (1991) *apud* Ferreira (2017).

3 METODOLOGIA

Este trabalho apresenta um estudo sobre as operações do Porto de Itajaí sob a ótica da teoria das filas. Inicialmente, busca-se compreender o nível de atendimento do porto para, a partir disso, propor sugestões de melhorias operacionais ou estruturais que possam contribuir para a redução do tempo de espera de embarcações.

O presente estudo caracteriza-se como pesquisa aplicada, pois, por meio da elaboração de diagnósticos e da identificação de problemas com base em dados e fundamentação científica, objetiva-se sugerir soluções para a melhoria das atividades de uma organização (Fleury; Werlang, 2017). Possui também caráter descritivo-exploratório, uma vez que não apenas descreve a situação atual do porto, mas também propõe hipóteses de otimização de atendimento.

A coleta de dados foi realizada mediante solicitação por e-mail à Secretária Geral de Expediente e Gestão de Documentos (SEGER) do Porto de Itajaí. A solicitação foi posteriormente encaminhada à Diretoria-Geral de Operações Logísticas, que disponibilizou uma planilha em Excel contendo os registros de todas as operações portuárias realizadas do início de 2023 até 31 de outubro de 2024. Essa planilha incluía as seguintes informações: número de identificação; terminal de atracação; nome da embarcação; código da viagem (quando existente); tipo de operação (abastecimento, apoio, certificação, marinha, movimentação de carga, passageiros e reparo/manutenção), sendo que para este trabalho utilizou-se apenas a denominada “movimentação de carga”;

tipo de navegação (Apoio Marítimo, Apoio Portuário, Cabotagem, Longo Curso), data e horário de atracação (*Actual Time of Berthing* – ATB), data e horário de partida (*Actual Time of Departure* – ATD) e situação (se está desatracado ou atracado).

Calculou-se o tempo de atendimento de cada operação, expresso em horas e em dias, através da subtração do valor de ATD, pelo ATB. Em seguida, os dados foram filtrados para incluir exclusivamente as operações realizadas em um único berço: o berço 3, atualmente administrado pela Portonave. Localizado no município de Navegantes, adjacente a Itajaí, esse terminal ocupa a margem oposta da bacia do Rio Itajaí. A escolha desse berço deve-se ao fato de sua operação ser mais dinâmica que a dos demais, permitindo análises mais consistentes e realistas.

A partir desse filtro, foram geradas duas planilhas: uma contendo as operações de 2023 e outra com as de 2024. Para cada ano, simulou-se a taxa média de chegada (λ), pois não se foi possível determinar exatamente o horário da chegada do navio, apenas seu horário de atracação. Essa simulação foi feita através da divisão do total de atracações mensais pelo número de dias em que houve atendimento no porto. Por exemplo, em janeiro, o porto operou durante 25 dias e atendeu 28 navios, resultando em uma taxa de chegada de 1,12 navio por dia. Já a taxa média de atendimento (μ) foi calculada a partir da média das diferenças, em dias, entre o horário de atracação (ATB) e o horário de partida (ATD) para cada mês.

Com base nos valores de λ e μ , calcularam-se: o fator de utilização da instalação (ρ), o tempo esperado entre atendimentos ($1/\lambda$), o tempo médio de atendimento ($1/\mu$), o número médio de embarcações na fila (N_f), o número médio de embarcações no sistema (N_s), o tempo médio de espera na fila (T_f), o tempo médio no sistema (T_s) e a probabilidade de não haver embarcações aguardando (P_0).

Os resultados indicaram que, em alguns meses, o fator de utilização ultrapassou 1, o que pode indicar sobrecarga do sistema. Diante disso, foram consideradas duas possibilidades para melhoria:

- a. Aumento da capacidade de atendimento, passando de um para dois berços, de modo a atender o mesmo volume de embarcações com mais portos de atracação;
- b. Redução da demanda, simulando cenários com 80%, 88%, 90% e 95% do número total de chegadas.

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Nesta seção, será feita uma breve apresentação do Porto de Itajaí e, em seguida, são apresentados os resultados obtidos a partir da aplicação da teoria das filas nas operações do berço 3, com os principais indicadores de desempenho, análises descritivas e simulações de cenários alternativos. O objetivo é evidenciar o comportamento do sistema nos anos de 2023 e 2024, identificando períodos de equilíbrio, sobrecarga e subutilização, além de propor reflexões sobre possíveis melhorias operacionais.

4.1 O Porto de Itajaí

O Porto de Itajaí está localizado na foz do rio Itajaí-Açu, na costa do estado de Santa Catarina, a pouco mais de 100 km da capital, Florianópolis. Em um raio de 600 km, encontram-se algumas das principais cidades do Sul e Sudeste do Brasil, como Porto Alegre, Curitiba e São Paulo (Porto de Itajaí, 2011). Essa proximidade aos grandes centros posiciona o porto como um importante elo logístico entre o Sul do país e o

exterior, sendo um dos principais portos brasileiros em volume de exportações (Santos; Pozo, 2020).



Figura 10: Porto de Itajaí.
Fonte: Porto de Itajaí (2011).



Figura 11: Localização do Porto.
Fonte: Porto de Itajaí (2011).

Registros históricos apontam a importância do transporte marítimo para a região desde o século XIX, embora os primeiros estudos técnicos para a construção do porto só tenham ocorrido em 1905. As primeiras obras foram iniciadas em 1914. Em 1938, foi construído o primeiro trecho de cais, concluído em 1956. Em 1966, o porto passou a ser classificado como “porto organizado” e ficou subordinado ao Departamento Nacional de

Portos e Vias Navegáveis. Com a criação da PORTOBRÁS (Empresa de Portos do Brasil S.A.) em 1975, a administração passou para a gestão estatal. Após a extinção da PORTOBRÁS, o porto foi administrado pela CODESP (Companhia Docas do Estado de São Paulo) entre 1990 a 1995, sendo posteriormente delegado à gestão do Município de Itajaí por um período de 25 anos, com possibilidade de renovação (Porto de Itajaí, 2011 e Albertin, 2011).

