



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TÉCNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Yuri Triska

**Proposição de método baseado em simulação para avaliação de capacidade e  
planejamento de expansão portuária**

FLORIANÓPOLIS

2020

Yuri Triska

**Proposição de método baseado em simulação para avaliação de capacidade e planejamento de expansão portuária**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.  
Orientador: Prof. Dr.-Ing. Enzo Morosini Frazzon

Florianópolis

2020

#### Ficha de identificação da obra

Triska, Yuri

Proposição de método baseado em simulação para avaliação de capacidade e planejamento de expansão portuária / Yuri Triska ; orientador, Enzo Morosini Frazzon, 2020.  
124 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Florianópolis, 2020.

Inclui referências.

1. Engenharia de Produção. 2. Modelagem de simulação. 3. Expansão portuária. 4. Capacidade portuária. I. Frazzon, Enzo Morosini. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. III. Título.

Yuri Triska

**Proposição de método baseado em simulação para avaliação de capacidade e planejamento de expansão portuária**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr.-Ing. Enzo Morosini Frazzon  
Universidade Federal de Santa Catarina

Profa. Vanina Macowski Durski Silva, Dra.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Alexandre Hering Coelho, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Certifico que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia de Produção.

---

Prof. Dr.-Ing. Enzo Morosini Frazzon  
Orientador

---

Prof. Dr.-Ing. Enzo Morosini Frazzon  
Coordenador do Programa

Florianópolis, 24 de março de 2020.

Este trabalho é dedicado às pessoas que acreditam na ciência, em especial a produzida no Brasil, e na tomada de decisão orientada por evidências.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha família, em especial à minha mãe Leila e meu pai Ricardo, pela educação, apoio financeiro e suporte emocional no decorrer dos anos;

À minha mãe Leila, pela convivência quase diária, suporte e compreensão;

Aos meus amigos, pelos momentos de descontração e também pelo apoio;

À Renata, pelo apoio e convivência;

Aos colegas do laboratório ProLogIS, pela boa convivência, ajudas diversas e discussões sadias.

Aos demais colegas do PPGEP;

Aos professores do PPGEP, em especial ao Prof. Enzo, meu orientador;

Ao CNPq, pelo financiamento da bolsa;

À UFSC, pela estrutura fornecida.

Podemos julgar nosso progresso pela coragem dos nossos questionamentos e pela profundidade das nossas respostas, nossa vontade de abraçar o verdadeiro ao invés daquilo que nos faz sentir bem. (Carl Sagan)

## RESUMO

Em planejamento portuário, estudos sobre escolha da capacidade portuária são essenciais para a alocação de recursos. Nesse contexto, a simulação é um método que permite detalhamento e flexibilidade para analisar sistemas complexos, como portos e terminais. Todavia, não foi encontrado através de revisão sistemática da literatura um método claro e com rigor científico para avaliação de capacidade portuária baseado em simulação e capaz de analisar operações portuárias desde acessos terrestres a vias navegáveis. Isso posto, este trabalho tem como objetivo propor um método baseado em simulação para avaliação de capacidade e planejamento de expansão portuária. O método proposto pode associar um valor de capacidade a uma determinada configuração de recursos e/ou indicar quais configurações de recursos são ideais para as movimentações de carga esperadas. Critérios econômicos ou operacionais podem ser escolhidos para o planejamento da capacidade. O método é baseado em simulações de Monte Carlo e foi testado em um modelo de simulação de eventos discretos de um terminal de contêineres, onde berços, *slots* de armazenagem e portões de caminhões tiveram suas expansões avaliadas. Os resultados ajudarão planejadores portuários em decisões de configuração de recursos, como quando construir um novo berço ou adquirir novos equipamentos de pátio.

**Palavras-chave:** Modelagem de simulação. Expansão portuária. Capacidade portuária.

## ABSTRACT

In port planning, studies regarding port capacity choice are essential for resource allocation. In this context, simulation is a method which enables detailing and flexibility for analyzing complex systems such as ports and terminals. However it was not found in a systematic literature review a clear and scientific rigorous method for port capacity assessment based on simulation and capable of analyzing port operations from inland access to waterways. That said, this work aims to propose a simulation-based method for port capacity assessment and expansion planning. The proposed method can associate a capacity value to a given resource configuration and/or indicate which resource configurations are optimal to given expected throughputs. Economic or operational criteria can be chosen for capacity planning. The method is based on Monte Carlo simulations and was tested in a discrete-event simulation model of a container terminal, where berths, storage slots and truck gates had their expansions evaluated. The results will assist port planners in resource configuration decisions, such as when to construct a new berth or acquire new yard equipment.

**Keywords:** Simulation modeling. Port expansion. Port capacity.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — Fases da pesquisa e respectivas macroatividades.....	20
Figura 2 — Reportagem de fluxo de informação no método PRISMA .....	23
Figura 3 — Fluxo de informação na revisão sistemática realizada.....	35
Figura 4 — Exemplo ilustrativo do procedimento da perspectiva da oferta .....	50
Figura 5 — Exemplo ilustrativo do procedimento perspectiva da demanda com abordagem de engenharia.....	54
Figura 6 — Gráfico do exemplo ilustrativo do procedimento da perspectiva da demanda com abordagem econômica .....	58
Figura 7 — Fluxo simplificado das operações do modelo do caso teste.....	61
Figura 8 — Interface gráfica do modelo desenvolvido para o caso teste.....	62
Figura 9 — Distribuição semanal de chegada de caminhões utilizada como referência .....	64
Figura 10 — Exemplo de variação de níveis de armazenagem durante um período de simulação .....	66
Figura 11 — Exemplo de rodadas de simulação com regime de alta instabilidade na armazenagem .....	68
Figura 12 — Valores máximos na rodada de simulação e estabelecimento de limite para obtenção de valor requerido de armazenagem .....	69
Figura 13 — Gráfico de perspectiva da oferta do caso teste .....	75
Figura 14 — Gráfico de relação entre índices de ocupação de recursos e movimentação de saída no procedimento da perspectiva de oferta.....	77
Figura 15 — Plano de ações gerado pela abordagem de engenharia da perspectiva da demanda .....	78
Figura 16 — Indicadores operacionais da abordagem de engenharia da perspectiva da demanda.....	79
Figura 17 — Gráfico de relação entre índices de ocupação de recursos e movimentação de saída no procedimento da perspectiva de demanda com abordagem de engenharia.....	81
Figura 18 — Dimensionamento da armazenagem na perspectiva da demanda com abordagem de engenharia.....	82
Figura 19 — Plano de ações gerado pela abordagem econômica da perspectiva da demanda	83
Figura 20 — Custo por carga movimentada na abordagem econômica da perspectiva da demanda.....	83

Figura 21 — Gráfico de relação entre índices de ocupação de recursos e movimentação de saída no procedimento da perspectiva de demanda com abordagem econômica.....	87
Figura 22 —Taxa de atendimento da armazenagem dimensionada no procedimento da perspectiva de demanda com abordagem econômica.....	88

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 — Objetivos do trabalho e métodos adotados .....	21
Quadro 2 — Lista de itens a serem verificados pelo método PRISMA na seção de métodos .	22
Quadro 3 — Lista de itens a serem verificados pelo método PRISMA na seção de resultados .....	23
Quadro 4 — Critérios de exclusão de publicações na revisão sistemática.....	24
Quadro 5 — Análise de conteúdo de artigos de periódicos: critérios para avaliação de capacidade portuária, limiares adotados, escopo do modelo e tipo de carga .....	36
Quadro 6 — Análise de conteúdo de capítulos de livro e artigos de conferências: critérios para avaliação de capacidade portuária, limiares adotados, escopo do modelo e tipo de carga .....	38
Quadro 7 — Análise de conteúdo de artigos de periódicos: técnica de simulação, <i>software</i> utilizado, replicação do modelo e <i>warm up</i> de simulação .....	41
Quadro 8 — Análise de conteúdo de capítulos de livro e artigos de conferências: técnica de simulação, <i>software</i> utilizado, replicação do modelo e <i>warm up</i> de simulação .....	42
Quadro 9 — Dados de saída de cada procedimento realizado .....	73

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — Dados de entrada e saída do exemplo ilustrativo do procedimento da perspectiva da demanda com abordagem econômica .....	57
Tabela 2 — Plano de expansão do exemplo ilustrativo do procedimento da perspectiva da demanda com abordagem econômica.....	57
Tabela 3 — Valores de demanda avaliados na perspectiva da oferta e valores relacionados (na ordem da busca realizada) .....	76
Tabela 4 — Ilustração da lógica de busca e expansão de recursos no procedimento da perspectiva de demanda com abordagem de engenharia.....	79
Tabela 5 — Ilustração da lógica de busca e expansão de recursos no procedimento da perspectiva de demanda com abordagem econômica.....	84

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANTAQ	Agência Nacional de Transportes Aquaviários
AWT	Tempo médio de espera
AWT/AST	Taxa de espera
AST	Tempo médio de serviço
ATT	Tempo médio de ciclo
DES	<i>Discrete-event simulation</i> (simulação de eventos discretos)
f.d.a.	Função distribuição acumulada
FEU	<i>Forty-foot Equivalent Unit</i> (unidade de container de 40 pés)
IO	Índice de ocupação
PIANC	<i>World Association for Waterborne Transport Infrastructure</i>
PRISMA	<i>Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols</i>
Q1	Quartil inferior
Q3	Quartil superior
Ro-Ro	<i>Roll-On/Roll-Off</i>
SCM	<i>Supply Chain Management</i>
TEU	<i>Twenty-Foot Equivalent Unit</i> (unidade de contêiner de 20 pés)
UNCTAD	<i>United Nations Conference on Trade and Development</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO .....	15
1.2	OBJETIVOS.....	16
1.3	JUSTIFICATIVA DO TEMA.....	17
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	18
<b>2</b>	<b>ABORDAGEM METODOLÓGICA.....</b>	<b>20</b>
2.1	ATIVIDADES NA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA .....	21
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>25</b>
3.1	CONCEITOS PRELIMINARES SOBRE CAPACIDADE PORTUÁRIA .....	25
3.2	METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DE CAPACIDADE PORTUÁRIA .....	27
<b>3.2.1</b>	<b>Regras práticas .....</b>	<b>28</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Modelos matemáticos .....</b>	<b>29</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Simulação .....</b>	<b>31</b>
3.2.3.1	Números pseudo-aleatórios .....	32
3.2.3.2	Modelagem estatística .....	34
3.3	REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA SOBRE AVALIAÇÃO DE CAPACIDADE PORTUÁRIA BASEADA EM SIMULAÇÃO.....	35
<b>3.3.1</b>	<b>Critérios adotados e escopo do modelo.....</b>	<b>36</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Ferramentas e parâmetros de simulação .....</b>	<b>41</b>
3.4	DISCUSSÃO SOBRE CRITÉRIOS PARA AVALIAÇÃO DE CAPACIDADE PORTUÁRIA .....	44
<b>4</b>	<b>MÉTODO BASEADO EM SIMULAÇÃO PROPOSTO PARA AVALIAÇÃO DE CAPACIDADE E PLANEJAMENTO DE EXPANSÃO PORTUÁRIA.....</b>	<b>46</b>
4.1	PROCEDIMENTO DA PERSPECTIVA DA OFERTA .....	48
4.2	PERSPECTIVA DE DEMANDA.....	50
<b>4.2.1</b>	<b>Procedimento da abordagem de engenharia .....</b>	<b>51</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Procedimento da abordagem econômica.....</b>	<b>54</b>

4.3	ESPECIFICIDADES METODOLÓGICAS DO CASO TESTE .....	58
4.3.1	<b>Materiais utilizados .....</b>	<b>59</b>
4.3.2	<b>Descrição do modelo.....</b>	<b>59</b>
4.3.2.1	Operação dos navios.....	62
4.3.2.2	Operação de contêineres de desembarque na retroárea.....	63
4.3.2.3	Operação de contêineres de embarque na retroárea .....	64
4.3.3	<b>Adaptação do método para a análise de expansão da armazenagem portuária</b>	<b>65</b>
4.3.4	<b>Dados de entrada do modelo .....</b>	<b>69</b>
4.3.5	<b>Dados de saída do modelo.....</b>	<b>71</b>
5	<b>APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO EM CASO TESTE .....</b>	<b>75</b>
5.1	PERSPECTIVA DA OFERTA .....	75
5.2	PERSPECTIVA DA DEMANDA — ABORDAGEM DE ENGENHARIA .....	78
5.3	PERSPECTIVA DA DEMANDA — ABORDAGEM ECONÔMICA .....	82
6	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>89</b>
6.1	CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO .....	89
6.2	LIMITAÇÕES E SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS.....	91
6.2.1	<b>Melhorias do método proposto.....</b>	<b>91</b>
6.2.2	<b>Aplicação do método a terminais portuários reais.....</b>	<b>92</b>
6.2.3	<b>Adaptação do método a outros sistemas produtivos e logísticos.....</b>	<b>93</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>94</b>
	<b>APÊNDICE A – Prova da influência de custos fixos no valor de capacidade obtido por abordagem econômica.....</b>	<b>102</b>
	<b>APÊNDICE B – Código do procedimento de oferta do método proposto .....</b>	<b>103</b>
	<b>APÊNDICE C –Código do procedimento de demanda (abordagem de engenharia) do método proposto.....</b>	<b>110</b>
	<b>APÊNDICE D – Código do procedimento de demanda (abordagem econômica) do método proposto .....</b>	<b>117</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A introdução deste trabalho é dividida em contextualização, justificativa do tema, objetivos e estrutura do trabalho.

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O conceito de gestão de cadeia de suprimentos (*Supply Chain Management* – SCM) apareceu primeiramente nos anos 1980, no entanto, conceitos correlatos como a gestão de operações inter-organizacionais, a pesquisa de sistemas de integração e o compartilhamento de informação datam de períodos anteriores (COOPER; LAMBERT; PAGH, 1997). A definição de SCM não é uniforme na academia, pois há pesquisadores que a definem como a própria logística, como uma extensão da logística ou com um tratamento mais abrangente em termos de integração de negócios (COOPER; LAMBERT; PAGH, 1997). Ainda, não é incomum o uso de diferentes termos que expressem conceitos próximos, como cadeia produtiva, cadeia de valor, cadeia de demanda e rede de suprimentos. Entre as diferentes definições encontradas para o termo cadeia de suprimentos, a de Novaes (2015) o define como a “integração dos processos industriais e comerciais, partindo do consumidor final e indo até os fornecedores iniciais, gerando produtos, serviços e informações que agreguem valor para o cliente”. É possível perceber, por essa definição, que se trata de tema de grande relevância, por abrigar áreas cujos gestores podem optar por mudanças desde o *design* de produtos e serviços, *layout* de fábrica, até logística e transporte. Ainda, quando reformulada ou expandida a arquitetura de uma cadeia de suprimentos, diversos atores são envolvidos, como fornecedores, distribuidores, produtores e consumidores.

Seguindo essa definição, a logística e o transporte estão inseridos dentro da abrangência da SCM. O Conselho de Profissionais de Gestão de Cadeia de Suprimentos também interpreta dessa forma, definindo a gestão de logística como “aquela parte do processo da cadeia de suprimentos que planeja, implementa e controla o fluxo eficiente e efetivo de bens, serviços e informações relacionadas do ponto de origem ao ponto de consumo para atender às necessidades dos clientes” (CSCMP, 2018). Ou seja, a logística é importante atividade no contexto de cadeias de suprimentos e representa importante parcela dos custos de

uma empresa, ainda que essa estimativa dependa de como esses custos são contabilizados (SOLAVIKI *et al.*, 2018).

No âmbito da logística e transporte, os portos possuem importante papel por serem nós da malha logística que têm como função a mudança de modo de transporte e o transporte de carga em grande quantidade, notoriamente voltado ao comércio exterior (LIGTERINGEN; VELSINK, 2012). Isso advém do baixo custo do modo aquaviário em relação aos outros para transporte de elevados volumes de cargas em grandes distâncias. A infraestrutura de um único porto tem o potencial de afetar diversas cadeias de suprimentos pelo mundo, e consequentemente o desenvolvimento econômico-social de diversos países. Além disso, envolve cifras da ordem de bilhões ou centenas de milhões de reais, o que torna relevante a atividade de se planejar adequadamente a alocação de recursos em portos, e de se dispor de ferramentas apropriadas para a tomada de decisão.

Em se tratando de planejamento portuário, a capacidade de escoamento de carga é uma das principais informações que o gestor dispõe para planejamento e controle das operações (OLBA *et al.*, 2017), pois permite avaliar se os ativos disponíveis e o modo como eles são utilizados possibilitam a movimentação satisfatória da demanda esperada.

O planejamento estratégico de capacidade pode envolver muitas decisões, como dimensionamento de capacidade, localização de capacidade, alocação, configuração de capacidade, seleção de tecnologias, níveis de estoque, atraso, planejamento da força de trabalho e planejamento financeiro, de acordo com Martinez-Costa *et al.* (2014). Este trabalho está inserido neste contexto e aplicado a portos, porém é direcionado apenas ao dimensionamento de capacidade, conforme descrito nos objetivos a seguir.

## 1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral desenvolver um método para decidir, para um determinado conjunto de grupos de recursos (*resource pools*) no modelo de simulação, quais expansões devem ser feitas ao longo do crescimento da demanda de carga.

Os objetivos específicos são:

- Analisar criticamente o estado da arte da literatura sobre avaliação de capacidade portuária por meio de simulação;
- Desenvolver método para avaliação de capacidade e planejamento de expansão portuária por meio de simulação; e

- Evidenciar aplicabilidade do método proposto em caso teste baseado em um porto da região Sul do Brasil.