A municipalização atendeu a uma demanda popular por soluções mais próximas e ágeis para os problemas do terminal, reforçando a conexão do porto com a cidade. Diferentemente de outros grandes portos brasileiros, o Porto de Itajaí mantém forte vínculo com a comunidade local, cuja economia é historicamente ligada à pesca, atividade que levou o município a ser reconhecido, em 2023, como a capital nacional da pesca (Município de Itajaí, 2023 e Porto de Itajaí, 2011). Os arrendamentos promovidos pelo município possibilitaram a entrada do setor privado na gestão de terminais, o que resultou em avanços na transformação digital e na incorporação de novas tecnologias às operações portuárias (Porto de Itajaí, 2011).

O porto enfrentou duas tragédias ambientais de grande impacto. A primeira ocorreu em 1983, quando fortes chuvas nas cabeceiras do rio provocaram uma enchente que elevou o volume das águas a níveis extraordinários, causando o colapso de parte do cais. Após a reconstrução, em 2008, uma nova enchente, ainda mais severa, destruiu grande parte da infraestrutura. O Governo Federal, por meio de medida provisória, destinou recursos para a reconstrução das cidades atingidas. As obras de restauração do porto foram concluídas em 2010, incluindo a reconstrução dos dois berços pré-existentis e a dragagem para aprofundamento dos canais fluviais (Porto de Itajaí, 2011 e Albertin, 2011).

Quanto à sua estrutura, o Porto de Itajaí possui duas bacias de evolução, ambas com profundidade mínima de 14 metros. O comprimento total é de 1.140 metros, com largura de 400 metros de diâmetro na primeira bacia e 500 metros na segunda (o diâmetro é relevante para avaliar a capacidade de manobra das embarcações, por exemplo, se há a possibilidade de girar o navio para atracação e desatracação). O canal externo tem 5.760 metros de extensão, com largura variando entre 170 e 190 metros, conforme o ponto do rio Itajaí-Açu. Já o canal interno possui 3.680 metros (incluindo as duas bacias) e a largura entre 170 e 180 metros (Porto de Itajaí, 2023).

O complexo portuário engloba diversos terminais: o Porto Público de Itajaí (atualmente em processo de lançamento de edital para arrendamento provisório); a Portonave, terminal privado de contêineres em Navegantes; o Terminal Barra do Rio; o Terminal Braskarne, vinculado à Seara, subsidiária da multinacional JBS; o Terminal Trocadeiro; o Teporti (Terminal Portuário Itajaí); e a Poly Terminais (Porto de Itajaí, 2023 e Município de Itajaí, 2023, 2024).

Atualmente, o Porto Público dispõe de dois berços de atracação, com 490 metros de extensão, um pátio de 80.206,63 m² e um píer turístico de 78 metros. A Portonave conta com um cais linear de 900 metros e três berços. O Terminal Barra do Rio possui dois cais de atracação de 220 metros cada. O Terminal Braskarne dispõe de um berço para embarcações de até 190 metros de comprimento, com calado reduzido de 8,1 metros. O Terminal Trocadeiro oferece um berço de 150 metros de extensão e profundidade de 10 metros. O Terminal Teporti possui um cais de 150 metros de comprimento e calado máximo de 8,6 metros. Por fim, a Poly Terminais conta com píer de 150 metros (Porto de Itajaí, 2023).

4.2 Desempenho operacional real do Berço 3 entre janeiro e outubro de 2023 e 2024

Com base nos dados coletados, foram calculados e apresentados nas Tabelas 1 e 2 os principais indicadores do sistema de filas, que permitem analisar o desempenho no berço 3 e o comportamento da demanda ao longo dos meses avaliados no ano de 2023 e 2024.

Tabela 1: Indicadores mensais do sistema de filas: parâmetros de entrada, saída e desempenho (λ , μ , ρ , Nf, Ns, Tf, Ts, P0), de janeiro a outubro de 2023.

Mês	λ	μ	ρ	$1/\lambda$	$1/\mu$	Nf	Ns	Tf	Ts	P0
Janeiro	1,12	1,26	0,89	0,89	0,79	6,86	7,75	6,13	6,92	0,11
Fevereiro	1,18	1,25	0,94	0,85	0,80	15,56	16,50	13,17	13,96	0,06
Março	1,03	1,25	0,83	0,97	0,80	3,93	4,76	3,81	4,61	0,17
Abril	1,03	1,32	0,78	0,97	0,76	2,82	3,61	2,73	3,49	0,22
Maio	1,04	1,12	0,93	0,96	0,89	11,74	12,67	11,31	12,20	0,07
Junho	1,12	1,22	0,92	0,90	0,82	9,89	10,80	8,87	9,69	0,08
Julho	1,11	1,10	1,01	0,90	0,91	-74,82	-73,81	-67,34	-66,43	-0,01
Agosto	1,00	1,33	0,75	1,00	0,75	2,30	3,05	2,30	3,05	0,25
Setembro	1,12	1,10	1,01	0,89	0,91	-78,27	-77,26	-70,04	-69,13	-0,01
Outubro	1,00	0,88	1,14	1,00	1,14	-9,50	-8,37	-9,50	-8,37	-0,14

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 2: Indicadores mensais do sistema de filas: parâmetros de entrada, saída e desempenho (λ , μ , ρ , Nf, Ns, Tf, Ts, P0), de janeiro a outubro de 2024.

Mês	λ	μ	ρ	$1/\lambda$	$1/\mu$	Nf	Ns	Tf	Ts	P0
Janeiro	1,53	1,79	0,85	0,65	0,56	5,04	5,90	3,29	3,84	0,15
Fevereiro	1,66	1,95	0,85	0,60	0,51	4,81	5,66	2,91	3,42	0,15
Março	1,47	1,71	0,86	0,68	0,58	5,14	6,00	3,50	4,09	0,14
Abril	1,57	1,69	0,93	0,64	0,59	12,90	13,83	8,21	8,80	0,07
Maio	1,34	1,48	0,91	0,74	0,67	8,92	9,83	6,64	7,31	0,09
Junho	1,43	1,57	0,91	0,70	0,64	8,99	9,90	6,29	6,93	0,09
Julho	1,38	1,33	1,04	0,72	0,75	-24,57	-23,53	-17,75	-16,99	-0,04
Agosto	1,15	1,19	0,96	0,87	0,84	24,91	25,87	21,69	22,53	0,04
Setembro	1,41	1,56	0,90	0,71	0,64	8,06	8,96	5,73	6,37	0,10
Outubro	1,33	1,53	0,87	0,75	0,66	6,06	6,93	4,54	5,20	0,13

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em 2023, a taxa média de chegada (λ) variou de um (agosto) a 1,18 (fevereiro). Isso indica que, em todos os meses, chegava um navio por dia de operação. O tempo médio entre chegadas ($1/\lambda$) variou entre 0,85 e um dia. Fevereiro apresenta a maior pressão sobre o sistema com menor intervalo entre chegadas. As taxas de chegadas são relativamente próximas ao longo dos meses, o que sugere uma demanda estável, mas alta o suficiente para gerar sobrecarga. Em 2024, λ varia entre 1,15 (agosto) e 1,66 (fevereiro). Isso indica que em fevereiro a taxa média de chegada foi de aproximadamente 1,7 navio por dia de operação. Percebe-se que, assim como em 2023, os meses que apresentaram a menor e a maior taxa de chegadas permaneceram os mesmos em 2024.

Os valores de 2023 indicam que a taxa média de atendimento do berço (μ) é de pouco mais de um navio por dia, o que é suficiente apenas quando a taxa de chegada não supera a capacidade de atendimento. Em 2024, apenas o mês de agosto apresentou tempo médio de atendimento ($1/\mu$) menor que o mês correspondente em 2023. O índice ρ (taxa

de utilização), que indica a proporção entre taxa de chegada (λ) e taxa de serviço (μ), mostrou-se estável ($\rho < 1$) de janeiro a junho e em agosto de 2023, ou seja, a capacidade de atendimento foi suficiente para a demanda. Em julho, setembro e outubro, meses em que $\rho > 1$, são meses em que houve sobrecarga, o que significa que chegaram mais solicitações do que a capacidade de processamento, levando à tendência de aumento indefinido na fila. A análise para 2024 apresentou apenas o mês de julho operando com sobrecarga.

Em relação ao comportamento das filas no berço 3, os indicadores Nf (número médio de clientes na fila) e Ns (número médio de clientes no sistema, que inclui fila e atendimento) só podem ser interpretados de forma consistente quando a taxa de utilização (ρ) é menor que 1. Quando $\rho > 1$, o modelo teórico utilizado deixa de representar adequadamente a realidade, e os valores obtidos não têm significado coerente. Por esse motivo, para o ano de 2023, os resultados de julho, setembro e outubro, meses em que ρ foi maior que um, não foram considerados para interpretação. Para 2024, o mês de julho foi desconsiderado nessa análise.

Nos meses de 2023 em que o sistema se manteve estável ($\rho < 1$), destaca-se maio, que apresentou o maior acúmulo na fila (Nf = 11,74) e o maior número médio de clientes no sistema (Ns = 12,67). Nos meses de 2024 em que o sistema se manteve estável ($\rho < 1$), destaca-se o mês de agosto, que apresentou o maior acúmulo na fila (Nf = 24,91) e o maior número médio de clientes no sistema (Ns = 25,87). Esse comportamento indica possível desequilíbrio momentâneo entre a taxa de chegada e a taxa de atendimento, resultando em maior espera e ocupação do sistema nesses meses.

Em relação aos tempos médios, o indicador Tf representa o tempo médio que um cliente permanece na fila, enquanto Ts corresponde ao tempo médio total no sistema (fila mais atendimento). Nos meses de 2023 e 2024 em que o sistema esteve estável ($\rho < 1$), observa-se uma tendência coerente: quanto maior o acúmulo na fila, maiores são também os tempos médios. O pior caso registrado em 2023 foi no mês maio, com Tf = 11,3 horas e Ts = 12,2 horas, indicando significativa espera antes do atendimento e alta ocupação do sistema. Em 2024 os maiores valores de Tf e Ts foram registrados em agosto (21,69 e 22,53, respectivamente).

Assim como ocorreu com os indicadores Nf e Ns, os valores negativos de julho, setembro e outubro 2023 e julho de 2024 refletem o fato de que, nesses períodos, a taxa de utilização foi superior a 1, situação em que o modelo teórico aplicado não é adequado para representar o cenário real. Nesses casos, os resultados deixam de ter interpretação confiável, pois o modelo não se aplica.

O indicador P_0 , que representa a probabilidade de o sistema estar vazio, tende a diminuir à medida que a demanda se aproxima da capacidade máxima de atendimento, comportamento esperado em sistemas de filas.

4.3 Cenários que estabilizam o sistema de atendimento no Berço 3

Considerando que, nos meses de julho, setembro e outubro de 2023 e julho de 2024, o sistema apresentou sobrecarga ($\rho > 1$), foram adotadas duas abordagens, apresentadas a seguir, para análise e proposição de melhorias.

4.3.1 Simulação de redução das chegadas

A primeira abordagem consistiu em simular uma redução da taxa de chegada em diferentes níveis, dependendo de cada situação.

4.3.1.1 Meses com sobrecarga em 2023 (julho, setembro e outubro)

Em 2023, foram realizadas simulações considerando reduções na taxa de chegada para 90%, 88% e 80% dos valores originais, a fim de avaliar o impacto na taxa de utilização do sistema nos meses com sobrecarga. Os resultados mostraram que somente com 80% da taxa de chegada real foi possível obter taxa de utilização inferior a um em todos os meses, garantindo estabilidade ao sistema (vide Tabela 3).