### 1.3 JUSTIFICATIVA DO TEMA

O tráfego de navios e as atividades portuárias continuam aumentando em todo o mundo, impulsionados pelo crescimento do comércio global (UNCTAD, 2019). O transporte marítimo tem importância vital nas cadeias de suprimentos globais, considerando seu papel entre os diferentes modos de transporte, devido, entre outros motivos, ao baixo custo por carga movimentada e à capacidade de viajar para outros continentes. As atividades portuárias são multidisciplinares por natureza, e muitos campos de pesquisa são estabelecidos na literatura, estudando aspectos como meio ambiente, impactos sociais, gestão, economia e operações. Embora cada campo tenha seu próprio valor para o planejamento de portos, a alocação de recursos é crítica, pois os ativos de infraestrutura são caros, mas também o são o custo do congestionamento de portos (CHANG *et al.*, 2012). Uma análise desequilibrada a esse respeito prejudica a competitividade ou até a própria existência de um porto. Portanto, um bom planejador portuário deve estudar a relação entre operações portuárias e economia, com o objetivo de encontrar uma configuração ótima ou boa de recursos que não esteja ociosa nem congestionada.

Como justificativa acadêmica, há a importância de se desenvolver um método baseado em simulação capaz de fornecer valor de capacidade de instalações portuárias e/ou guiar o planejamento de expansão de um porto. Embora atualmente a simulação seja o método que permite melhor detalhamento e flexibilidade para analisar sistemas complexos, como portos e terminais, os trabalhos consultados na literatura (DING, 2010; FENG *et al.*, 2015; HABEEB; GUO; SONG, 2018; HUANG *et al.*, 2008; KECALI; AKSOY; AYDOGDU, 2013; LI, 2007; H. LI, 2017; MAZOUZ; NAJI; LYU, 2017; NG; WONG, 2006; NIE *et al.*, 2017; OLBA *et al.*, 2015; OLBA *et al.*, 2017; OLBA *et al.*, 2019; PARK; NOH, 1987; REIS; ALMEIDA, 2019; RICCI; MARINACCI; RIZZETTO, 2012; SANG *et al.*, 2017; SANG *et al.*, 2019; WADHWA, 1992; WANG *et al.*, 2015; WANG *et al.*, 2017; WANG *et al.*, 2013; XIN *et al.*, 2019; ZHU *et al.*, 2017; MALAVASI; RICCI, 2005; GUO *et al.*, 2015; KULKARNI *et al.*, 2017; N. LI *et al.*, 2017; LIU *et al.*, 2016; MARINACCI; QUATRINI;

RICCI, 2008; NETTO; BOTTER; MEDINA, 2015; RUSGIYARTO *et al.*, 2018; TIAN *et al.*, 2016; WANG; YANG; GUO, 2013; ZHANG; AGUILAR; LAZCANO, 2019) apresentaram pouco rigor metodológico. Na literatura, foi observado que poucos trabalhos documentaram propriamente a escolha de tamanho da amostra dos experimentos de simulação, *warm up*, critérios de capacidade portuária, dentre outros aspectos metodológicos. O procedimento de busca de valor de capacidade também não foi explicitado na maioria das publicações consultadas. Além disso, não foi encontrado método que permita avaliar por meio de simulação quando e em qual quantidade determinados grupos de recursos do sistema (como berços e portões de caminhão) devem ser expandidos. Essas características observadas na literatura são exploradas detalhadamente na Seção 3.3 deste trabalho por meio de revisão sistemática.

#### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma:

- A abordagem metodológica de pesquisa é descrita na segunda seção. São descritas as principais atividades da pesquisa, além da forma como a revisão sistemática do trabalho foi realizada.
- A terceira seção apresenta uma base teórica sobre capacidade portuária e métodos para sua avaliação; revisão sistemática sobre avaliação da capacidade portuária baseada em simulação; e uma discussão sobre os critérios de avaliação para avaliação da capacidade portuária, que compõe uma parte relevante da aplicação do método.
- O método proposto é exposto na quarta seção, onde são apresentados três procedimentos que podem ser utilizados para desenvolvimento de planejamento de expansão portuária, além das especificades metodológicas da aplicação do caso teste.
- Na quinta seção, a aplicação dos procedimentos propostos na quarta seção em caso teste, considerando suas especificidades metodológicas, é exposta.
- Por último, a sexta seção apresenta a conclusão, que discute as contribuições do trabalho, assim como aponta suas limitações e possíveis pesquisas a serem desenvolvidas.

Ainda que possa haver referências no decorrer do trabalho apontando para outras seções do documento, é sugerida a leitura das seções em ordem sequencial, para melhor continuidade das ideias apresentadas.

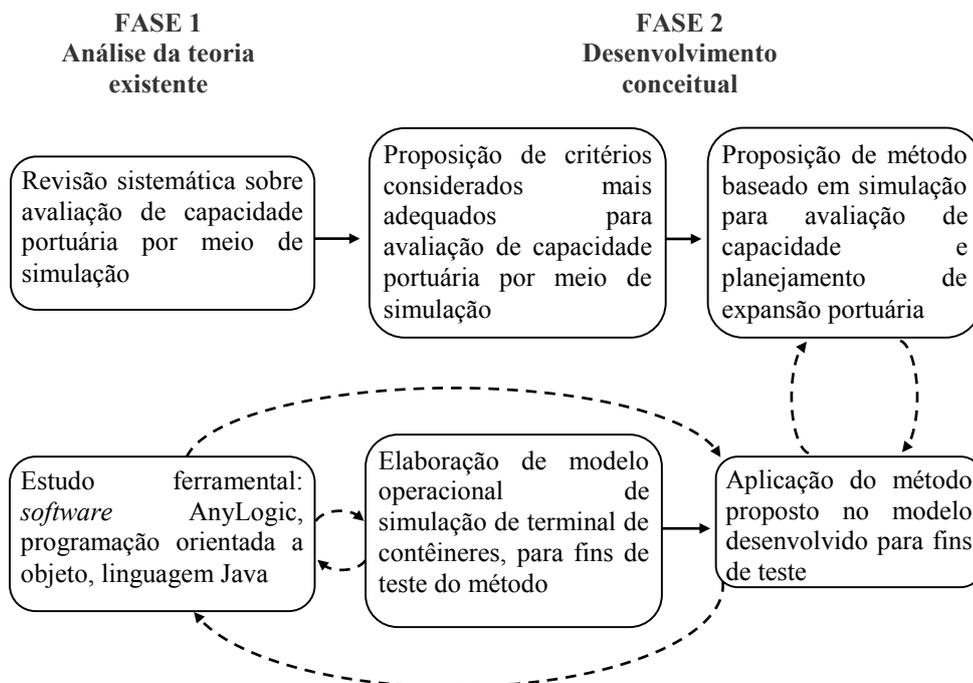
## 2 ABORDAGEM METODOLÓGICA

Visando o cumprimento dos objetivos listados na Seção 1.2, a pesquisa foi estruturada em duas fases principais, a saber:

- Análise da teoria existente: envolve a revisão da bibliografia acerca do tema de pesquisa, além de estudos referentes a conceitos e ferramentas que possibilitam o emprego dos métodos adotados; e
- Desenvolvimento conceitual: atividades relacionadas ao desenvolvimento, proposição e testes de conceitos. Esta fase constitui a maior parte deste trabalho, que é centrado na proposição de método.

A Figura 1 ilustra as fases da pesquisa e respectivas macroatividades. As setas contínuas representam sequenciamento de atividades, enquanto as setas tracejadas indicam retroalimentação entre atividades. Essas retroalimentações ocorreram até a aplicação do método proposto ter sido viabilizada pelo domínio da ferramenta utilizada (*software* AnyLogic e programação em Java) e até que os resultados gerados pelo método, em conjunto com sua própria proposição, viabilizassem um planejamento de expansão portuária robusto.

Figura 1 — Fases da pesquisa e respectivas macroatividades



A relação entre objetivos específicos e métodos de pesquisa é mostrada no Quadro 1. Como métodos, há o uso de revisão sistemática e modelagem de simulação.

Quadro 1 — Objetivos do trabalho e métodos adotados

<b>Objetivo geral</b>	<b>Objetivo específico</b>	<b>Método de pesquisa</b>
Propor um método baseado em simulação para avaliação de capacidade e planejamento de expansão portuária	Analisar criticamente o estado da arte da literatura sobre avaliação de capacidade portuária por meio de simulação	Revisão sistemática da literatura
	Desenvolver método para avaliação de capacidade e planejamento de expansão portuária por meio de simulação.	Revisão sistemática da literatura e modelagem de simulação
	Evidenciar aplicabilidade do método proposto em caso teste baseado em um porto da região Sul do Brasil.	Modelagem de simulação

## 2.1 ATIVIDADES NA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Segundo Liberati *et al.* (2009), uma revisão sistemática da literatura é uma revisão de uma questão claramente formulada que utiliza métodos sistemáticos e explícitos para identificar, selecionar e analisar criticamente pesquisas relevantes, além de coletar e analisar dados de estudos inclusos na revisão. Neste trabalho, a revisão sistemática foi feita para garantir que o método proposto preencha uma lacuna na literatura sobre a avaliação da capacidade portuária baseada em simulação e para fundamentar a proposta de método na literatura.

O método escolhido para esta tarefa foi o PRISMA (LIBERATI *et al.*, 2009), que consiste em uma lista de verificação de 27 itens e um diagrama de fluxo de quatro fases, e tem como objetivo principal relatar de forma transparente o que foi planejado, feito e encontrado em uma revisão sistemática. No entanto, como este trabalho não é apenas uma revisão sistemática, nem todos os itens da lista de verificação do PRISMA foram aplicáveis. Apenas os relacionados às seções de métodos e resultados foram considerados, conforme apresentados no Quadro 2 e no Quadro 3. O diagrama de fluxo é mostrado na Figura 2.

Quadro 2 — Lista de itens a serem verificados pelo método PRISMA na seção de métodos

<b>Tópico</b>	<b>Item</b>
Protocolo e registro	Indicar se um protocolo de revisão existe, se pode ser acessado e onde ( <i>e.g.</i> endereço da internet), e, se disponível, fornecer informações de registro.
Critérios de elegibilidade	Especificar características do estudo e reportar características ( <i>e.g.</i> anos considerados, idioma, status de publicação) utilizadas como critério de elegibilidade, dada justificativa da revisão.
Fontes de informação	Descrever todas as fontes de informação ( <i>e.g.</i> bases de dados com datas de cobertura, contato com autores de estudos para identificar estudos adicionais) na busca e data da última busca.
Busca	Apresentar a estratégia de busca eletrônica completa para ao menos uma base de dados, incluindo quaisquer restrições utilizadas, de forma que permita replicabilidade.
Seleção de estudo	Reportar o processo para seleção de estudos ( <i>i.e.</i> filtragem, elegibilidade, inclusão de estudos na revisão sistemática, e, se aplicável, inclusão em meta-análise).
Processo de coleta de dados	Descrever método de extração de dados de relatórios e quaisquer processos para obtenção e confirmação de dados dos investigadores
Itens de dados	Listar e definir todas as avariáveis para as quais os dados foram buscados e quaisquer suposições e simplificações realizadas
Risco de viés em estudos individuais	Descrever métodos utilizados para avaliar risco de viés de estudos individuais, e como essa informação é utilizada em qualquer síntese de dados.
Principais medidas	Relatar as principais medidas do estudo.
Síntese de resultados	Descrever métodos de manipulação de dados e combinação de resultados de estudos, se realizados, incluindo medidas de consistência para cada meta-análise.
Risco de viés entre estudos	Especificar qualquer avaliação de risco de viés que possa afetar a evidência acumulada ( <i>e.g.</i> viés de publicação, reportagem seletiva dentro dos estudos)
Análises adicionais	Descrever métodos de análises adicionais ( <i>e.g.</i> sensibilidade ou análise de subgrupos, meta-regressão), se realizadas, indicando quais foram pré-especificadas.

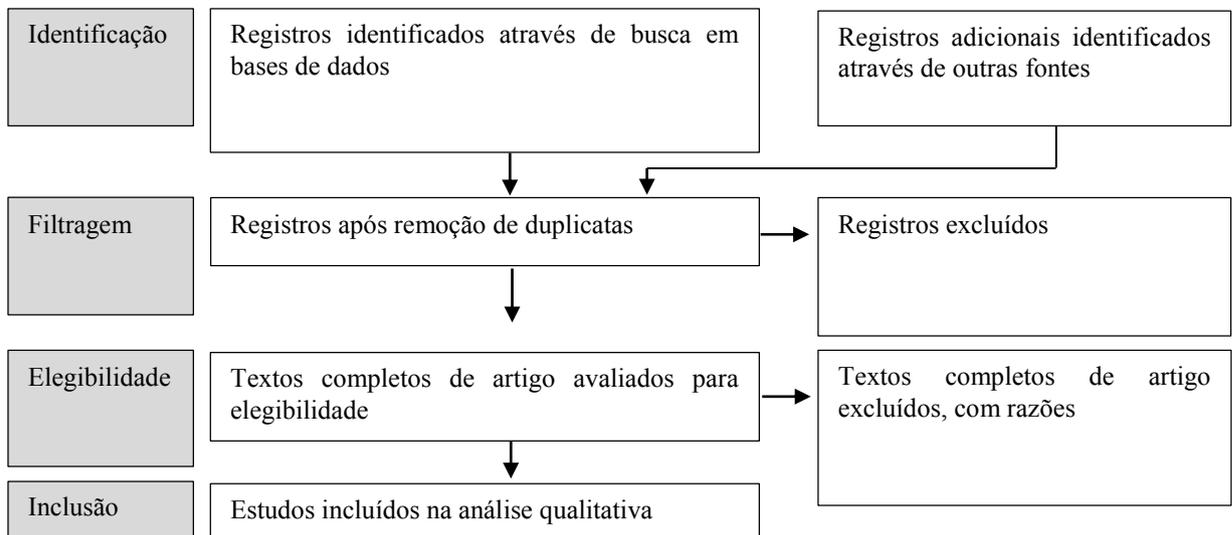
Fonte: adaptado de Liberati *et al.* (2009)

Quadro 3 — Lista de itens a serem verificados pelo método PRISMA na seção de resultados

Tópico	Item
Seleção de estudos	Fornecer número de estudos filtrados, avaliados para elegibilidade, e incluídos na revisão, com razões para exclusão a cada estágio, idealmente por meio de diagrama de fluxo.
Características de estudo	Para cada estudo, apresentar características para as quais os dados foram extraídos e fornecer as citações.
Risco de viés nos estudos	Apresentar dados sobre risco de viés em cada estudo e, se disponível, qualquer avaliação de resultados.
Resultados de estudos individuais	Para todos os resultados considerados (benefícios ou danos), apresentar, para cada estudo: a) sumário simples dos dados para cada grupo de intervenção e b) estimativas de efeito e intervalos de confiança, idealmente por meio de gráficos.
Resultados de síntese	Apresentar resultados de cada meta-análise feita, incluindo intervalos de confiança e medidas de consistência.
Risco de viés entre estudos	Apresentar resultados de cada avaliação de risco de viés entre estudos
Análise adicional	Fornecer resultados de análises adicionais, se realizadas.

Fonte: adaptado de Liberati *et al.* (2009)

Figura 2 — Reportagem de fluxo de informação no método PRISMA



Fonte: Adaptado de Liberati *et al.* (2009)

Os critérios utilizados para exclusão de registros são mostrados no Quadro 4, indicando em qual fase do PRISMA eles estão relacionados. Para a fase de triagem, apenas o conteúdo do título, resumo e palavras-chave foram lidos, enquanto na fase de elegibilidade o texto completo foi considerado.

Quadro 4 — Critérios de exclusão de publicações na revisão sistemática

Fase do PRISMA	Critérios de exclusão
Filtragem	#F1: Sem relação direta com operações portuárias
Filtragem	#F2: A avaliação de capacidade portuária baseada em simulação não é enfatizada
Filtragem	#F3: Texto completo não encontrado ou não é na língua inglesa
Elegibilidade	#E1: A publicação não atribui valor de capacidade portuária utilizando simulação ou não apresenta método para avaliação de capacidade portuária baseado em simulação

Este estudo busca revisar não apenas os estudos mais recentes, mas a literatura científica relevante disponível ao longo dos anos, portanto, não foram incluídos filtros dos anos de publicação. As bases de dados Scopus, Web of Science e ScienceDirect foram pesquisadas em 19 de novembro de 2019 nos campos título, resumo e palavras-chave, usando a seguinte lógica de pesquisa: *(port OR ports OR seaport OR seaports) AND (throughput OR capacity OR capacities) AND (simulation OR modelling OR modeling)*. Todos os tipos de referência foram contabilizados na consulta, com o objetivo de não rejeitar nenhuma publicação potencialmente útil. No entanto, considerando o rigor acadêmico e a finalidade dos diferentes tipos de publicação, a análise de conteúdo foi feita separadamente para artigos de periódicos e para outros tipos de publicação (artigos de congressos e seções de livros).

Para agilizar o processo de gerenciamento das referências a serem consultadas, foi utilizado o programa Endnote, da Clarivate Analytics. Sua arquitetura permite registrar com facilidade os artigos que se encaixaram ou não nos critérios de exclusão elencados no Quadro 4. Ainda, o programa possibilita a leitura de resumos e títulos em sua interface, o que facilita a fase de triagem do método PRISMA.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica foi dividida em três subseções: uma explora conceitos preliminares sobre capacidade portuária; outra aborda diferentes métodos de avaliação de capacidade portuária, e a terceira expõe revisão sistemática da literatura sobre avaliação de capacidade portuária baseada em simulação.