Tabela 3: Indicadores mensais do sistema de filas: parâmetros de entrada, saída e desempenho (λ , μ , ρ , Nf, Ns, Tf, Ts, P0), de janeiro a outubro de 2023 com taxa de chegada de 80% para os meses de julho, setembro e outubro.

Chegadas 80%	λ	μ	ρ	$1/\lambda$	$1/\mu$	Nf	Ns	Tf	Ts	P0
Janeiro	1,12	1,26	0,89	0,89	0,79	6,86	7,75	6,13	6,92	0,11
Fevereiro	1,18	1,25	0,94	0,85	0,80	15,56	16,50	13,17	13,96	0,06
Março	1,03	1,25	0,83	0,97	0,80	3,93	4,76	3,81	4,61	0,17
Abril	1,03	1,32	0,78	0,97	0,76	2,82	3,61	2,73	3,49	0,22
Maio	1,04	1,12	0,93	0,96	0,89	11,74	12,67	11,31	12,20	0,07
Junho	1,12	1,22	0,92	0,90	0,82	9,89	10,80	8,87	9,69	0,08
Julho	0,89	1,10	0,81	1,13	0,91	3,48	4,29	3,91	4,83	0,19
Agosto	1,00	1,33	0,75	1,00	0,75	2,30	3,05	2,30	3,05	0,25
Setembro	0,89	1,10	0,81	1,12	0,91	3,47	4,28	3,88	4,78	0,19
Outubro	0,80	0,88	0,91	1,25	1,14	9,03	9,94	11,29	12,42	0,09

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da alteração nos dados, observa-se que o tempo médio entre as chegadas ($1/\lambda$) no berço 3 é de 0,99 dias, o que indica que, em média, chegou aproximadamente um navio por dia de operação. O menor intervalo foi registrado em fevereiro, com 0,85 dia entre as chegadas. Esse resultado pode estar relacionado ao fato de fevereiro ter menos dias disponíveis, o que, mantendo-se uma meta mensal de atracações constante, exige intervalos menores entre as chegadas para atingir as métricas esperadas.

A média do tempo médio de atendimento ($1/\mu$) no ano de 2023 foi de 0,85 dia, o que indica que para processar uma embarcação no sistema, incluindo todas as etapas de carga/descarga, liberação de documentação e demais procedimentos, leva-se menos de um dia. Em alguns casos, é possível concluir o atendimento de uma embarcação e iniciar o de outra no mesmo berço dentro do mesmo dia. As melhores taxas de atendimento ocorreram em agosto e abril, enquanto as piores se deram em julho, setembro e, especialmente, outubro. Observa-se que os meses de maior subutilização do sistema (ρ) foram agosto (75% de ocupação), abril (78%) e março (82%). Já os meses de maior ocupação foram setembro, julho e outubro, respectivamente, todos com taxa de utilização originalmente acima de 100%, caracterizando sobrecarga.

A quantidade média de embarcações na fila (Nf) em 2023 foi de aproximadamente cinco (4,98) embarcações. Os maiores valores ocorreram em fevereiro (cerca de 16 embarcações) e maio (aproximadamente 12). O número médio de embarcações no sistema (Ns) foi, em média, de seis navios (5,84) no ano de 2023. Os mesmos meses de fevereiro e maio se destacaram como períodos de maior acúmulo. O tempo médio que o navio passa no sistema (Ts) e o tempo médio na fila (Tf) foi de respectivamente cerca de 139 horas (5,78 dias) e 119 horas (4,93 dias). Assim, deduz-se que cada navio permaneceu, em média, entre 20 e 21 horas (0,85 dias) efetivamente em atendimento no berço. A probabilidade média de o berço estar vazio no momento da chegada de uma

nova embarcação (P_0) foi de 15%, indicando boa ocupação do berço nos meses analisados. Os menores valores ocorreram em fevereiro (6%), maio (7%) e junho (8%), sugerindo maior pressão nesses períodos. Já as maiores probabilidades foram registradas em agosto (25%) e abril (22%), indicando maior disponibilidade para receber novas embarcações nesses períodos.

4.3.1.2 Mês com sobrecarga em 2024 (julho)

Ainda considerando a primeira abordagem, que consiste em simular a redução das chegadas nos meses com sobrecarga de capacidade, observa-se que, em 2024, apenas julho apresentou fator de utilização (ρ) superior a 1. Assim como realizado na análise de 2023, e com o objetivo de possibilitar a interpretação dos dados, foram promovidas simulações com reduções na taxa de chegada especificamente para o mês de julho. Nesta etapa, foram testados três cenários: 95%, 90% e 80% das chegadas originais.

Os resultados mostram que, já com 90% da taxa de chegada, o sistema atinge um indicador de utilização normalizado ($\rho < 1$), operando de forma estável. A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos para cada simulação.

Tabela 4: Indicadores mensais do sistema de filas: parâmetros de entrada, saída e desempenho (λ , μ , ρ , N_f , N_s , T_f , T_s , P_0), de janeiro a outubro de 2024 com taxa de chegada de 90% para o mês de julho.

Chegadas 90%	λ	μ	P	$1/\lambda$	$1/\mu$	N_f	N_s	T_f	T_s	P_0
Janeiro	1,53	1,79	0,85	0,65	0,56	5,04	5,90	3,29	3,84	0,15
Fevereiro	1,66	1,95	0,85	0,60	0,51	4,81	5,66	2,91	3,42	0,15
Março	1,47	1,71	0,86	0,68	0,58	5,14	6,00	3,50	4,09	0,14
Abril	1,57	1,69	0,93	0,64	0,59	12,90	13,83	8,21	8,80	0,07
Maio	1,34	1,48	0,91	0,74	0,67	8,92	9,83	6,64	7,31	0,09
Junho	1,43	1,57	0,91	0,70	0,64	8,99	9,90	6,29	6,93	0,09
Julho	1,25	1,33	0,94	0,80	0,75	14,71	15,65	11,81	12,56	0,06
Agosto	1,15	1,19	0,96	0,87	0,84	24,91	25,87	21,69	22,53	0,04
Setembro	1,41	1,56	0,90	0,71	0,64	8,06	8,96	5,73	6,37	0,10
Outubro	1,33	1,53	0,87	0,75	0,66	6,06	6,93	4,54	5,20	0,13

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o ano de 2024, observa-se que a taxa média de chegadas de embarcações (λ) foi superior à registrada no mesmo período do ano anterior. O tempo médio entre chegadas ($1/\lambda$) foi de 0,71 dia, o que corresponde a aproximadamente 17 horas entre a chegada de uma embarcação e outra. Destacam-se fevereiro, com o menor intervalo entre chegadas (0,60 dia), e agosto com o maior intervalo (0,87 dia). O tempo médio de atendimento ($1/\mu$) foi de 0,63 dia, ou aproximadamente 15 horas, com destaque para os mesmos meses: o melhor desempenho foi registrado em fevereiro (0,51 dia) e o atendimento mais lento ocorreu em agosto (0,84 dia). Vale ressaltar que, em comparação com 2023, houve aumento do tempo entre chegadas e do tempo de atendimento em agosto, mês que, no ano anterior, figurava entre os de melhor desempenho para ambos os indicadores.

Quanto à taxa de utilização do sistema (ρ), a ocupação média do berço aumentou de aproximadamente 85% em 2023 para 89% em 2024. A maior ocupação ocorreu em julho, quando as chegadas superaram a capacidade de atendimento, e em agosto, que apresentou 96% de ocupação. Os meses mais ociosos foram janeiro, fevereiro e março, com ocupação entre 84 e 86%. A média de embarcações na fila (N_f) foi de 7,59 navios e

a média no sistema (N_s) foi de 8,48 navios. Os menores valores de fila ocorreram em janeiro, fevereiro e março (cerca de cinco embarcações na fila e seis no sistema). Já os maiores valores foram registrados em agosto (24,91 na fila e 25,87 no sistema), julho (14,71 na fila e 15,65 no sistema) e abril (12,90 na fila e 13,83 no sistema).

O tempo médio em fila (T_f) foi de 5,37 dias e o tempo médio em sistema (T_s) foi de aproximadamente seis dias. Os menores tempos de espera foram registrados em janeiro, fevereiro e março (cerca de três dias na fila e três a quatro dias no sistema). O maior tempo de espera ocorreu em agosto (21,69 dias na fila e 22,53 no sistema), seguido por julho (11,81 dias na fila e 12,56 dias no sistema).

Por fim, a probabilidade média do sistema estar vazio no momento da chegada de uma nova embarcação (P_0) em 2024 foi de 11%. As menores probabilidades ocorreram em agosto (4%) e julho (6%), enquanto as maiores foram registradas em janeiro, fevereiro e março (entre 14% e 15%).

4.3.2 Simulação de aumento da capacidade de atendimento

A segunda abordagem consistiu na ampliação da capacidade de atendimento, simulando a operação com dois canais de atendimento, o que equivale a operar com dois berços em vez de apenas um. Para os meses críticos, adotou-se o modelo M/M/2, no qual as embarcações que antes eram atendidas exclusivamente pelo berço 3 passariam a ser distribuídas entre dois berços, permitindo atendimento simultâneo. Conforme descrito no referencial teórico, as fórmulas utilizadas nesse modelo são diferentes daquelas aplicadas anteriormente no modelo M/M/1, que considera apenas um canal de atendimento.

No modelo M/M/2, é introduzido um novo indicador, ∂ , utilizado para representar a probabilidade de ocorrência de fila. Já para os demais meses, que permaneceram sob a modelagem M/M/1, o cálculo de ∂ não se aplica, sendo registrado como N/A nas tabelas, uma vez que este indicador não se enquadra na lógica de sistemas com canal único.

4.3.2.1 Meses com sobrecarga em 2023 (julho, setembro e outubro)

A Tabela 5 apresenta os resultados referentes ao ano de 2023, considerando a simulação de operação com dois berços de atendimento nos meses críticos de julho, setembro e outubro.

Tabela 5: Indicadores mensais do sistema de filas: parâmetros de entrada, saída e desempenho (λ , μ , ρ , N_f , N_s , T_f , T_s , P_0 , ∂), de janeiro a outubro de 2023 com dois berços de atendimento (M/M/2) nos meses de julho, setembro e outubro.

M/M/2 (jul, set, out)	λ	μ	ρ	$1/\lambda$	$1/\mu$	∂	N_f	N_s	T_f	T_s	P_0
Janeiro	1,12	1,26	0,89	0,89	0,79	N/A	6,86	7,75	6,13	6,92	0,11
Fevereiro	1,18	1,25	0,94	0,85	0,80	N/A	15,56	16,50	13,17	13,96	0,06
Março	1,03	1,25	0,83	0,97	0,80	N/A	3,93	4,76	3,81	4,61	0,17
Abril	1,03	1,32	0,78	0,97	0,76	N/A	2,82	3,61	2,73	3,49	0,22
Mai	1,04	1,12	0,93	0,96	0,89	N/A	11,74	12,67	11,31	12,20	0,07
Junho	1,12	1,22	0,92	0,90	0,82	N/A	9,89	10,80	8,87	9,69	0,08
Julho	1,11	1,10	0,51	0,90	0,91	0,31	0,32	1,33	0,28	1,20	0,30
Agosto	1,00	1,33	0,75	1,00	0,75	N/A	2,30	3,05	2,30	3,05	0,25
Setembro	1,12	1,10	0,51	0,89	0,91	0,31	0,32	1,33	0,28	1,19	0,30
Outubro	1,00	0,88	0,57	1,00	1,14	0,42	0,55	1,68	0,42	1,68	0,28

Fonte: Elaborado pelo autor.