#### 3.1 CONCEITOS PRELIMINARES SOBRE CAPACIDADE PORTUÁRIA

O termo capacidade é, pelo senso comum, geralmente associado a algo estático, relacionado a dimensões físicas, como o número de pessoas que cabem em um elevador ou em um cinema. No entanto, essas medidas não refletem as suas capacidades de processamento. A capacidade de uma operação pode ser definida como “o máximo nível de atividade de valor adicionado em determinado período de tempo que o processo pode realizar sob condições normais de operação” (SLACK *et al.*, 1996).

A Seção 3.3 deste trabalho mostra que a literatura revisada por pares considera amplamente a relação de capacidade portuária com nível de serviço das operações. No entanto, o portfólio analisado não aborda a conceituação de capacidade portuária, exceto quando menciona conceitos da UNCTAD (1985), por exemplo no artigo de Olba *et al.* (2017). Isso por ter ocorrido pela necessidade de artigos terem menor número de palavras.

Triska (2015, p. 61) discute em seu trabalho diferentes definições sobre capacidade de instalações portuárias, citando trabalhos da PIANC (2014), Governo Federal brasileiro (BRASIL, 2018), UNCTAD (1985) e livros da Universidade de Delft (LIGTERINGEN; VELSINK, 2012; GROENVELD, 2001). Todas essas publicações convergem em associar capacidade portuária ao nível de serviço e desempenho esperado das operações. Convém, todavia, expor diferentes conceitos atrelados à capacidade portuária expostos por Ligteringen e Velsink (2012):

- Capacidade teórica: é a capacidade máxima de projeto de um componente portuário;
- Capacidade máxima anual: capacidade média por hora considerando indicadores operacionais esperados de desempenho (que não são

produtividades máximas) multiplicada pelo número de horas do ano, ou seja, considerando índice de ocupação de 100% dos recursos;

- Capacidade máxima instantânea: medida por curto período de tempo em condições ótimas (*e.g.* produtividade máxima de equipamentos, trabalhadores portuários descansados, dentre outros fatores). Útil para prevenção de entupimento em esteiras e dutos, por exemplo;
- Capacidade nominal de equipamento: é baseada na movimentação de uma mercadoria específica em condições operacionais próximas do ótimo (UNCTAD, 1985);
- Capacidade ótima: movimentação na qual não é caracterizado subdimensionamento nem superdimensionamento de recursos. A capacidade ótima não é uma propriedade intrínseca das instalações portuárias e não prevê funcionamento do sistema em seu limite — contrariando o senso comum, um sistema consegue operar acima de sua capacidade.

Em termos de planejamento portuário, a de maior interesse é a capacidade ótima. Entretanto, este conceito pode ser interpretado de maneira diferente pelos diferentes atores da comunidade portuária, como operadores portuários, Autoridade Portuária e planejadores do governo, e ainda deve-se considerar que há envolvimento de diferentes países (CHANG *et al.*, 2012). Por exemplo, segundo a UNCTAD (1985), há dois pontos de custo mínimo por tonelada movimentada: um que considera apenas os custos portuários (*i.e.* desprezando-se o custo relativo ao tempo do navio no porto) e outro que considera os custos totais (e por isso, de maior interesse). Embora o conceito de movimentação ótima atrelada ao custo mínimo por tonelada movimentada seja útil para a discussão de alguns conceitos, na Seção 3.4 e Apêndice A deste trabalho é apresentada argumentação questionando sua aplicabilidade direta para avaliação de capacidade.

Chang *et al.* (2012) mencionam duas abordagens principais para a capacidade ótima:

- A abordagem econômica relaciona o valor da capacidade a um custo mínimo por tonelada movimentada. Ou seja, o critério que estabelece o nível de serviço é econômico.
- A abordagem de engenharia relaciona o valor da capacidade a indicadores operacionais, como taxa de utilização de berço e taxa de espera por serviço.

Além disso, ao analisar a capacidade portuária, duas perspectivas principais podem ser consideradas (CHU; HUANG, 2005):

- Perspectiva da oferta, ou seja, para uma determinada configuração de recursos (por exemplo, 2 berços, 30.000 *slots* de TEU e 6 portões de caminhão), encontrar um valor de capacidade de movimentação; e
- Perspectiva da demanda, *i.e.* para uma certa movimentação esperada (por exemplo, 300.000 TEU/ano), encontrar uma configuração de recursos que não seja sub ou superdimensionada.

Triska (2015) aborda os principais elementos de um porto e discute seu papel nas operações e capacidade portuárias. Embora a capacidade de cais seja comumente reportada como principal limitador da capacidade de um porto (UNCTAD, 1985; PIANC, 2014; BRASIL, 2018) e muitos estudos sejam também voltados à capacidade do acesso aquaviário (*e.g.* OLBA *et al.*, 2017; OLBA *et al.*, 2019; WANG *et al.*, 2017; HABEEB; GUO; SONG, 2018), diferentes elos, assim como suas interfaces, também podem ser limitadores. Ressalte-se também que diversos elementos portuários (*e.g.* qualificação e quantidade de mão-de-obra, dimensionamento adequado de obras de abrigo) assim como condições externas ao porto (*e.g.* sazonalidade das cargas, condições climáticas) podem afetar seu desempenho, e por consequência, sua capacidade (TRISKA, 2015).

### 3.2 METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DE CAPACIDADE PORTUÁRIA

Além dessas definições e perspectivas, existem diferentes métodos para se avaliar a capacidade portuária. Groenveld (2001) lista como métodos de cálculo regras práticas (*rules of thumb*), teoria das filas, técnicas de programação linear ou simulação computacional. Triska (2015) utiliza classificação semelhante, com estimativas aproximadas, teoria de filas e simulação computacional.

Segundo a UNCTAD (1985), um bom método para avaliação de capacidade portuária deve ser rápido e fácil, considerando diferentes cenários de movimentação de cargas e no decorrer de vários instantes de tempo. Por outro lado, Groenveld (2001) aponta a importância de detalhamento do modelo para que seja viabilizado estudo mais aprofundado do sistema, verificando melhor sua resposta a diferentes situações.

Neste trabalho, visando explorar diferentes abordagens da literatura, é discutido brevemente o cálculo de capacidade portuária pelos seguintes grupos de métodos: regras práticas, modelos matemáticos e simulação.

### 3.2.1 Regras práticas

As regras práticas (*rules of thumb*, em inglês) consistem em simples verificações de critérios ou fórmulas empíricas e são recomendadas em algum nível pela UNCTAD (1985), PIANC (2014) e praticadas em portos asiáticos (CHANG *et al.*, 2012; DING, 2010). Ainda, são utilizadas pelo Governo Federal brasileiro (BRASIL, 2018) para o cálculo de capacidade de armazenagem portuária. Groenveld (2001) aponta a aplicabilidade de regras práticas para problemas isolados em portos pequenos com baixa intensidade de tráfego.

Triska e Frazzon (2018) apontam como as regras práticas são utilizadas para avaliação de capacidade de armazenagem portuária, que consiste em: produto entre coeficiente de capacidade e demanda anual esperada; produto entre giro médio admissível e capacidade estática; e comparação entre capacidade estática e lote máximo esperado. Chu e Huang (2005) também mostram como a literatura considera o assunto.

Para capacidade de cais, Ligteringen e Velsink (2012) e Triska (2015) apontam o seguinte cálculo, conforme Equação 1:

$$C = P \times N \times A \times \rho \quad (1)$$

Onde:  $C$  é a capacidade do berço (unidades/ano);  $P$  é a produtividade efetiva do equipamento de cais (unidades/h);  $N$  é o número de equipamentos de cais (adimensional);  $A$  é o número de horas operacionais no ano (h);  $\rho$  é o índice de ocupação de cais (adimensional).

Uma abordagem análoga pode ser empregada para estimativa da capacidade de outros subprocessos portuários, como moegas ferroviárias e portões de caminhão, dadas as devidas adaptações.

A imprecisão desse cálculo está presente principalmente na escolha do valor do índice de ocupação de cais, por meio de valores *benchmark* em vez de se analisar o comportamento dos clientes que frequentam o porto e seu desempenho operacional, ou verificando-se o impacto em custos portuários. Além disso, a interação entre os diferentes elos da operação portuária não é levada em conta.

### 3.2.2 Modelos matemáticos

Muitos estudos sobre capacidade portuária usaram modelagem matemática, tipicamente através de modelos de filas. Todavia, também foram observados estudos com cadeias de Markov, programação dinâmica e teoria de jogos para a avaliação da adequabilidade do dimensionamento de portos.

A teoria de filas estuda analiticamente modelos de fila, considerando o padrão de chegada, disciplina de atendimento e padrão de atendimento dos usuários de uma fila. Hillier e Lieberman (2006) é um dos livros que conceitua o assunto, e Groenveld (2001) aborda o método aplicado a terminais portuários. Diferentes modelos de fila aparecem na literatura, tais como as filas M/G/1, M/M/1 e M/M/c. Geralmente a distribuição de entrada é considerada exponencial, devido à facilidade do tratamento matemático e sua pertinência para representar processo de chegada de clientes, principalmente. A distribuição Erlang também é bastante usada, embora seja mais difícil de tratá-la. O estudo das filas pode considerar, por meio de equações, parâmetros como o tempo médio de espera dos clientes e o índice de ocupação dos pontos de atendimento, a partir dos quais é possível chegar a valores de capacidade.

Muitos estudos na literatura revisada por pares sobre capacidade portuária usaram modelos de filas (EASA, 1987; RADMILOVICH, 1992; MUNISAMY, 2010; LAYAA; DULLAERT, 2014; TAN *et al.* 2015). O governo federal brasileiro (BRASIL, 2018) também utilizou em diversos Planos Mestres a teoria de filas para cálculo de capacidade de cais.

Assim como outros métodos baseados em modelagem matemática, o uso de teoria de filas esbarra no intrincado tratamento matemático de manipulações matemáticas, além de simplificações de funcionamento de um sistema para que ele se encaixe em um modelo de fila. Quanto às distribuições de probabilidade, em processos com maior previsibilidade, assumir que uma distribuição é exponencial pode resultar em subdimensionamento da capacidade de uma instalação, pois seu desvio padrão é igual à média (HILLIER; LIEBERMAN, 2006). Filas com limitação de espaço, diferentes disciplinas de fila e diversos outros comportamentos limitam a aplicabilidade da teoria de filas para sistemas complexos.

Um terminal de contêineres (tal qual o modelado neste trabalho) dificilmente pode ser abordado em detalhes com qualquer modelo matemático, considerando a grande interação

de processos, diferentes tipos de usuários nas filas (navios, contêineres, caminhões), diferentes distribuições de probabilidade consideradas e diversos outros aspectos.

Uma cadeia de Markov é um processo estocástico com estados discretos e com propriedade markoviana, ou seja, a probabilidade de ocorrência de um evento futuro depende apenas do estado atual e não de eventos passados (HILLIER; LIEBERMAN, 2006). Segundo Triska e Frazzon (2018), as cadeias de Markov podem ser utilizadas para o planejamento da capacidade sob a perspectiva da demanda, conforme classificação apresentada por Chu e Huang (2005). Ou seja, em vez de se associar um valor de capacidade para uma configuração de recursos (perspectiva da oferta), a abordagem pode determinar a capacidade real necessária de um processo produtivo (STAUDT; COELHO; BUSS, 2011), e por consequência a quantidade de recursos necessária. Lee, Lee e Chew (2014) analisaram a capacidade de um terminal portuário de contêineres utilizando abordagem markoviana, considerando como recursos os guindastes de cais, guindastes de pátio e transportadores internos.

A avaliação de capacidade por cadeias de Markov não considera nível de serviço ou custos associados. As matrizes de transição são analisadas e a partir desses valores é verificado o máximo que o sistema consegue produzir, processar ou movimentar. Por não considerar nível de serviço, essa abordagem não está alinhada com os conceitos expostos na Seção 3.1 sobre capacidade ótima, e portanto possui aplicabilidade limitada para o planejamento portuário de expansão de recursos.

A programação dinâmica é uma técnica matemática útil para criar uma sequência de decisões inter-relacionadas (HILLIER; LIEBERMAN, 2006). Não existe formulação padrão, e os problemas são geralmente solucionados com algoritmos recursivos. Devanney III e Tan (1975) elaboraram um plano de expansão de um terminal portuário utilizando programação dinâmica. O modelo de operação do porto considera o sistema como um ponto único de atendimento de um único tipo de carga, ou seja o nível de detalhe do modelo é baixo. A complexidade do problema se dá na análise da política de preços e escolha de investimentos visando maximização de lucro. Visando a avaliação de capacidade e expansões portuárias, a programação dinâmica mostra pouca aplicabilidade a sistemas complexos.

Diferentes publicações (DE BORGER; VAN DENDER, 2006; DE BORGER; PROOST; VAN DENDER, 2008; LUO; LIU; GAO, 2012) utilizaram teoria de jogos visando a escolha de capacidade portuária, assim como descrito para a programação dinâmica. O ramo da teoria de jogos foi concebido visando estudar a tomada de decisão de diferentes atores em situações competitivas (HILLIER; LIEBERMAN, 2006), e também há estudos com

interações colaborativas. De qualquer forma, não é direcionado à análise da operação de sistemas produtivos e logísticos. Todavia, a teoria de jogos mostrou adequação ao estudo da política de preços e expansão de portos que competem entre si, ainda que em detrimento do detalhamento da operação dos sistemas.

### 3.2.3 Simulação

Segundo Taha (2008), a simulação é o segundo melhor procedimento para a avaliação do comportamento de um sistema real, depois da observação do próprio sistema. O objetivo de uma simulação é emular o comportamento de um sistema real em um modelo que se comporta de maneira similar. São geradas observações estatísticas do sistema e, a partir delas, são feitas inferências em relação às características do sistema real. A principal vantagem de se utilizar simulação é o fato de muitas situações reais serem demasiado complexas para serem solucionadas por meio de modelos matemáticos (HILLIER; LIEBERMAN, 2006; FIGUEIRA; ALMADA-LOBO, 2014).

Atualmente são utilizados três principais métodos de simulação, com diferentes características e níveis de abstração (detalhamento): dinâmica de sistemas, modelagem de eventos discretos (centrada em processos) e modelagem baseada em agentes (BORSHCHEV, 2013). A dinâmica de sistemas possui grande nível de abstração e utiliza *loops* causais e equações diferenciais na sua lógica de simulação. A modelagem de eventos discretos possui nível de abstração menor, e é baseada no direcionamento de entidades à execução de processos, que podem ou não utilizar recursos. Já a modelagem baseada em agentes considera a tomada de decisão de maneira independente pelos agentes que compõe o modelo. A escolha do método deve ser baseada no sistema a ser modelado e o propósito da modelagem.

Algumas revisões de literatura (STAHLBOCK; VOß, 2008; ANGELODIOUS; BELL, 2011; DRAGOVIĆ; TZANNATOS; PARK, 2017) demonstraram a aplicabilidade da modelagem de simulação em sistemas portuários. Conforme apontado por Figueira e Almada-Lobo (2014), a principal vantagem da simulação é a capacidade de lidar com processos complexos sem tratamento matemático intrincado. As regras práticas e modelagem matemática geralmente exigem várias suposições e simplificações. Em sistemas complexos, expressões desenvolvidas para os modelos de fila já estudados geralmente não podem ser

aplicadas adequadamente e, entre outros obstáculos, a manipulação matemática de funções de probabilidade, relacionamentos não lineares, diferentes disciplinas de filas e outros processos incomuns se torna intrincada. Além disso, ao contrário de outros métodos, a simulação permite a investigação de muitos cenários com grande nível de detalhe por meio de análises hipotéticas (*what-if analysis*). Atualmente, saltos em capacidade computacional tornaram os estudos baseados em simulação mais viáveis (FIGUEIRA; ALMADA-LOBO, 2014), contribuindo para o aumento da atratividade deste método.

Há ocorrência relevante de estudos de capacidade portuária que usam simulação (DING, 2010; FENG *et al.*, 2015; HABEEB; GUO; SONG, 2018; HUANG *et al.*, 2008; KECELI; AKSOY; AYDOGDU, 2013; LI, 2007; H. LI, 2017; MAZOUZ; NAJI; LYU, 2017; NG; WONG, 2006; NIE *et al.*, 2017; OLBA *et al.*, 2015; OLBA *et al.*, 2017; OLBA *et al.*, 2019; PARK; NOH, 1987; REIS; ALMEIDA, 2019; RICCI; MARINACCI; RIZZETTO, 2012; SANG *et al.*, 2017; SANG *et al.*, 2019; WADHWA, 1992; WANG *et al.*, 2015; WANG *et al.*, 2017; WANG *et al.*, 2013; XIN *et al.*, 2019; ZHU *et al.*, 2017; MALAVASI; RICCI, 2005; GUO *et al.*, 2015; KULKARNI *et al.*, 2017; N. LI *et al.*, 2017; LIU *et al.*, 2016; MARINACCI; QUATRINI; RICCI, 2008; NETTO; BOTTER; MEDINA, 2015; RUSGIYARTO *et al.*, 2018; TIAN *et al.*, 2016; WANG; YANG; GUO, 2013; ZHANG; AGUILAR; LAZCANO, 2019).

O uso de simulação como método para avaliação de capacidade tem como vantagem a melhor exatidão e precisão do valor encontrado, sem depender de coeficientes arbitrados ou encontrados na literatura, a exemplo das regras práticas. Diferentes especificidades e cenários podem ser analisados, tornando o resultado fidedigno. Todavia, a aplicação do método tem como desvantagem a necessidade de grande disponibilidade de informação para a formulação de um modelo próximo à realidade, além de tomar maior tempo para execução do que os outros métodos.