O primeiro dado que se destaca nesta análise é a taxa de utilização do sistema (ρ), que apresentaria porcentagens próximas a 50% de ocupação nos meses de julho, setembro e outubro. Além disso, a probabilidade de ocorrência de filas (θ) também se manteria baixa, variando de 30,98% em setembro (menor valor) a 41,62% em outubro (maior valor). A probabilidade de encontrar o sistema vazio (P_0) nesses meses aumentaria de forma significativa. Antes, essa probabilidade era de aproximadamente 18% em julho e setembro, e de cerca de 9% em outubro. Com a operação simulada de um berço adicional, esses valores passariam para 27% e 29%, evidenciando maior chance de ociosidade no sistema para o mesmo volume de embarcações.

No que diz respeito ao comportamento das filas, a quantidade média de navios em fila seria inferior a uma embarcação, com 0,32 em julho e setembro e 0,55 em outubro. Já o número médio de navios no sistema apresentaria valores ligeiramente superiores a 1, com 1,33 em julho e setembro e 1,68 em outubro. Quanto aos tempos médios, a melhoria seria expressiva quando comparada à simulação que reduzia a quantidade de chegadas. O tempo médio no sistema, que antes era de aproximadamente quatro dias em julho e setembro e cerca de 12 dias em outubro, passaria para pouco mais de um dia em julho e setembro, e para 1,68 dia em outubro.

4.3.2.1 Mês com sobrecarga em 2024 (julho)

Para o ano de 2024, também foi realizada a simulação com dois berços de atendimento para o mês de julho, com o objetivo de ajustar o valor de ρ para menor que 1. Assim como em 2023, os demais meses não tiveram seus indicadores alterados e o valor de θ foi considerado como "Não Aplicável" (N/A). A Tabela 6 apresenta os resultados com a modelagem M/M/2 para o mês de julho.

Tabela 6: Indicadores mensais do sistema de filas: parâmetros de entrada, saída e desempenho (λ , μ , ρ , Nf, Ns, Tf, Ts, P_0 , θ), de janeiro a outubro de 2024 com dois berços de atendimento (M/M/2) no mês de julho.

M/M/2 (julho)	λ	μ	P	$1/\lambda$	$1/\mu$	θ	Nf	Ns	Tf	Ts	P0
Janeiro	1,53	1,79	0,85	0,65	0,56	N/A	5,04	5,90	3,29	3,84	0,15
Fevereiro	1,66	1,95	0,85	0,60	0,51	N/A	4,81	5,66	2,91	3,42	0,15
Março	1,47	1,71	0,86	0,68	0,58	N/A	5,14	6,00	3,50	4,09	0,14
Abril	1,57	1,69	0,93	0,64	0,59	N/A	12,90	13,83	8,21	8,80	0,07
Maio	1,34	1,48	0,91	0,74	0,67	N/A	8,92	9,83	6,64	7,31	0,09
Junho	1,43	1,57	0,91	0,70	0,64	N/A	8,99	9,90	6,29	6,93	0,09
Julho	1,38	1,33	0,52	0,72	0,75	0,33	0,37	1,41	0,24	1,02	0,29
Agosto	1,15	1,19	0,96	0,87	0,84	N/A	24,91	25,87	21,69	22,53	0,04
Setembro	1,41	1,56	0,90	0,71	0,64	N/A	8,06	8,96	5,73	6,37	0,19
Outubro	1,33	1,53	0,87	0,75	0,66	N/A	6,06	6,93	4,54	5,20	0,20

Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim como observado em 2023, a aplicação da modelagem M/M/2 para o mês de julho de 2024 proporcionaria uma redução significativa nos indicadores de sobrecarga. Verificar-se-ia que o fator de utilização (ρ) passaria para 52%, um patamar muito inferior ao registrado no cenário original, garantindo folga operacional. A probabilidade de formação de fila (θ) seria de 33%, valor semelhante ao verificado nos meses críticos de 2023 após a adoção de dois berços. O número médio de embarcações na fila (Nf) seria reduzido para 0,37, e o número médio no sistema (Ns) seria de 1,41. O tempo médio em

fila (Tf), que no cenário original era de vários dias, cairia para aproximadamente seis horas, enquanto o tempo médio no sistema (Ts) passaria para 1,02 dia, evidenciando o ganho de eficiência.

A probabilidade de o sistema estar vazio (P_0) na chegada de uma nova embarcação atingiria 29%, o que representaria um aumento expressivo em relação ao cenário original de 2024 para este mês e alinhado aos ganhos verificados em 2023 nos meses em que a mesma abordagem seria aplicada (julho, setembro e outubro).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos dados e análises realizadas, verifica-se que as operações no berço 3 do Porto de Itajaí são expressivas e relevantes para o desenvolvimento do setor portuário no Brasil. Ademais, os resultados evidenciam que, na maioria dos meses analisados, o porto conseguiu atender a demanda de navios que chegaram e atracaram no berço 3. No entanto, no ano de 2023, os meses de julho, setembro e outubro registraram atrasos que comprometeram a fluidez no atendimento, situação também observada em julho de 2024.

Considerando que a demanda dos anos analisados superou a capacidade de atendimento do berço 3, avalia-se como alternativa a ampliação da operação com a utilização de dois berços nos meses críticos, o que permitiria eliminar a sobrecarga e reduzir as filas e os tempos de espera. Contudo, tal medida aumentaria a probabilidade de ociosidade do sistema.

Destaca-se que esse estudo permitiu avaliar as operações do Porto de Itajaí nos anos de 2023 e 2024, considerando o período de janeiro a outubro, por meio da aplicação da teoria das filas. Inicialmente, foram estimadas as taxas de chegada e de atendimento dos navios, fornecendo a base necessária para a modelagem do sistema. A partir desses parâmetros, foram calculados os principais indicadores de desempenho em filas, como tempo médio de espera, tempo total no sistema e número médio de embarcações na fila, evidenciando os pontos críticos do processo operacional. A análise da capacidade de atendimento do berço 3 e do nível de utilização do porto em diferentes cenários possibilitou identificar situações de equilíbrio, sobrecarga e subutilização, contribuindo para uma compreensão mais clara do grau de eficiência do berço. Com base nesses resultados, foi possível refletir sobre medidas potenciais de melhoria, tais como reduções no padrão de chegadas e/ou aumento da quantidade de berços disponíveis para atracação.

De posse dos resultados obtidos, comprova-se que os objetivos propostos foram plenamente alcançados, uma vez que se obteve uma visão clara e mensurável do desempenho do porto e de suas limitações operacionais. Ademais, pode-se abordar as ODS (Objetivo de Desenvolvimento Sustentável) de número nove – Indústria, Inovação e Infraestrutura, uma vez que portos são elementos da infraestrutura de transporte e comércio do Brasil, assim, melhorias no tempo de atracação e de processamento de navios nos berços podem auxiliar na redução de custos e trabalhos tais como o presente estudo ajudam no desenvolvimento tecnológico do setor. Ademais, a ODS de número onze – Cidades e Comunidades Sustentáveis também foi impactada pelo presente estudo, pois conforme versado na parte de resultados, os municípios de Itajaí e de Navegantes têm íntima conexão com o porto, assim, qualquer melhoria a ser feita nele afeta diretamente a comunidade costeira (Nações Unidas, *[s. d.]*).

As ODS de número treze – Ação Contra a Mudança Global do Clima e de número quatorze – Vida na Água, também devem ser consideradas frente ao estudo. Melhorias no processo das filas, visando a redução do tempo de espera dessas embarcações, não é apenas benéfico para reduzir o consumo de combustíveis pelo navio que fica parado, mas também reduz a quantidade de emissões deste, o que minimiza a contribuição em

emissões por parte dessas embarcações para o efeito estufa. Outrossim, está intimamente ligado ao ODS quatorze, que visa reduzir a poluição marinha, que através de um bom uso do porto pode ser reduzida (Nações Unidas, [s. d.]).

Ademais, destaca-se que os resultados angariados neste estudo podem ser de grande valia para a gestão portuária, especialmente do berço 3. Pois, é através deste que se detém dados para otimizar o planejamento de atracação, aumentando a previsibilidade de demanda, por exemplo, e garantindo uma ocupação mais efetiva dos ativos de responsabilidade da gestão portuária. Outrossim, este serve como relatório de desempenho do porto, auxiliando em decisões futuras de investimento em estrutura e tecnificação.

Entretanto, como em qualquer trabalho acadêmico, este estudo apresenta algumas limitações. Em primeiro lugar, a necessidade de recorrer a simulações decorre da ausência de dados completos e consolidados para a análise da taxa de chegada dos navios. Além disso, o foco exclusivo no berço 3 restringe a análise, podendo deixar de contemplar oportunidades ou desafios presentes em outros berços do porto. O recorte temporal de dois anos também representa uma limitação, uma vez que pode desconsiderar fatores históricos relevantes, bem como melhorias implementadas após o início da pesquisa. Soma-se a isso a dependência de registros fornecidos por terceiros, no caso a autoridade portuária, o que pode resultar em lacunas ou inconsistências nos dados utilizados. Por fim, destaca-se a dificuldade de acesso a informações detalhadas sobre certas características operacionais do dia a dia, como a influência das condições climáticas, que impactam diretamente o desempenho do sistema.

Dito isso, esse estudo não deve se encerrar aqui. Seus achados abrem caminho para novas pesquisa e aprofundamentos. Uma possibilidade é a análise da viabilidade de construção ou ampliação da capacidade do porto, contemplando também o impacto ambiental da atividade e o retorno sobre o investimento, aspectos não considerados no presente trabalho. Sugere-se, ainda, a realização de análises comparativas anuais das operações do porto, abrangendo dados de janeiro a dezembro, bem como a ampliação do horizonte temporal para incluir um maior número de anos. Uma alternativa relevante seria a realização de um estudo com coleta de dados *in loco*, de modo a subsidiar planos de ação mais específicos e adequados à realidade do berço. Além disso, o desenvolvimento de análises semelhantes para os demais berços do porto poderia trazer subsídios relevantes, permitindo verificar se a ociosidade de outros berços poderia ser aproveitada para absorver a sobrecarga do berço 3, sem necessidade de alterações físicas ou redução da quantidade de navios atendidos. Uma investigação adicional que surge a partir dos resultados encontrados nesse estudo é o estudo das causas do baixo desempenho do atendimento no berço 3 nos meses de julho, setembro e outubro de 2023, bem como em julho de 2024.

Em síntese, conclui-se que a aplicação da teoria das filas mostrou-se uma ferramenta eficaz para mensurar e compreender o desempenho do Porto de Itajaí, oferecendo subsídios práticos para a tomada de decisão. Os achados desta pesquisa reforçam a importância de análises quantitativas na gestão portuária e indicam caminhos para a elevação da eficiência operacional frente às variações de demanda observadas.

REFERÊNCIAS

ALBERTIN, C. C. Porto de Itajaí. **ESALQ-LOG**, Piracicaba, 2011. Disponível em: <https://esalqlog.esalq.usp.br/upload/kceditor/files/2015/05/Porto-de-Itajai-SC-ALBERTIN-C.-C..pdf>. Acesso em: 28 out. 2024.

ANDRADE, E. L. **Introdução à pesquisa operacional: métodos e modelos para análise de decisões**. 4 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. 204 p.