### 3.2.3.1 Números pseudo-aleatórios

A geração de números pseudo-aleatórios é o que permite a variação dos resultados de experimentos de simulação com parâmetros de entrada iguais. Um algoritmo de computador não gera dados de saída aleatórios tais como os da jogada de um dado ou moeda, tendo em vista que sua lógica é voltada à execução de rotinas claramente definidas. Tendo isso em vista

e visando emular estocasticidade do mundo real, diversos métodos para geração de números pseudo-aleatórios foram criados.

Segundo Groenveld (2001), uma sequência de número aleatórios deve ter duas propriedades estatísticas importantes: uniformidade e independência. Ou seja, a sequência de números gerada deve aproximadamente seguir uma distribuição uniforme de 0 a 1, e um número gerado não deve depender de algum anteriormente gerado, tal como um processo markoviano. Para que essas propriedades sejam verificadas, testes de aleatoriedade podem ser buscados na literatura (RUHKIN, 2001). Já Marsaglia e Zaman (1990) citam as seguintes propriedades: aleatoriedade, período longo, eficiência computacional, replicabilidade, portabilidade e homogeneidade.

Groenveld (2001) cita os seguintes métodos para obtenção de número pseudo-aleatórios: método do quadrado do meio (*midsquare method*), método congruencial aditivo e método congruencial linear. Todavia há diversos métodos para executar tal tarefa e pesquisas em desenvolvimento.

Todos os métodos utilizam número que serve como semente para obtenção de números pseudo-aleatórios. Há diferentes maneiras de se obter a semente, tais como verificar a data do computador em milissegundos (BORSCHEV, 2013). De qualquer forma, o uso de sementes permite a replicabilidade dos experimentos, pois ao serem documentados os valores, é possível obter exatamente os mesmos resultados em experimentos posteriores.

Uma vez obtido o número pseudo-aleatório real de 0 a 1, há diferentes maneiras de se obter o valor pseudo-aleatório da variável (GROENVELD, 2001). Uma delas é o método da transformada inversa, no qual para uma função distribuição acumulada (f.d.a.) (portanto, com valores de 0 a 1), é buscado encontrar a abscissa associada a esse valor de ordenada. Essa abordagem, todavia, é prejudicada quando não é possível se obter analiticamente a lei de formação da função inversa da f.d.a. Nesse caso, é possível usar transformação direta ou método da convolução (GROENVELD, 2001).

### 3.2.3.2 Modelagem estatística

Ainda que não tenha relação direta com o processo de simulação em si, as análises estatísticas têm importante papel nos métodos de Monte Carlo, tendo em vista que a racionalidade por trás consiste em analisar resultados de eventos pseudo-aleatórios.

Diferentes parâmetros podem ser avaliados (*e.g.* tempos médios de espera de clientes, quantidade de clientes atendidos), conforme o que se busca nos experimentos. Uma vez escolhidos, podem ser estimados sua média, tamanho necessário de sua amostra, ou margem de erro para determinada amostra e intervalo de confiança.

Pela natureza dos experimentos de simulação, cabe a estimação de parâmetros considerando população infinita. Ainda, devido ao teorema do limite central, é costume assumir a normalidade da distribuição de probabilidade. Com isso, é utilizada a distribuição normal para amostra grande ( $n > 30$ ) e distribuição  $t$  para amostra pequena.

O tamanho necessário de uma amostra para um dado intervalo de confiança e erro relativo aceitável é mostrado na Equação 2, adaptada a partir de fórmula mostrada por Barbetta, Reis e Borna (2010). Essa adaptação consistiu em:

- Substituir o erro amostral máximo pelo produto entre o erro relativo aceitável e a média do parâmetro; e
- Substituir a razão entre o desvio padrão e a média do parâmetro pelo coeficiente de variação.

$$n \geq \left( \frac{Z_{\alpha/2} \times CV}{e_r} \right)^2 \quad (2)$$

Onde:

$n$  é o tamanho da amostra (unidades);

$\alpha$  é o nível de significância (%);

$Z$  é a variável aleatória padrão (adimensional);

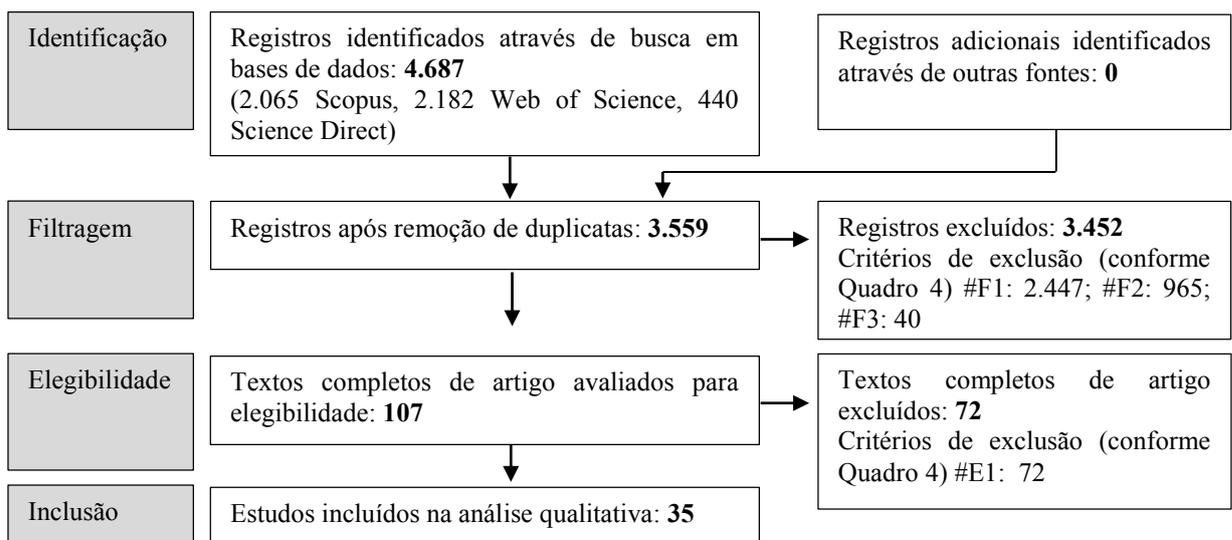
$CV$  é o coeficiente de variação (adimensional); e

$e_r$  é o erro relativo aceitável (adimensional).

### 3.3 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA SOBRE AVALIAÇÃO DE CAPACIDADE PORTUÁRIA BASEADA EM SIMULAÇÃO

A Figura 3 apresenta o fluxo de informações na revisão sistemática, de acordo com o método PRISMA. Embora um grande número de trabalhos tenha resultado da consulta (3.559 após a remoção de duplicatas), apenas 107 entraram na fase de elegibilidade. A ampla lógica de pesquisa, por um lado, fez muitos trabalhos não relacionados serem incluídos nos registros — houve muitos resultados relacionados à engenharia de computação e eletrônica, e mesmo os resultados relacionados às operações portuárias não tinham relação direta com o tópico alvo. No entanto, por outro lado, a busca selecionou a maioria dos resultados que poderiam ser relevantes no tópico de avaliação de capacidade portuária baseada em simulação.

Figura 3 — Fluxo de informação na revisão sistemática realizada



Fonte: Adaptado de Liberati *et al.* (2009)

Trinta e cinco artigos foram incluídos na análise, dos quais 24 artigos são de periódicos, 1 seção de livros e 10 artigos de conferências. O artigo mais antigo data de 1987 e, nos últimos anos, houve um crescimento na publicação, com 15 artigos de periódicos e 8 artigos de conferências publicados desde 2015. As instituições chinesas são as que mais publicam, com 11 artigos de periódicos e 5 artigos de conferências, seguidas pelas de Cingapura, com 3 artigos de periódicos e 1 artigo de conferência.

A análise de conteúdo analisou os seguintes aspectos: critérios para avaliação de capacidade portuária, tipo de carga, escopo do modelo, técnica de simulação, replicação do modelo e *warm-up* de simulação. Além disso, foram identificados os *clusters* de pesquisa, com o objetivo de estabelecer conexões entre os artigos por compartilhamento de autoria.

A Seção 3.3.1 discute aspectos de critérios adotados e escopo do modelo, enquanto a Seção 3.3.2 analisa as ferramentas e parâmetros de simulação.

### 3.3.1 Critérios adotados e escopo do modelo

O Quadro 5 e o Quadro 6 sintetizam as informações para cada artigo, referentes aos critérios para avaliação de capacidade portuária, limiares adotados, escopo do modelo e tipo de carga. O Quadro 5 mostra a análise para artigos de periódicos, enquanto o Quadro 6 mostra para artigos de conferências e capítulos de livro.

Quadro 5 — Análise de conteúdo de artigos de periódicos: critérios para avaliação de capacidade portuária, limiares adotados, escopo do modelo e tipo de carga

Artigo	Cluster de pesquisa	Critérios para avaliação de capacidade portuária e limiar adotado	Escopo do modelo	Tipo de carga
Ding (2010)	<sup>a</sup>	Máxima movimentação do terminal enquanto as embarcações são servidas continuamente	Berços e guindastes de cais	Contêiner
Feng <i>et al.</i> (2015)	<sup>a</sup>	Custo mínimo por carga movimentada	Acesso aquaviário e berços	Óleo cru
Habeeb, Guo e Song (2018)	C1	Sem registro	Acesso aquaviário	Contêiner
Huang <i>et al.</i> (2008)	<sup>a</sup>	Taxa de disponibilidade de berço e nível de <i>overflow</i> de contêineres no pátio. Limiar não definido	Berços, guindastes de cais, <i>prime mover</i> , pátio e portões	Contêiner
Keceli, Aksoy e Aydogdu (2013)	<sup>a</sup>	Taxa de utilização de 70% (para qualquer recurso)	Portões, pátio e berços	Ro-Ro
A. Li <i>et al.</i> (2007)	C3	Sem registro	Acesso aquaviário e berços	Contêiner
H. Li <i>et al.</i> (2017)	C3	Taxa de disponibilidade de berço. Limiar não definido.	Berços, guindastes de cais, guindastes de pátio e veículos	Contêiner
Mazouz, Naji e Lyu (2017)	<sup>a</sup>	Taxa de utilização de 75% (não específica qual recurso)	Portões e pátio	Contêiner
Ng e Wong (2006)	<sup>a</sup>	AWT/AST de 0,1 a 0,2	Acesso aquaviário, berços e guindastes de cais	Contêiner

Notas: <sup>a</sup> Todos os autores possuem este artigo como o único incluído na análise de conteúdo deste trabalho.

Quadro 5 — Continuação

<b>Artigo</b>	<b>Cluster de pesquisa</b>	<b>Crítérios para avaliação de capacidade portuária e limiar adotado</b>	<b>Escopo do modelo</b>	<b>Tipo de carga</b>
Ricci, Marinacci e Rizzetto (2012)	C2	Taxa de utilização de 65% (não especifica o recurso)	Acesso aquaviário e berços	Multi-propósito
Sang <i>et al.</i> (2017)	a	Sem registro	Acesso aquaviário	Sem registro
Shang <i>et al.</i> (2019)	C1	AWT/AST de 0,3	Acesso aquaviário	Multi-propósito
Wadhwa (1992)	a	Taxa de comprometimento de berço (tempo entre a permissão para atracar até o desembarque do práctico) de 80%	Acesso aquaviário e berços	Granel sólido
Wang <i>et al.</i> (2015)	C1	AWT/AST de 0,4 a 0,6	Acesso aquaviário	Contêiner
Wang <i>et al.</i> (2017)	C1	AWT/AST de 0,4 a 0,9	Acesso aquaviário	Granel sólido
Wang <i>et al.</i> (2013)	C1	AWT/AST, limiar não definido.	Acesso aquaviário	Contêiner
Xin <i>et al.</i> (2019)	C5	Capacidade teórica estimada pela densidade de navios no canal e média de velocidade de navios	Acesso aquaviário	Sem registro
Zhu <i>et al.</i> (2017)	a	Sem registro	Acesso aquaviário, berços, pátio, recepção ferroviária	Granel sólido
Ng e Wong (2006)	a	AWT/AST de 0,1 a 0,2	Acesso aquaviário, berços e guindastes de cais	Contêiner
Nie <i>et al.</i> (2017)	C5	Máximo número de embarcações que passam em um canal em particular por unidade de tempo	Acesso aquaviário	Sem registro
Olba <i>et al.</i> (2015)	C4	No gráfico AWT/AST Vs. demanda, o ponto de transição entre estado normal e estado congestionado. É uma escolha subjetiva, conforme afirmado em Olba <i>et al.</i> (2017)	Acesso aquaviário	Sem registro
Olba <i>et al.</i> (2017)	C4	Uma abordagem objetiva baseada nos critérios utilizados em Olba <i>et al.</i> (2015)	Acesso aquaviário	Sem registro
Olba <i>et al.</i> (2019)	C4	Conforme em Olba <i>et al.</i> (2017)	Acesso aquaviário	Multi-propósito
Park e Noh (1987)	a	Sem registro	Acesso aquaviário, berços e pátio	Granel sólido
Reis e Almeida (2019)	a	Máximo número de trens admitidos por unidade de tempo	Pátio de trens	Contêiner

Notas: <sup>a</sup> Todos os autores possuem este artigo como o único incluso na análise de conteúdo deste trabalho.

Quadro 6 — Análise de conteúdo de capítulos de livro e artigos de conferências: critérios para avaliação de capacidade portuária, limiares adotados, escopo do modelo e tipo de carga

Artigo	Cluster de pesquisa	Crítérios para avaliação de capacidade portuária e limiar adotado	Escopo do modelo	Tipo de carga
Malavasi e Ricci (2005)	C2	Taxa de utilização de 65% (não especifica qual recurso)	Acesso aquaviário	Sem registro
Guo <i>et al.</i> (2015)	C1	AWT/AST de 0,1 a 0,5	Acesso aquaviário, berços, guindastes de cais, guindastes de pátio e veículos	Contêiner
Kulkarni <i>et al.</i> (2017)	<sup>a</sup>	Tempo médio do caminhão no sistema igual a 10 minutos	Portões	Multi-propósito
N. Li <i>et al.</i> (2017)	C1	AWT/AST de 0,1 a 0,5	Acesso aquaviário, berços, guindastes de berço, guindastes de pátio, <i>slots</i> de armazenagem e portões	Contêiner
Liu <i>et al.</i> (2016)	<sup>a</sup>	Sem registro	Acesso aquaviário	Sem registro
Marinacci, Quattrini e Ricci (2008)	C2	Taxa de utilização de 65% (não especifica qual recurso)	Acesso aquaviário	Contêiner
Netto, Botter e Medina (2015)	<sup>a</sup>	Taxa de utilização de 85% em berços; tempo médio de espera igual a 240 horas (valores estipulados em contrato)	Berços, pátio, expedição ferroviária	Granel sólido
Rusgiyanto <i>et al.</i> (2018)	<sup>a</sup>	Taxa de utilização de pátio. Não especifica limiar	Depósitos terrestres, portões, pátio, berços	Contêiner
Tian <i>et al.</i> (2016)	C1	AWT/AST de 0,5	Acesso aquaviário	Multi-propósito
Wang, Yang e Guo (2013)	C1	AWT/AST de 0,3 a 0,5	Acesso aquaviário	Granel sólido
Zhang, Aguilar e Lazcano (2019)	<sup>a</sup>	Quando a demanda é restringida, <i>i.e.</i> movimentação de saída é menor do que a demanda projetada	Portões de caminhão	Contêiner

Notas: <sup>a</sup> Todos os autores possuem este artigo como o único incluso na análise de conteúdo deste trabalho.

Além de Feng *et al.* (2015), que consideraram a capacidade portuária como a movimentação com custo mínimo por tonelada movimentada, todas as publicações consideraram a abordagem de engenharia e não a econômica, ou seja, associada a um indicador operacional (CHANG *et al.*, 2012).

Para melhor entendimento dos critérios, alguns conceitos devem ser esclarecidos:

- O critério AWT/AST significa verificar a razão entre o tempo médio de espera (*average waiting time*, AWT) e o tempo médio de serviço (*average service time*, AST).
- O tempo de espera é o período entre a chegada da embarcação no porto (registrado, por exemplo, quando o navio fundeia na barra ou quando chega a

determinada distância do porto) e o momento que a embarcação começa a se dirigir ao berço.

- Já o tempo de serviço (AST) é o tempo que a embarcação permaneceu no cais.
- A taxa de utilização de um recurso é a razão entre a somatória dos tempos de utilização dele e o tempo total decorrido;
- A taxa de comprometimento de berço é semelhante à sua taxa de utilização, porém considera o tempo entre a permissão para atracar até o desembarque do práctico quando a embarcação está de saída (WADHWA, 1992).
- A taxa de disponibilidade de berço (*berth-on-arrival rate*) é o percentual de embarcações que, ao chegarem no terminal, tem berço disponível sem necessidade de esperar pela atracação (H. LI; 2017).
- O método proposto por Olba *et al.* (2017) é voltado ao acesso aquaviário e se baseia em identificar no gráfico AWT/AST Vs. demanda, o ponto de transição entre estado normal e estado congestionado, por meio do seguinte procedimento:
  - Estimar um intervalo de demanda para cálculo de valores de AWT/AST (*e.g.* 0 a 1,5) e ocupação de berço (*e.g.* 0,25 a 0,8);
  - Executar número suficiente de simulações com diferentes demandas até que valores de estado normal e congestionado sejam obtidos;
  - Encontrar valor médio de número máximo de viagens associado ao valor de AWT/AST igual a 1;
  - Aplicar coeficiente de redução igual a 0,9.