AZEVEDO, A. T.; CHAVES, A. A., SALLES NETO, L. L. Mini-curso: Introdução à otimização de operações portuárias. In: **Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, 46., 2014, Salvador. p. 3542-3614.

BRASIL. Lei 10.893, de 13 de julho de 2004. Dispõe sobre o Adicional ao Frete para a Renovação da Marinha Mercante - AFRMM e o Fundo da Marinha Mercante – FMM. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 14 jul. 2004.

BRASIL. Lei 12.815, de 5 de junho de 2013. Dispõe sobre a exploração direta e indireta pela União de portos e instalações portuárias e sobre as atividades desempenhadas pelos operadores portuários. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF.

BRONSON, R. **Pesquisa Operacional**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1985. 887 p.

CASTRO, C. N. **A Agropecuária na Região Sul: Limitações e Desafios Futuros**. Rio de Janeiro: Ipea, 2014. 42 p.

FERREIRA, A. A. **Simulação de Sistemas de Fila M/M/C**. 2017. 77 f. Trabalho de Conclusão Curso (Bacharel em Engenharia da Computação) - Universidade Federal do Vale do São Francisco, Juazeiro, 2017.

FITZGERALD, D. **A History of Containerization in the California Maritime Industry: The Case Of San Francisco**. 1986. 187 f. Tese (Doutorado em Filosofia em História) – University Of California, Santa Barbara, California, Estados Unidos, 1986. Disponível em: <https://escholarship.org/content/qt02k7415n/qt02k7415n.pdf?v=lg>. Acesso em: 25 set. 2025.

FLEURY, M. T. L.; WERLANG, S. R. C. Pesquisa Aplicada: Conceitos e Abordagens. **GV Pesquisa**, [s. l.], p. 10-15, nov. 2017. Disponível em: <https://periodicos.fgv.br/apgvpesquisa/issue/view/4030>. Acesso em: 05 nov. 2024.

GOVERNO federal anuncia lançamento do edital de arrendamento transitório do porto de itajaí em 25 de agosto. **Município de Itajaí**, ago. 2023. Disponível em: <https://itajai.sc.gov.br/noticias/30770/governo-federal-anuncia-lancamento-do-edital-de-arrendamento-transitorio-do-porto-de-itajai-em-25-de-agosto>. Acesso em 03 nov. 2024.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à pesquisa operacional**. 9 ed. Porto Alegre: AMGH, 2013. *E-book*. 1023 p.

ITAJAÍ é confirmada oficialmente como capital nacional da pesca. **Município de Itajaí**, out. 2023. Disponível em: <https://itajai.sc.gov.br/noticias/31370/itajai-e-confirmada-oficialmente-como-capital-nacional-da-pesca>. Acesso em: 28 out. 2024.

JENSEN, P. A.; BARD, J. F. **Operations Research Models and Methods**. [s. l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2003. 675 p.

A LOGISTICA Portuária Como uma Grande Engrenagem. **Poly**, abr. 2023. Disponível em: <https://www.poly.log.br/biblioteca-artigo/a-logistica-portuaria-como-uma-grande-engrenagem/>. Acesso em: 25 set. 2025.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. “Brasil Consegue Exportar Muito Porque Tem Infraestrutura de Qualidade”, Afirma Renan Filho Durante Lançamento do Plano de Escoamento da Safra. **Ministério dos Transportes**, fev. 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/noticias/2025/02/Brasil-consegue-exportar-muito-porque-tem-infraestrutura%20de%20qualidade-afirma-Renan-Filho-durante-lancamento-do-Plano-de-Escoamento-da-Safra>. Acesso em: 24 set. 2025.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **Sobre o nosso trabalho para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil.** [s. d.]. Apresenta os 17 objetivos para desenvolvimento sustentável e como as Nações Unidas tem atuado na implementação de atividades para alcançá-los. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 24 set. 2025.

PORTO DE ITAJAÍ. **Porto de Itajaí Autoridade Portuária.** 2011. Apresenta informações sobre a história do porto, localização e dados atualizados acerca de suas operações. Disponível em: <https://www.portoitajai.com.br>. Acesso em: 28 out. 2024.

PORTO DE ITAJAÍ. **Porto de Itajaí Autoridade Portuária.** 2024. Apresenta informações sobre a infraestrutura do porto. Disponível em: <https://www.portoitajai.com.br/infraestrutura>. Acesso em: 03 nov. 2024.

SANTOS, J. F. P.; POZO, H. O Crescimento do Porto de Itajaí e Sua Importância para o Cenário Brasileiro: Um Comparativo com o Porto de Santos. **South American Development Society Journal**, [s. l.], v. 6, n. 16, p. 18-30, abr. 2020. DOI: 10.24325/issn.2446-5763.v6i16p18-35. Disponível em: <https://www.sadsj.org/index.php/revista/article/view/285>. Acesso em: 28 out. 2024.

SANTOS JÚNIOR, C. C. **Impactos da Lei 12.815/2013 na Modernização dos Portos Brasileiros: Forma de Exploração e Regulação do Trabalho Portuário.** 2016. 82 f. Monografia (Bacharel em Direito) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2016.

SEARA vai assumir as operações de contêineres no porto de itajaí. **Município de Itajaí**, maio 2024. Disponível em: <https://itajai.sc.gov.br/noticias/32102/seara-vai-assumir-as-operacoes-de-containers-no-porto-de-itajai>. Acesso em: 03 nov. 2024.

SILVA, G.; COCCO, G. Introdução. In: _____. **Cidade e Portos: Os Espaços da Globalização.** Rio de Janeiro: DP&A, 1999. cap. 1, p. 9-26.

SISTEMA Portuário Nacional. **Presidência da República**, set. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/portos-e-aeroportos/pt-br/assuntos/transporte-aquaviario/sistema-portuario>. Acesso em: 25 set. 2025.

TAHA, H. A. **Pesquisa Operacional: uma visão geral.** 8 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008. 359 p.