Isso posto, os critérios mais utilizados são a relação AWT/AST (9 ocorrências, ou 12, se considerar as publicações de Olba *et al.*, 2015, Olba *et al.*, 2017, e Olba *et al.*, 2019) e a taxa de utilização (7 ocorrências). Ainda que se busque entendimento acerca de como os critérios para avaliação de capacidade portuária são tratados na literatura, uma análise mais profunda sobre a escolha de critérios não é possível. Esse processo não é explicado na maioria dos artigos, e a maior ocorrência de determinado critério está mais relacionada ao maior número de publicações de alguns *clusters* de pesquisa em vez de conceitos bem estabelecidos por todo o mundo.

Algumas publicações (DING, 2010; ZHANG; AGUILAR; LAZCANO, 2019 XIN *et al.*, 2019; NIE *et al.*, 2017; REIS; ALMEIDA, 2019); não consideraram critério de nível de serviço, ou seja, consideraram a capacidade teórica do terminal. Isso vai de encontro ao que a literatura conceitual aponta, em função dos altos custos associados à espera de navios.

Os limiares dos critérios variam em função da publicação. No caso do indicador AWT/AST, há publicações que apresentam intervalos de limiares em vez de um único valor, ou seja, dentro do próprio artigo há variação de parâmetro.

Geralmente, os valores adotados não são justificados. Todavia, alguns artigos (WANG; YANG; GUO 2013; WANG *et al.*, 2017; OLBA *et al.*, 2015; OLBA *et al.*, 2015) citaram a UNCTAD (1985) como referência para valores de AWT/AST. Ainda, Netto, Botter e Medina (2015) mencionaram questões contratuais para explicar suas escolhas. Neste caso, as companhias de navegação devem pagar multas previstas em contrato quando o tempo de espera ultrapassa 240 horas, ou seja, 10 dias. A escolha dos 85% de taxa de utilização de cais é motivada por reservar 5% do tempo para manutenções preventivas, o que gera comprometimento de berço igual a 90%, que para o terminal em questão os autores consideraram o limite para que não haja risco de interrupção de operações.

O escopo do modelo, ou seja, quais processos portuários foram considerados no modelo, varia substancialmente. O acesso aquaviário é o componente mais analisado entre os *clusters* de pesquisa e, em muitas publicações, é o único processo analisado. Os berços também são examinados em muitos estudos, mas as operações do pátio são frequentemente desconsideradas.

Com relação ao tipo de carga, a maioria dos artigos é dedicada à análise de terminais de contêineres, característica comum na literatura de operações portuárias. Granel sólido é o segundo tipo de carga mais analisado. Nos trabalhos que avaliaram a capacidade de acesso aquaviário, às vezes o tipo de carga não é declarado no estudo, uma vez que a movimentação de saída é geralmente avaliada em quantidade de acessos de embarcações, em vez de toneladas ou *twenty-foot equivalent units* (TEUs).

O embasamento teórico de conceitos sobre capacidade portuária foi pequeno nos artigos analisados. Ainda que a comunicação por meio de artigos resulte em limitação de número de palavras nos trabalhos, a maioria dos artigos sequer adota alguma definição sobre capacidade portuária. Outras deficiências podem ser relatadas acerca da ausência de discussão sobre diferentes definições possíveis, assim como dos critérios para sua avaliação e da forma como esse processo pode ser realizado por meio de outros métodos (*e.g.* teoria de filas). Esse

tipo de conhecimento geralmente é apoiado por manuais e livros, como UNCTAD (1985), PIANC (2014), Ligteringen e Velsink (2012) e Groenveld (2001), em vez de literatura revisada por pares.

### 3.3.2 Ferramentas e parâmetros de simulação

O Quadro 7 e o Quadro 8 sintetizam as informações para cada artigo, referentes à técnica de simulação, *software* utilizado, replicação do modelo e *warm up* de simulação. O Quadro 7 mostra a análise para artigos de periódicos, enquanto o Quadro 8 mostra para artigos de conferências e capítulos de livro.

Quadro 7 — Análise de conteúdo de artigos de periódicos: técnica de simulação, *software* utilizado, replicação do modelo e *warm up* de simulação

Artigo	Cluster de pesquisa	Técnica de simulação	Software utilizado	Replicação do modelo	Warm up de simulação
Ding (2010)	<sup>a</sup>	DES <sup>b</sup>	Sem registro	1000 vezes	Sem registro
Feng <i>et al.</i> (2015)	<sup>a</sup>	DES	Arena	30 vezes	Sem registro
Habeeb, Guo e Song (2018)	C1	DES	Arena	50 vezes	30 dias
Huang <i>et al.</i> (2008)	<sup>a</sup>	Sem registro	Sem registro	8 vezes	Sem registro
Keceli, Aksoy e Aydogdu (2013)	<sup>a</sup>	DES	Arena	10 vezes	Sem registro
A. Li <i>et al.</i> (2007)	C3	Sem registro	Automod	5 vezes	300 dias
H. Li <i>et al.</i> (2017)	C3	DES	Sem registro	100 vezes	30 dias
Mazouz, Naji e Lyu (2017)	<sup>a</sup>	DES	Witness	Sem registro	Sem registro
Ng e Wong (2006)	<sup>a</sup>	DES	Promodel	Sem registro	Sem registro
Nie <i>et al.</i> (2017)	C5	Monte Carlo <sup>b</sup>	Matlab	Sem registro	Sem registro
Olba <i>et al.</i> (2015)	C4	DES	Sem registro	10 vezes	Sem registro
Olba <i>et al.</i> (2017)	C4	DES	Sem registro	10 vezes	1 dia
Olba <i>et al.</i> (2019)	C4	DES	Simio	5 vezes	Sem registro

Notas: <sup>a</sup> Todos os autores possuem este artigo como o único incluído na análise de conteúdo deste trabalho.

<sup>b</sup> Apenas para obtenção de coeficientes.

Quadro 7 — Continuação

Artigo	Cluster de pesquisa	Técnica de simulação	Software utilizado	Replicação do modelo	Warm up de simulação
Park e Noh (1987)	<sup>a</sup>	DES	SLAM e FORTRAN	10 vezes	Sem registro
Reis e Almeida (2019)	<sup>a</sup>	DES	AnyLogic	Sem registro	Sem registro
Ricci, Marinacci e Rizzetto (2012)	C2	DES	Planimate	Sem registro	Sem registro
Sang <i>et al.</i> (2017)	<sup>a</sup>	Baseado em agentes; Monte Carlo	Sem registro	31 vezes	Sem registro
Shang <i>et al.</i> (2019)	C1	DES	Simio	Sem registro	Sem registro
Wadhwa (1992)	<sup>a</sup>	Sem registro	Think Pascal	Sem registro	Sem registro
Wang <i>et al.</i> (2015)	C1	DES	Arena	Sem registro	Sem registro
Wang <i>et al.</i> (2017)	C1	DES	Arena	Sem registro	Sem registro
Wang <i>et al.</i> (2013)	C1	DES	Sem registro	Sem registro	Sem registro
Xin <i>et al.</i> (2019)	C5	DES <sup>b</sup>	Sem registro	10 vezes	Sem registro
Zhu <i>et al.</i> (2017)	<sup>a</sup>	DES	Witness	Sem registro	Sem registro

Notas: <sup>a</sup> Todos os autores possuem este artigo como o único incluído na análise de conteúdo deste trabalho.

<sup>b</sup> Apenas para obtenção de coeficientes.

Quadro 8 — Análise de conteúdo de capítulos de livro e artigos de conferências: técnica de simulação, *software* utilizado, replicação do modelo e *warm up* de simulação

Artigo	Cluster de pesquisa	Técnica de simulação	Software utilizado	Replicação do modelo	Warm up de simulação
Malavasi e Ricci (2005)	C2	Sem registro	Sem registro	Sem registro	Sem registro
Guo <i>et al.</i> (2015)	C1	DES	Arena	10 vezes	Sem registro
Kulkarni <i>et al.</i> (2017)	<sup>a</sup>	DES	Java	10000 vezes	Sem registro
N. Li <i>et al.</i> (2017)	C1	DES	Arena	Sem registro	Sem registro
Liu <i>et al.</i> (2016)	<sup>a</sup>	DES	Arena	Sem registro	Sem registro
Marinacci, Quattrini e Ricci (2008)	C2	Sem registro	Sem registro	Sem registro	Sem registro
Netto, Botter e Medina (2015)	<sup>a</sup>	DES	Arena	10 vezes	Sem registro
Rusgiyanto <i>et al.</i> (2018)	<sup>a</sup>	DES	Matlab	Sem registro	Sem registro
Tian <i>et al.</i> (2016)	C1	DES	Arena	50 vezes	Sem registro
Wang, Yang e Guo (2013)	C1	DES	Arena	40 vezes	Sem registro
Zhang, Aguilar e Lazcano (2019)	<sup>a</sup>	DES	FlexTerm	Sem registro	Sem registro

Notas: <sup>a</sup> Todos os autores possuem este artigo como o único incluído na análise de conteúdo deste trabalho

Todos os artigos que documentaram as técnicas de simulação empregadas utilizaram DES, exceto as seguintes exceções. Sang *et al.* (2017) utilizaram uma abordagem que combina Monte Carlo e simulação baseada em agentes. Ding (2010) e Xin *et al.* (2019)

aplicaram DES e Nie *et al.* (2017) usaram a simulação de Monte Carlo em seus trabalhos, mas os experimentos foram realizados apenas para obter coeficientes que foram utilizados em fórmulas simples para calcular a capacidade portuária.

O *software* Arena é amplamente utilizado nos artigos avaliados (11 ocorrências), o que é reflexo da dominância da modelagem de eventos discretos. Todavia, outras ferramentas também são capazes de modelar essa abordagem. Ainda, em 10 artigos não foi possível verificar qual ferramenta foi utilizada.

O número de replicações realizadas variou bastante em função dos artigos, embora seja possível verificar a moda de 10 replicações. Todavia, a maior parte dos artigos não documentou esse aspecto, e apenas dois artigos (HUANG *et al.*, 2008, OLBA *et al.*, 2019) justificaram a adoção do número de replicações com argumentos estatísticos.

Situação semelhante ocorre com o *warm up*, *i.e.* o período entre o início da simulação e o início da coleta de estatísticas para estimação de parâmetros. Embora seja possível verificar a moda de 30 dias, a grande maioria dos artigos não registrou esse parâmetro, e não foi verificada justificativa para adoção de qualquer valor.

Em suma, considerando os registros acerca da técnica de simulação, *software* escolhido, replicação do modelo e *warm up*, é verificado que o método de simulação não foi devidamente documentado nos trabalhos, o que indica falta de rigor metodológico na literatura sobre o assunto.

Considerando os aspectos abordados nas Seções 3.3.1 e 3.3.2, nenhum dos documentos apresentou um método claro e com rigor científico para avaliação de capacidade portuária baseado em simulação e capaz de analisar operações desde acessos terrestres a vias navegáveis. Além disso, na forma como foram apresentados, os artigos avaliados não conseguem fornecer respostas sobre quais modificações de infraestrutura são melhores para o porto ao longo do crescimento da demanda. O objetivo da Seção 4 é preencher essa lacuna. A Seção 3.4 discute os critérios de avaliação que devem ser usados na avaliação de capacidade portuária, os quais compõem parte relevante da aplicação do método.

### 3.4 DISCUSSÃO SOBRE CRITÉRIOS PARA AVALIAÇÃO DE CAPACIDADE PORTUÁRIA

De acordo com a revisão de literatura da Seção 3.3, a abordagem de engenharia é amplamente utilizada na avaliação da capacidade portuária baseada em simulação, no entanto, não há consolidação sobre os critérios de avaliação a serem utilizados:

- A taxa de utilização de recursos não representa diretamente a espera dos usuários na fila, o que é importante para a avaliação do custo de oportunidade.
- A relação AWT/AST tem a desvantagem de que um aumento no tempo de serviço contribui para a melhoria do indicador (UNCTAD, 1985).
- O tempo médio de ciclo dos navios não possui esses problemas e a literatura (DA CRUZ; FERREIRA; AZEVEDO, 2013; HA; YANG, 2017; REZAEI *et al.*, 2018) o trata como um indicador relevante de desempenho portuário. No entanto, a escolha do limiar adotado ainda pode depender dos valores disponíveis na literatura de AWT/AST, mas considerando um tempo de serviço relacionado a uma operação não congestionada, evitando assim o problema descrito para o indicador AWT/AST.

A escolha do limiar é subjetiva e interfere bastante nos resultados. Pode haver muitas contratuais altas que impeçam o terminal de submeter os navios a uma espera acima de um certo nível (como visto no trabalho de Netto, Botter e Medina 2015), ou o porto pode ter como política um certo nível de serviço para atrair navios de linha (LIGTERINGEN; VELSINK, 2012, p. 123). Nestes casos ou em similares, a adoção de limiares é mais direta. Em outros, pode ser difícil atribuir a um determinado desempenho operacional a perda de um cliente em um porto, pois vários fatores influenciam a escolha do cliente (REZAEI *et al.*, 2018).

Além disso, como discutido na Seção 3.3, existem publicações cujos autores não empregaram apenas um valor limiar, mas um intervalo de limiares, devido à subjetividade da escolha do parâmetro. Nesse sentido, é possível interpretar a abordagem de engenharia como uma regra prática mais elaborada, em vez de uma abordagem rigorosa e indiscutível. Além disso, pode ser difícil convencer os gerentes de um porto a gastarem grandes quantias de dinheiro com base em resultados de simulação cujos parâmetros são subjetivos e sem relação direta com finanças.

Na abordagem econômica, as análises realizadas por Chang *et al.* (2012) e Feng *et al.* (2015) são baseadas no cálculo do custo por carga movimentada de diferentes configurações de recursos e na escolha do cenário mais barato. A chamada “movimentação ótima” ou “capacidade ótima”, ou seja, a movimentação relacionada ao custo mínimo por tonelada movimentada, não foi considerada neste processo. Não é apropriado realizar a escolha de capacidade portuária através desses valores, porque quando um custo fixo é alterado, mesmo que não afete a operação de um porto, o valor da capacidade é alterado na lógica do custo mínimo por tonelada movimentada. Este comportamento enfraquece o uso deste parâmetro na avaliação de desempenho portuário e é demonstrado no Apêndice A.

O uso da abordagem econômica pode ser prejudicado pela disponibilidade de dados de custo, além do possível problema de lidar com custos associados a diferentes atores do porto (LIGTERINGEN; VELSINK, 2012), cada um com um objetivo diferente, conforme explicado em Xiao *et al.* (2012). Ainda, a lógica do custo mínimo por carga movimentada considera um cenário de máxima integração entre as partes interessadas, onde a logística traz apenas custos de transporte de uma mercadoria do ponto A ao ponto B. Independentemente dos atores analisados, os efeitos do custo de oportunidade com o crescimento da demanda devem ser avaliados objetivamente.

Isso posto, considerando a subjetividade da abordagem de engenharia, a adoção da abordagem econômica é preferível para um planejamento de expansão portuária, quando possível. No entanto, se os limites operacionais forem estabelecidos por contrato, se os planejadores portuários desejam um valor de capacidade para avaliação de desempenho ou se o modelo de simulação tem um escopo reduzido, a abordagem de engenharia é mais adequada.

Posteriormente, a Seção 4 apresenta o método proposto, que pode ser aplicado com diferentes critérios de avaliação, tanto na abordagem de engenharia quanto na abordagem econômica.

#### 4 MÉTODO BASEADO EM SIMULAÇÃO PROPOSTO PARA AVALIAÇÃO DE CAPACIDADE E PLANEJAMENTO DE EXPANSÃO PORTUÁRIA

O objetivo do método é viabilizar, por meio de simulação, o desenvolvimento de um planejamento de expansão de um terminal portuário. Em relação à capacidade portuária, duas perguntas podem ser feitas, inspiradas na classificação de Chu e Huang (2005) em relação à oferta ou demanda:

(1) Perspectiva da oferta: quanta carga o sistema, com sua operação e infraestrutura atuais, consegue movimentar em condições normais?

(2) Perspectiva da demanda: para atender adequadamente à demanda de carga esperada, que mudanças operacionais e de infraestrutura devem ser feitas e quando?

Neste tipo de exercício, o sistema geralmente é separado em subsistemas, definindo-se valores de capacidade para cada subsistema (por exemplo, berços, pátios de armazenamento e portões de caminhões) e verificando-se qual valor é o mais baixo — este seria o gargalo e representaria a capacidade do sistema como um todo. Essa abordagem pode simplificar algumas análises, mas é imprecisa porque não considera a interação entre os subsistemas. Também pode não ser suficiente orientar a aquisição de recursos de componentes dentro desses subsistemas — um equipamento de pátio ou de cais, por exemplo. Além disso, não é relevante, por si só, atribuir valores de capacidade de movimentação a diferentes elos em um sistema, pois cada um contribui para a capacidade do sistema como um todo e nenhum deles é capaz de fornecer o serviço do sistema sozinho. Por fim, a segunda pergunta listada deve ser respondida adequadamente, utilizando-se a primeira como auxílio ou não.

São propostos três procedimentos para, por meio de simulação, obter respostas para as duas questões listadas (a segunda pode ser respondida por meio de abordagem econômica ou de engenharia). Conforme explicado na Seção 3.4, a perspectiva da oferta não é adequada para a abordagem econômica, porque o valor de capacidade não está diretamente relacionado ao desempenho operacional.

Todos os três procedimentos são suportados pelo método de Monte Carlo (KROESE *et al.*, 2014), onde a replicação de um modelo estocástico (construído por DES, modelagem baseada em agentes ou outra técnica) permite o estudo do comportamento do sistema (por exemplo, valores esperados de AWT de navio, valores de custos e movimentação de carga)

sem modelagem matemática. O número de repetições, ou seja, o tamanho da amostra, deve ser estimado com base em estatísticas. A sugestão é estimar com base na distribuição  $t$  com uma amostra inicial, para um determinado nível de confiança e erro relativo, e replicar o modelo enquanto o tamanho da amostra necessário for maior que o tamanho da amostra atual. Se mais de 30 amostras forem coletadas, a distribuição normal é usada. A distribuição normal é esperada devido ao teorema do limite central e, com tamanho amostral pequeno ( $n < 30$ ), a distribuição  $t$  é adequada. Este subprocedimento possui as seguintes etapas:

- (1) Executar o modelo  $ISS$  vezes
- (2)  $n = ISS$
- (3) Para cada  $i$ , calcular  $NSS_i$
- (4)  $NSS_E =$  o maior  $NSS_i$
- (5) Se  $n > NSS_E$ , parar o procedimento
- (6) Enquanto  $n < NSS_E$ 
  - a. Executar o modelo uma vez
  - b.  $n = n + 1$
  - c. Para cada  $i$ , calcular  $NSS_i$
  - d.  $NSS_E =$  o maior  $NSS_i$

Onde:

$ISS$  é o tamanho inicial da amostra (*initial sample size*)

$n$  é o tamanho atual da amostra;

$i$  é um critério de avaliação (e.g. custo por carga movimentada, AWT/AST, movimentação de saída);

$NSS_i$  é o tamanho necessário de amostra para  $i$  (*needed sample size for i*); e

$NSS_E$  é o tamanho necessário na amostra para o experimento (*needed sample size of the experiment*).

O cálculo de  $NSS_i$  é feito conforme mostrado na Seção 3.2.3.2.

Também em relação ao tamanho da amostra, são feitas algumas adaptações neste subprocedimento para evitar rodadas de simulação desnecessárias. No procedimento da oferta, se o valor médio já estiver fora da faixa de limiar, o subprocedimento será

interrompido. No procedimento da perspectiva da demanda com abordagem de engenharia, se for comprovado que um valor do indicador está acima ou abaixo do respectivo limiar, o procedimento também será interrompido. E na perspectiva do procedimento de demanda com abordagem econômica, se um custo por carga movimentada for provado maior que o do cenário base (considerando erro aceitável adotado), o procedimento será interrompido.

Além dessa avaliação do tamanho da amostra, os procedimentos detectam valores discrepantes, de modo que as variáveis calculadas expressem o comportamento esperado do sistema com os parâmetros de entrada. É utilizada a abordagem de Tukey (1977), que consiste em descartar valores fora da faixa de 1,5 vezes de desvio interquartilico acima do quartil superior e abaixo do quartil inferior.

Isso posto, os três procedimentos são explicados nas Seções 4.1 e 4.2. No Apêndice B, Apêndice C e Apêndice D, são mostrados os códigos implementados no programa AnyLogic para operacionalização do método.

#### 4.1 PROCEDIMENTO DA PERSPECTIVA DA OFERTA

O procedimento da perspectiva da oferta é uma heurística contínua semelhante ao método de bissecção (que garante convergência) que busca um valor de movimentação do sistema associado suficientemente próximo ao limiar do critério escolhido. Ele assume que a função é crescente (quando diretamente proporcional, *e.g.* taxa de utilização,  $AWT/AST$ ) ou decrescente (quando inversamente proporcional, *e.g.* taxa de disponibilidade de berço) em todo o seu domínio. Essa característica é verdadeira para os critérios mais utilizados, mas sempre deve ser verificada.

- (1)  $SD = SD^0$
- (2) Executar o modelo para valores de  $BS_i$  (para todo  $i$ ) e  $SD$ 
  - Calcular  $EC$  e  $OF$
  - Armazenar valores de  $SD$ ,  $EC$  e  $OF$
  - $CC = EC$
- (3) Se  $CC < T$ ,  $SS = SS \times PC$ . Senão,  $SS = SS \times (-PC)$ .
- (4) Enquanto  $|(CC - T) / T| > AE$ 
  - $TnotCrossed = verdadeiro$

- Enquanto  $TnotCrossed$ 
  - $SD = SD + SS$
  - $DTT = CC - T$
  - Se  $SD$  já foi simulada, sair deste *while loop*. Senão, executar passo 2.
  - Se  $(CC - T) \times DTT \leq 0$ ,  $TnotCrossed = \text{falso}$ .
- $SS = SS / (-2)$

(5) Resgatar  $CC$  e  $OF$  associado a esse valor de  $CC$ .  $OF$  é a capacidade de movimentação do sistema.

Onde:

$SD$  é a demanda de simulação — *simulation demand* (unidades/ano);

$SD^0$  é a demanda de simulação inicial (unidades/ano);

$i$  é um grupo de recursos — *resource pool*;

$BS_i$  é o número de unidades de  $i$  no cenário base;

$EC$  é o valor do critério de avaliação — *evaluated criterion*;

$OF$  é a movimentação de saída do sistema — *outflow* (unidades/ano);

$T$  é o limiar (*threshold*) do critério de avaliação;

$SS$  é o passo de busca — *search step* (unidades/ano);

$PC$  é uma constante de proporcionalidade (*proportionality constant*) que indica a relação do critério de avaliação com  $SD$  (1 se for diretamente proporcional, e -1 se for inversamente proporcional);

$CC$  é o valor atual do critério (*current criterion value*);

$AE$  é o erro aceitável da amostra — *accepted error* (%);

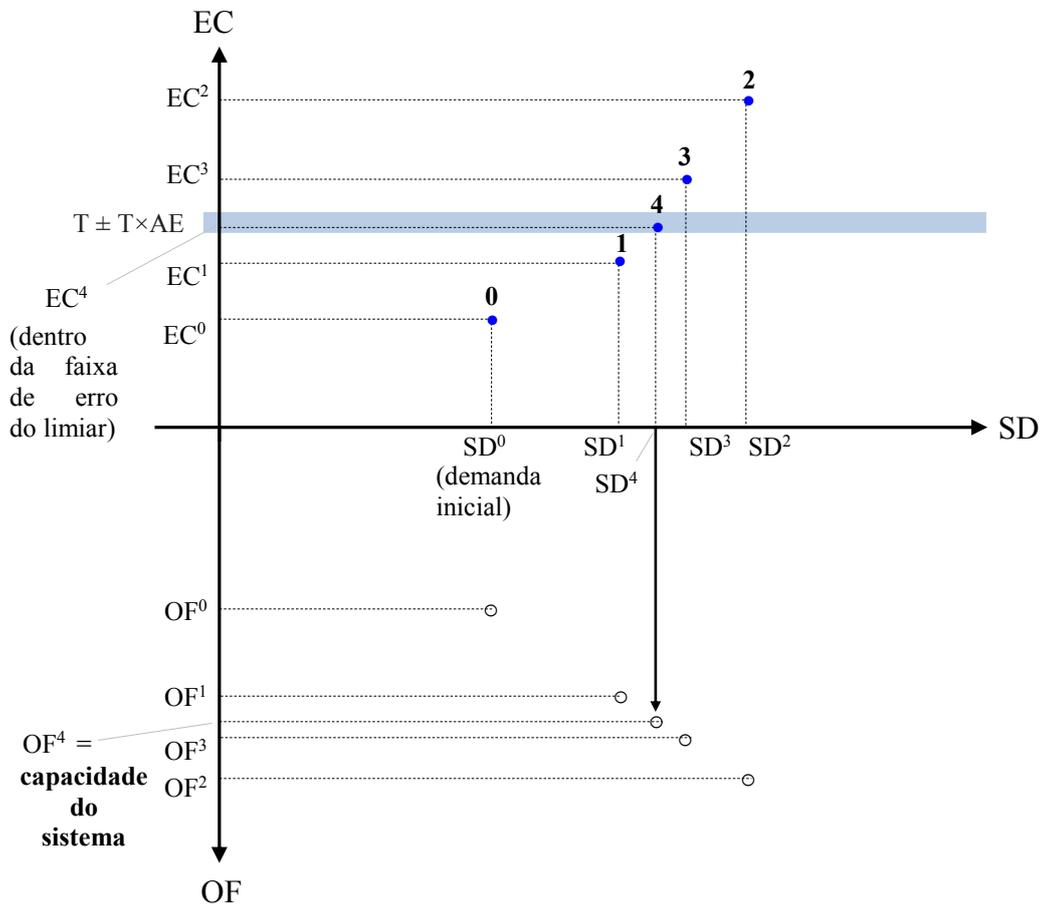
$DTT$  é uma variável auxiliar para verificar se a busca ultrapassou o limiar; e

$TnotCrossed$  é uma variável booleana auxiliar.

A Figura 4 ilustra a aplicação do procedimento descrito, utilizando-se das legendas ora mostradas. No exemplo, foram avaliados os valores de  $EC$  e  $OF$  (mostrados em dois quadrantes para melhor visualização em duas dimensões) para 5 valores de  $SD$  ( $SD^0$ ,  $SD^1$ ,  $SD^2$ ,  $SD^3$  e  $SD^4$ ). Os valores de  $EC$  e  $OF$  são calculados pela média dos valores das simulações com mesmo  $SD$  como parâmetro de entrada, excluindo-se os valores espúrios por

desvio interquartil, conforme descrito na Seção 4. No referido exemplo, o procedimento inicia com demanda  $SD^0$ ; após, com demanda  $SD^1 = SD^0 + SS$ ; após, com  $SD^2 = SD^1 + SS$ . Como o valor  $EC^2$  ultrapassou a faixa de erro do limiar,  $SS$  foi dividido por -2, ou seja, a busca mudou sua direção e encurtou o passo pela metade. Simulando-se para  $SD^3 = SD^2 + SS$ , obtém-se  $EC^3$ , ainda acima do limiar. Com  $SD^4 = SD^3 + SS$ , retorna-se ao valor de  $SD^1$ , já simulado. Por isso,  $SS$  é novamente dividido por -2, e  $SD^4 = SD^4 + SS$  é simulado. O valor de  $EC^4$  está dentro da faixa de erro do limiar, e  $OF^4$ , o valor de movimentação de saída associado a esse valor, é o valor de capacidade do sistema.

Figura 4 — Exemplo ilustrativo do procedimento da perspectiva da oferta



#### 4.2 PERSPECTIVA DE DEMANDA

A perspectiva de demanda busca encontrar, considerando os *resource pools* (grupos de recursos cujas expansões serão avaliadas, e.g. berços, *slots* de contêineres e portões de

caminhões) escolhidos, as configurações ótimas de recursos associadas a determinados valores de movimentação. Os procedimentos são baseados em avaliar, para dada demanda de simulação e dado cenário base (número de unidades em cada um dos *resource pools*), qual ou quais incrementos de recursos são mais benéficos (se algum for). Esse processo deve ser repetido para demandas crescentes até que um valor máximo de movimentação seja atingido. O procedimento tem como resultado um plano de ações que orienta quais melhorias devem ser feitas ao longo do crescimento da demanda.

As diferenças nos procedimentos das abordagens de engenharia e econômicas estão na maneira como a necessidade de incremento de recursos é avaliada.

O procedimento da abordagem de engenharia considera como gatilho para expansão os limiares de indicadores operacionais escolhidos, que estão associados aos *resource pools* (e.g. um *resource pool* X será expandido quando um indicador operacional Y chegar a determinado valor).

Já a abordagem econômica avalia os valores de custo por tonelada movimentada para o cenário base e seus vizinhos superiores, que são cenários em que o número de unidades de recursos é o mesmo para todos os conjuntos de recursos, exceto um, que possui um passo a mais do que o cenário base (e.g. um cenário com 2 berços e 7 portões de caminhão é vizinho superior do cenário com 2 berços e 6 portões, considerando que o número de portões possa aumentar de um em um). A quantidade de cenários vizinhos superiores é igual à de *resource pools* e um desses cenários se torna o cenário base se o custo por carga movimentada for menor do que o do cenário base atual.

#### 4.2.1 Procedimento da abordagem de engenharia

(1)  $SD = SD^0$

(2) Fazer

- Fazer

i. Executar modelo para valores de  $BS_i$  (para todo  $i$ ) e  $SD$

1. Calcular cada  $EC_i$  e  $OF$

2. Para cada  $i$ ,  $CC_i = EC_i$

3.  $j = OF$

4. Armazenar valores de  $SD$ ,  $EC_i$  e  $OF$ ii.  $ExpansionNeeded = \text{falso}$ iii. Para cada  $i$ 1. Se  $(CC_i - T_i) \times PC_i > 0$ a.  $BS_i = BS_i + RS_i$ b.  $ExpansionNeeded = \text{verdadeiro}$ Enquanto  $ExpansionNeeded$ 

- Para cada  $i$ ,  $ORS_{ij} = BS_i$
- Armazenar valores de  $ORS_{ij}$
- $SD = SD + SS$

Enquanto  $j < MED$ 

(3) Os valores de  $ORS_{ij}$  e respectivos  $j$  formam o plano de expansões no decorrer do crescimento da demanda.

Onde:

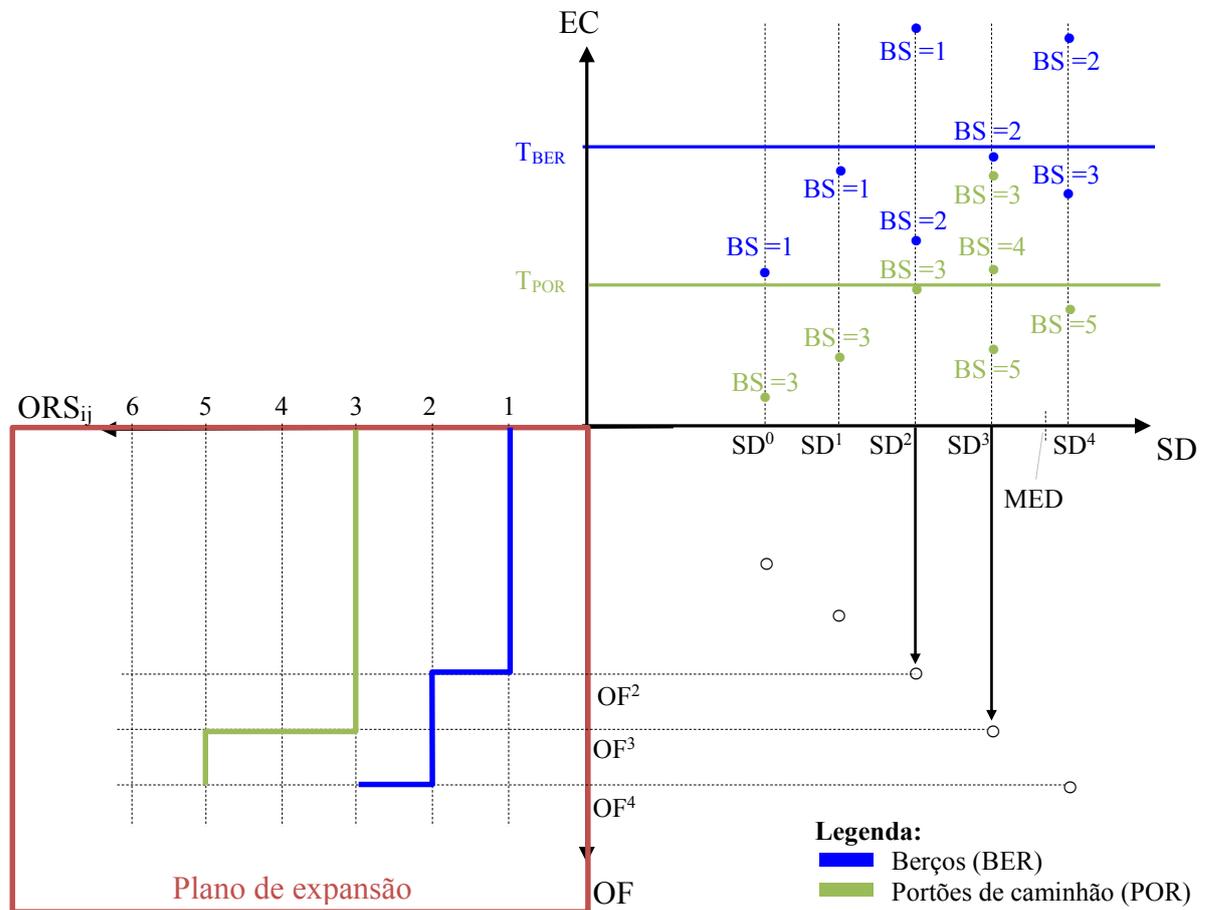
 $SD$  é a demanda de simulação — *simulation demand* (unidades/ano); $SD^0$  é a demanda de simulação inicial (unidades/ano); $i$  é um *resource pool*; $BS_i$  é o número de unidades de  $i$  no cenário base; $EC_i$  é o valor do critério de avaliação para  $i$ ; $OF$  é a movimentação de saída (*outflow*) avaliada (unidades/ano); $j$  é um valor de referência de movimentação de saída (unidades/ano); $CC_i$  é o valor de critério de avaliação atual para  $i$ ; $ExpansionNeeded$  é uma variável booleana auxiliar; $T_i$  é o limiar de  $i$ ;

$PC_i$  é uma constante de proporcionalidade que indica relação de  $EC_i$  com  $SD$  (1 indica que há proporcionalidade direta, e -1 indica indireta);

 $RS_i$  é o passo de recursos para  $i$ ; $ORS_{ij}$  é a configuração ótima de recursos para  $i$  e  $j$  (unidades); $SS$  é o passo de busca (unidades/ano); e $MED$  é a demanda máxima esperada (unidades/ano).

A Figura 5 ilustra a aplicação do procedimento descrito, utilizando as legendas ora mostradas. Foi considerada a expansão de dois *resource pools*: berços (BER) e portões de caminhão (POR), com  $RS_{BER}$  e  $RS_{POR}$  igual a uma unidade. Os valores de entrada para este procedimento são  $SD$ ,  $BS_{BER}$  e  $BS_{POR}$ , a partir dos quais são estimados os valores de  $EC_{BER}$ ,  $EC_{POR}$ ,  $OF$  e  $ORS_{ij}$ . Os limiares  $T_{BER}$  e  $T_{POR}$  funcionam como gatilhos para a expansão desses grupos de recursos, ou seja, quando  $EC_{BER}$  for maior do que  $T_{BER}$ , a quantidade de berços aumenta em uma unidade, e quando  $EC_{POR}$  for maior do que  $T_{POR}$ , a quantidade de portões de caminhão aumenta em uma unidade. Para possibilitar a visualização em 2 dimensões, as variáveis  $EC$ ,  $SD$ ,  $OF$  e  $ORS_{ij}$  são mostradas em três quadrantes. O exemplo inicia com  $SD = SD_0$ , e o valor de  $SD$  aumenta em passo constante  $SS$  à medida que não é verificada a necessidade de expansão dos grupos de recursos avaliados. O procedimento é encerrado após ser simulada demanda que é acima do valor  $MED$ . Os valores do terceiro quadrante do gráfico formam o plano de expansão do terminal.

Figura 5 — Exemplo ilustrativo do procedimento perspectiva da demanda com abordagem de engenharia



#### 4.2.2 Procedimento da abordagem econômica

(1)  $SD = SD^0$

(2) Fazer

- Executar o modelo para valores de  $BS_i$  e  $SD$ 
  - i. Calcular  $CHC$  e  $OF$
  - ii.  $CC_{BS} = CHC$
  - iii.  $j = OF$
  - iv. Armazenar valores de  $SD$ ,  $CC_{BS}$  e  $j$  adequadamente
- Fazer
  - i. Para cada  $i$ ,  $ES_i = BS_i$
  - ii.  $ExpansionNeeded = falso$
  - iii. Para cada  $i$

1.  $ES_i = BS_i + RS_i$
2. Executar o modelo para valores de  $ES_i$  e  $SD$ 
  - a. Calcular  $CHC$  e  $OF$
  - b.  $CC_i = CHC$
  - c.  $j = OF$
  - d. Armazenar valores de  $SD$ ,  $CC_i$  e  $j$  adequadamente
- iv. Se o menor  $CC_i \times (1 + AE) < CC_{BS}$ 
  1.  $ExpansionNeeded = true$
  2. Para  $i$  com menor  $CC_i$ 
    - a.  $BS_i = BS_i + RS_i$
    - b.  $CC_{BS} = CC_i$

Enquanto  $ExpansionNeeded$

- Para cada  $i$ ,  $ORS_{ij} = BS_i$
- Armazenar valores de  $ORS_{ij}$  adequadamente
- $SD = SD + SS$

Enquanto  $j < MED$

- (4) Os valores de  $ORS_{ij}$  e respectivos  $j$  formam o plano de expansões no decorrer do crescimento da demanda.

Onde:

$SD$  é a demanda de simulação — *simulation demand* (unidades/ano);

$SD^0$  é a demanda de simulação inicial (unidades/ano);

$i$  é um *resource pool*;

$BS_i$  é o número de unidades de  $i$  no cenário base;

$CHC$  é o custo por tonelada movimentada (unidades monetárias/unidades de movimentação);

$OF$  é a movimentação de saída (*outflow*) avaliada (unidades/ano);

$CC_{BS}$  é o atual custo por tonelada movimentada do cenário base (unidades/ano);

$j$  é um valor de referência da movimentação de saída (unidades/ano);

$ES_i$  é o número de unidades de  $i$  no cenário avaliado;

$ExpansionNeeded$  é uma variável booleana auxiliar;

$AE$  é o erro aceitável (%);

$RS_i$  é o passo de recurso de  $i$ ;

$CC_i$  é o atual custo por tonelada movimentada de cenário com incremento em  $i$  (unidades monetárias/unidades de movimentação);

$ORS_{ij}$  é a configuração ótima de recursos para  $i$  e  $j$  (unidades);

$SS$  é o passo de busca (unidades/ano); e

$MED$  é a demanda máxima esperada (unidades/ano).

A Tabela 1, a Tabela 2 e a Figura 6 ilustram a aplicação do procedimento descrito, utilizando as legendas ora mostradas. Foi considerada a expansão de dois *resource pools*: berços (BER) e portões de caminhão (POR), com  $RS_{BER}$  e  $RS_{POR}$  igual a uma unidade. Os valores de entrada para este procedimento são  $SD$ ,  $BS_{BER}$  e  $BS_{POR}$ , a partir dos quais são estimados os valores de  $CHC$ ,  $OF$  e  $ORS_{ij}$ . Cada linha da Tabela 1 mostra um conjunto de simulações realizado, e as linhas da tabela são mostradas na ordem em que o procedimento é efetuado. Os valores de  $CHC$  são o gatilho para determinado cenário virar cenário base (e por consequência ser incorporado ao plano de expansão). Isso ocorre quando há valor de  $CHC$  inferior ao do cenário base (considerando a margem de erro do experimento), e nesse caso, o cenário com menor  $CHC$  vira cenário base. Após, os cenários de expansão associados ao novo cenário base são avaliados de maneira semelhante, até que nenhuma expansão seja vantajosa. No exemplo ilustrativo, o procedimento orienta a construção de 1 berço quando a demanda de simulação está em  $SD_2$ , e 1 portão de caminhão quando a demanda de simulação está em  $SD_3$ . A Tabela 2 mostra quais configurações de recursos devem ser implementadas para determinados valores de movimentação esperados. Já a Figura 6 ilustra o procedimento de maneira análoga à Figura 5, e nela é possível verificar quando os cenários de expansão viram cenários base (quando há mais de 3 pontos plotados no primeiro quadrante para uma mesma  $SD$ ).

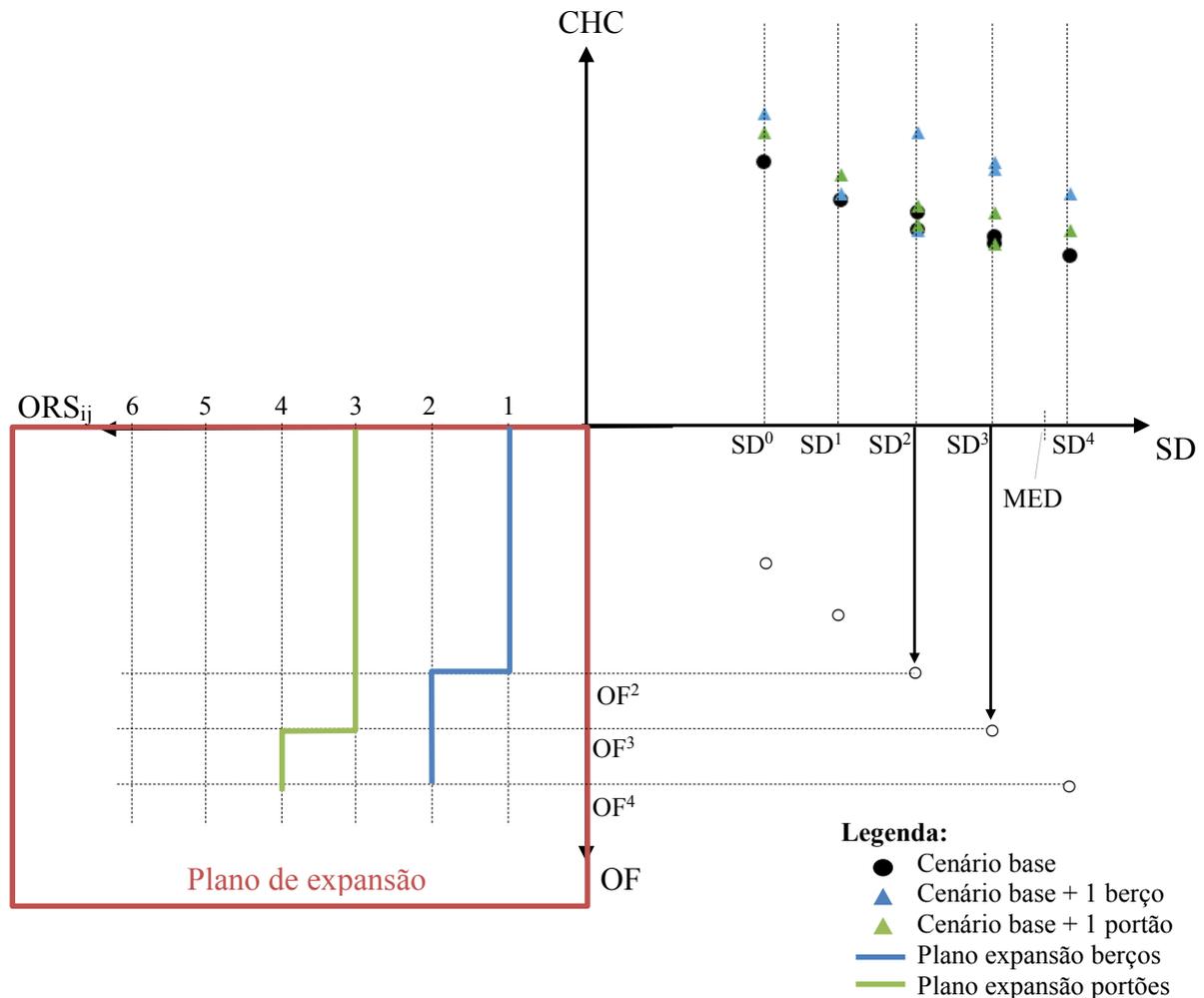
Tabela 1 — Dados de entrada e saída do exemplo ilustrativo do procedimento da perspectiva da demanda com abordagem econômica

Parâmetros de entrada da simulação			Cenário avaliado	OF	CHC (US/un)	Virou cenário base?
SD	ES <sub>BER</sub>	ES <sub>SPOR</sub>				
SD <sub>0</sub>	1	3	Base	OF <sup>0</sup> <sub>{1,3}</sub>	350	-
SD <sub>0</sub>	2	3	Base +1 berço	OF <sup>0</sup> <sub>{2,3}</sub>	430	-
SD <sub>0</sub>	1	4	Base +1 portão	OF <sup>0</sup> <sub>{1,4}</sub>	400	-
SD <sub>1</sub>	1	3	Base	OF <sup>1</sup> <sub>{1,3}</sub>	290	-
SD <sub>1</sub>	2	3	Base +1 berço	OF <sup>1</sup> <sub>{2,3}</sub>	300	-
SD <sub>1</sub>	1	4	Base +1 portão	OF <sup>1</sup> <sub>{1,4}</sub>	330	-
SD <sub>2</sub>	1	3	Base	OF <sup>2</sup> <sub>{1,3}</sub>	270	-
SD <sub>2</sub>	2	3	Base +1 berço	OF <sup>2</sup> <sub>{2,3}</sub>	240	Sim
SD <sub>2</sub>	1	4	Base +1 portão	OF <sup>2</sup> <sub>{1,4}</sub>	280	-
SD <sub>2</sub>	3	3	Base +1 berço	OF <sup>2</sup> <sub>{3,3}</sub>	400	-
SD <sub>2</sub>	2	4	Base +1 portão	OF <sup>2</sup> <sub>{2,4}</sub>	250	-
SD <sub>3</sub>	2	3	Base	OF <sup>3</sup> <sub>{2,3}</sub>	230	-
SD <sub>3</sub>	3	3	Base +1 berço	OF <sup>3</sup> <sub>{3,3}</sub>	350	-
SD <sub>3</sub>	2	4	Base +1 portão	OF <sup>3</sup> <sub>{2,4}</sub>	210	Sim
SD <sub>3</sub>	3	4	Base +1 berço	OF <sup>3</sup> <sub>{3,4}</sub>	330	-
SD <sub>3</sub>	2	5	Base +1 portão	OF <sup>3</sup> <sub>{2,5}</sub>	270	-
SD <sub>4</sub>	2	4	Base	OF <sup>4</sup> <sub>{2,4}</sub>	190	-
SD <sub>4</sub>	3	4	Base +1 berço	OF <sup>4</sup> <sub>{3,4}</sub>	300	-
SD <sub>4</sub>	2	5	Base +1 portão	OF <sup>4</sup> <sub>{2,5}</sub>	240	-

Tabela 2 — Plano de expansão do exemplo ilustrativo do procedimento da perspectiva da demanda com abordagem econômica

Movimentação esperada (un/ano)	Configuração ótima de recursos	
	Berços	Portões de caminhão
OF <sup>0</sup> <sub>{1,3}</sub>	1	3
OF <sup>1</sup> <sub>{1,3}</sub>	1	3
OF <sup>2</sup> <sub>{2,3}</sub>	2	3
OF <sup>3</sup> <sub>{2,4}</sub>	2	4
OF <sup>4</sup> <sub>{2,4}</sub>	2	4

Figura 6 — Gráfico do exemplo ilustrativo do procedimento da perspectiva da demanda com abordagem econômica



#### 4.3 ESPECIFICIDADES METODOLÓGICAS DO CASO TESTE

Os procedimentos apresentados até então visaram generalização tal que permitam sua aplicação para quaisquer grupos de recursos a serem analisados em um porto ou terminal. Com as devidas adaptações, também são passíveis de serem aplicados em outros sistemas logísticos ou até mesmo em ambiente de manufatura ou setor de serviços (tais como hospitais). Nesta seção, são apresentadas especificidades metodológicas do caso teste, em especial relativas a: como a análise de expansão da armazenagem portuária foi considerada; como as operações do terminal do caso teste foram modeladas; e quais os dados de entrada e saída do modelo.

### 4.3.1 Materiais utilizados

A simulação por modelagem de eventos discretos foi utilizada no trabalho, tendo em vista que no modelo desenvolvido, o nível de abstração é médio/operacional, e as entidades (navios, contêineres e caminhões) não serão autônomas, mas sim geradas e processadas de acordo com os processos produtivos do terminal portuário analisado. A modelagem de eventos discretos é amplamente utilizada na literatura de operações portuárias, conforme identificado na revisão de literatura feita por Dragović, Tzannatos e Park (2017).

O uso de *softwares* especializados em simulação facilita a execução do trabalho, contribuindo para a redução do tempo para construção do modelo, melhor visualização dos resultados dos experimentos, dentre outras vantagens. Isso posto, foi utilizado o programa AnyLogic, que é consolidado como uma das principais ferramentas atuais que suportam a modelagem e eventos discretos, além de haver licença de uso adquirida pela Universidade Federal de Santa Catarina.

O AnyLogic utiliza o método congruencial linear para geração de números pseudoaleatórios (BORSCHEV, 2013). A semente adotada para os experimentos foi o horário do sistema computacional em milissegundos.

Os procedimentos descritos na Seção 4 e aplicados no caso teste foram implementados em Java como um *custom experiment* no AnyLogic. Os experimentos foram executados em um computador com processador i7 de 3,20 GHz, sistema operacional Windows 10, 128 GB de SSD e 16 GB de RAM.

### 4.3.2 Descrição do modelo

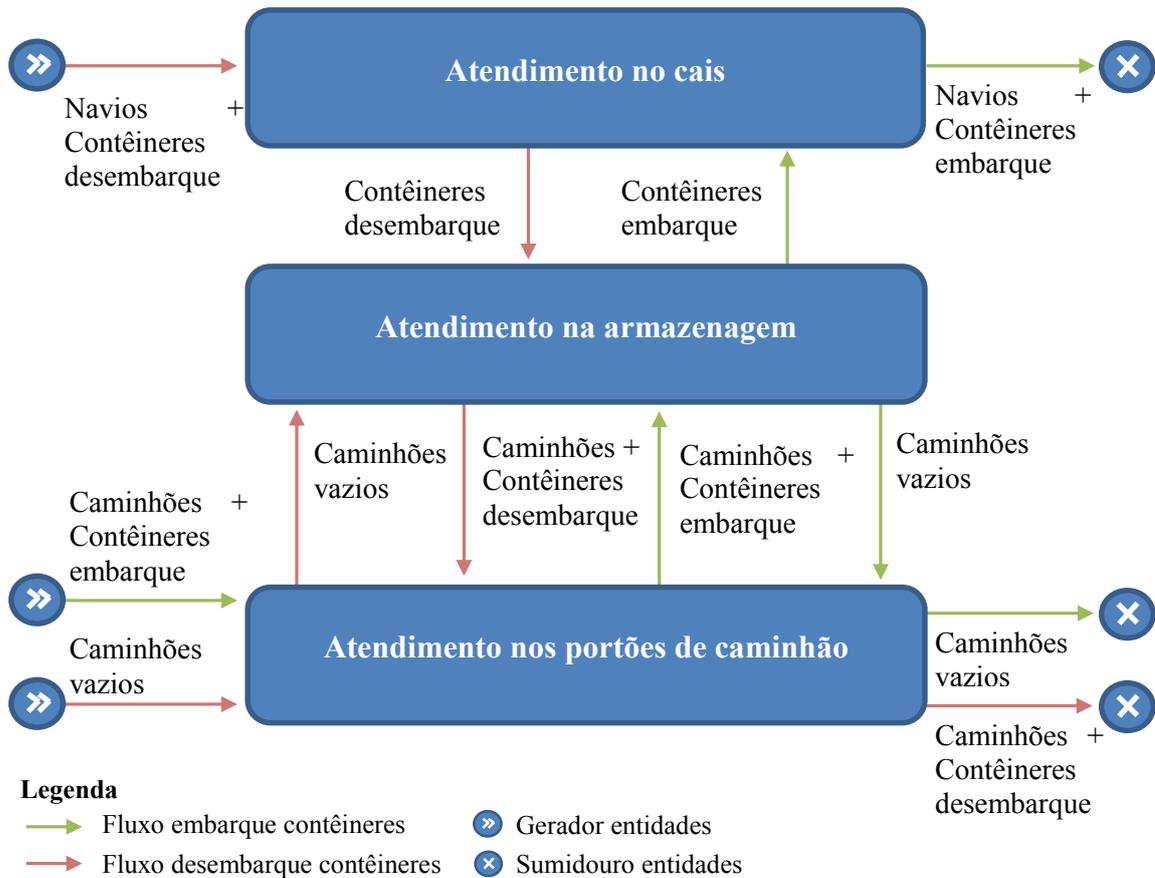
O modelo proposto para caso teste foi inspirado em um terminal de contêineres da região Sul do Brasil. Os dados tradicionalmente com maior impacto na operação portuária, *i.e.* relativos ao cais (UNCTAD, 1985), foram todos extraídos da estatística do terminal, o que torna o modelo apropriado para fins de teste dos procedimentos propostos. Algumas adaptações na configuração operacional foram realizadas, considerando a disponibilidade de dados e que o trabalho não tem como objetivo a validação e verificação do modelo com a realidade. Ainda que não seja visada a representação fiel do terminal de referência, a ordem

de grandeza das variáveis e dos resultados do caso teste são compatíveis com a realidade operacional de um terminal de contêineres.

O escopo do modelo avaliado considera as operações no cais, retroárea e recepção/expedição para outros modos de transporte, conforme identificados por Dragović *et al.* (2017) como principais subsistemas de um sistema portuário. Essa abordagem também é avaliada por Dekker *et al.* (2013), que descreveu as principais etapas de um terminal de contêineres considerando processos dentro desses subsistemas. Ressalte-se que, no nível de detalhe adotado neste trabalho, não é avaliada a influência de tomadas *reefer*, equipamentos retroportuários e recursos humanos na operação da armazenagem, e nos berços, os guindastes de cais e o berço em si são considerados como um único recurso produtivo.

No modelo proposto, os seguintes tipos de entidades foram gerados: navios, caminhões, contêineres e lotes de contêineres. Ainda, três grupos de recursos (*resource pools*) foram considerados: berços, *slots* de armazenagem e portões de caminhões. Foi estabelecido que o número de berços independe do tamanho das embarcações, ou seja, é fixo para dado cenário. O diagrama da Figura 7 mostra de maneira simplificada os fluxos de navios, contêineres e caminhões no terminal.

Figura 7 — Fluxo simplificado das operações do modelo do caso teste



Assim como observado na maioria dos terminais de contêineres brasileiros e também no terminal de referência, foi considerado que a conexão com a hinterlândia se dá exclusivamente pelo modo rodoviário, isto é, por caminhões. Foi considerada uma portaria para caminhões, com todos os portões reversíveis. Para fins de simplificação, foi considerado que os caminhões do fluxo de embarque chegam cheios (com contêiner) e saem vazios do terminal; e os do fluxo de desembarque chegam vazios e saem cheios do terminal. Ainda, cada caminhão, quando cheio, carrega apenas um contêiner.

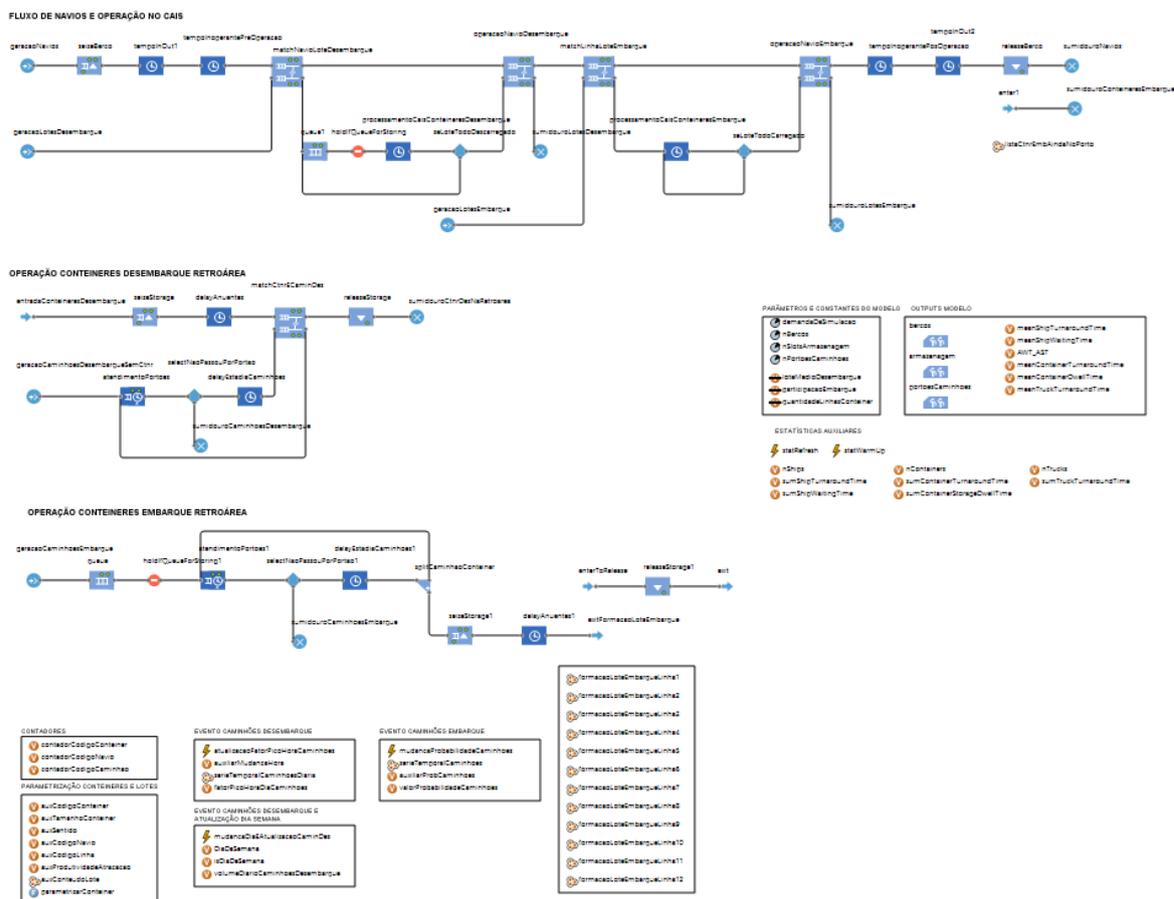
Para fins de simplificação, foi considerado que 12 linhas de longo curso, e somente elas, frequentam o terminal. Não foram consideradas operações de transbordo e cabotagem.

É digno de nota também que o modelo considerou o papel de anuentes na operação da armazenagem do porto, visto que a liberação de carga é sujeita a exigências de diferentes órgãos por questões tributárias, legais, sanitárias, dentre outras. No Brasil, podem ser citados os seguintes anuentes em portos: Polícia Federal, Marinha, Autoridade Portuária, Receita

Federal, Anvisa e Ministério da Agricultura (BRASIL, 2017). No modelo, foi considerado que os anuentes retêm os contêineres por determinado tempo na armazenagem, tanto nas operações de embarque quanto na de desembarque, e que só operam em dias úteis.

A Figura 8 ilustra a interface do modelo desenvolvido no programa Anylogic, apenas para fins de visualização geral. Embora para melhor organização o diagrama do modelo tenha sido dividido visualmente em três fluxos separados (navios, desembarque na retroárea e embarque na retroárea), as operações são integradas, conforme fluxo da Figura 7 e detalhado nas seções a seguir. O fluxo das operações é explicado seguindo a divisão desses três fluxos, visando melhor apresentação das ideias.

Figura 8 — Interface gráfica do modelo desenvolvido para o caso teste



#### 4.3.2.1 Operação dos navios

A geração de navios segue distribuição exponencial, e para cada navio gerado, a geração do código associado à linha segue distribuição uniforme. O lote de desembarque é

gerado simultaneamente ao respectivo navio com número de contêineres estocástico seguindo distribuição de probabilidade, e seus contêineres tem seu tamanho atribuído seguindo a proporção TEU-FEU observada na planilha de referência.

Havendo disponibilidade de berço, o navio segura (bloco *seize* no programa de simulação) uma unidade de recurso de berço, e passa por tempos de *delay* correspondentes à travessia entre fundeadouro e cais e ao tempo inoperante antes de iniciar a operação propriamente dita. Após, o lote de desembarque tem seu tamanho diminuído a uma taxa correspondente à produtividade de cais, e esses contêineres são encaminhados à armazenagem.

Após o tamanho do lote de desembarque virar nulo, a operação de embarque ocorre com dinâmica semelhante. O lote de embarque é gerado já quando o navio chega ao porto, composto pelos contêineres correspondentes à linha do navio e que estão na armazenagem neste momento. Este lote também tem seu tamanho diminuído a uma taxa correspondente à produtividade de cais, e esses contêineres são encaminhados à armazenagem.

Após o embarque, o navio ainda passa por *delays* correspondentes ao tempo inoperante no cais pós-operação e tempo de travessia do canal de acesso/saída, libera uma unidade de recurso de berço e é dirigido a um sumidouro, na última etapa do fluxo dos navios.

#### 4.3.2.2 Operação de contêineres de desembarque na retroárea

Os contêineres que anteriormente foram desembarcados e dirigidos à armazenagem usufruem de uma unidade de recurso, caso sejam TEU, ou duas unidades de recurso, caso sejam FEU. Ressalte-se que, caso em determinado momento da simulação não haja disponibilidade de armazenagem livre, a operação no cais e nos portões de caminhões são paralisadas, com prioridade de atendimento ao cais, até que haja novamente disponibilidade de recurso.

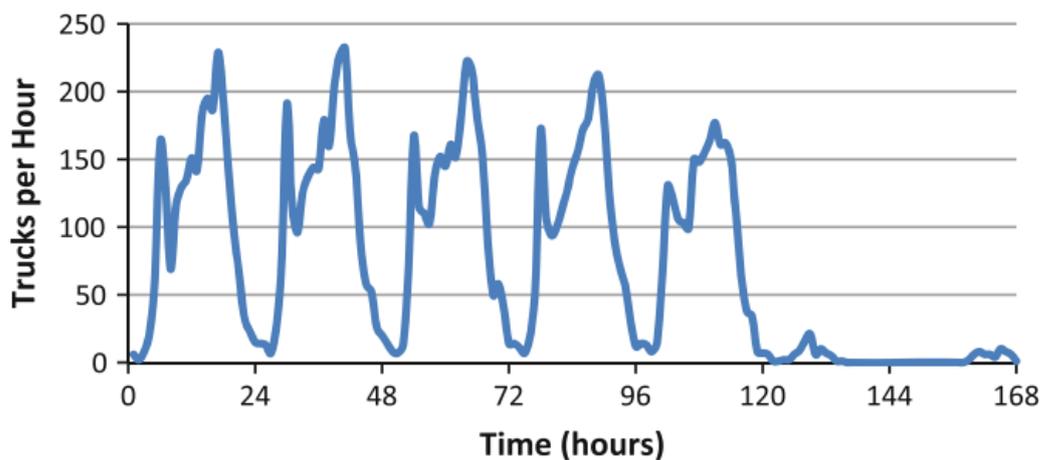
Após o contêiner segurar (bloco *seize* no programa de simulação) o recurso de armazenagem, ele passa por *delay* correspondente à inspeção de carga por anuentes e aguarda a chegada de caminhão no próximo dia útil. A geração de caminhões de desembarque em determinado dia útil considera o tamanho da fila no fim do dia anterior de contêineres de desembarque no aguardo de caminhões, além de distribuição horária da segunda-feira

observada no trabalho de Dekker *et al.* (2013). Em finais de semana, nenhum caminhão é gerado para buscar contêineres desembarcados no terminal. O caminhão gerado é atendido nos portões, permanece determinado tempo no terminal e, após, buscar o contêiner de desembarque, passa novamente pelos portões e é destinado a um sumidouro.

#### 4.3.2.3 Operação de contêineres de embarque na retroárea

Já a chegada de caminhões de embarque ocorre de maneira empurrada e segue distribuição semanal presente no trabalho de Dekker *et al.* (2013), com taxas de chegada de caminhões variando a cada hora, conforme Figura 9.

Figura 9 — Distribuição semanal de chegada de caminhões utilizada como referência



Fonte: Dekker *et al.* (2013)

O caminhão é atendido nos portões caso haja espaço na armazenagem, senão ele permanece esperando até esta condição ser atendida (há prioridade para as operações no cais). Após, o caminhão entra no terminal, permanece determinado tempo, deixa o contêiner e novamente passapelos portões antes de se dirigir a um sumidouro.

O contêiner de embarque deixado pelo caminhão no terminal segura (bloco *seize* no programa de simulação) uma unidade de recurso de armazenagem, caso seja TEU, ou duas unidades de recurso, caso seja FEU. Após, passa por *delay* correspondente à inspeção de carga por anuentes e é direcionado à lista de contêineres correspondente à sua linha de navegação. Quando um navio da respectiva linha chega ao terminal, um lote de embarque é

gerado com todos os contêineres que aguardam a linha. A partir daí, o contêiner segue o fluxo da operação dos navios.

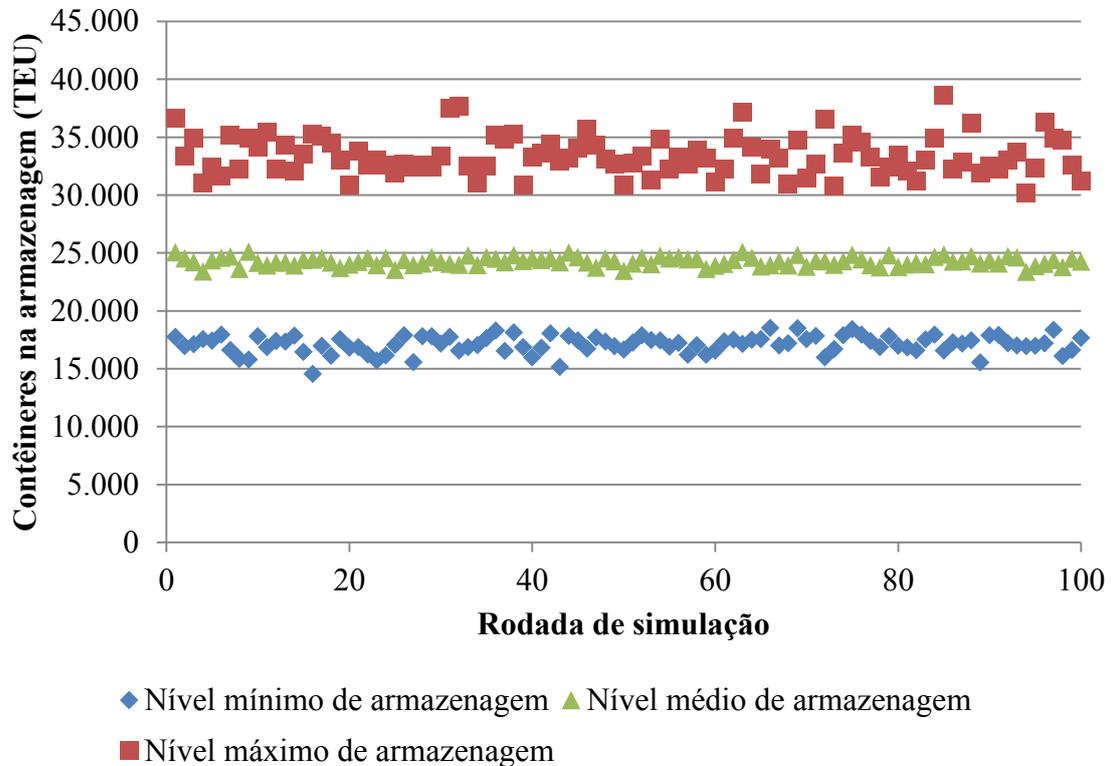
### **4.3.3 Adaptação do método para a análise de expansão da armazenagem portuária**

A lógica por trás do método proposto é verificar a influência da disponibilidade de recursos em indicadores operacionais e custos do sistema. Todavia, foi verificado que a armazenagem não interfere diretamente nesses valores e sim na estabilidade do sistema.

Antes de se discutir e definir o que é a estabilidade do sistema, note-se que o papel da armazenagem portuária é diferente do de outros recursos portuários. Os berços e portões, por exemplo, podem ser consideradas como unidades de processamento modeláveis por teoria de filas, com clientes e serviços bem definidos (no caso do berço, são atendidos navios a uma determinada taxa de produtividade do berço, e no caso dos portões de caminhão, são atendidos caminhões também a uma determinada taxa de atendimento dos portões). Essa lógica não se aplica à armazenagem, que funciona como estoque temporário de carga, visando compatibilizar os diversos fluxos de carga e frota que chegam ao terminal (como os descritos na Figura 7) e principalmente minimizar a interrupção das operações no cais (UNCTAD, 1985; PIANC, 2014; BRASIL, 2018). Triska e Frazzon (2018) exploram em mais detalhes o papel da armazenagem no contexto da capacidade portuária.

A Figura 10 ilustra como o nível de armazenagem requerido pode variar no decorrer de um mesmo período de simulação. Para fins ilustrativos, foram executadas no modelo do caso teste 100 rodadas de simulação com fluxo livre na armazenagem, ou seja, sem que a disponibilidade de *slots* de TEU afetasse as operações do terminal. São mostrados valores mínimos, médios e máximos de nível de armazenagem em cada rodada de simulação. Note-se que no decorrer do ano de simulação o nível de armazenagem flutua entre a faixa de 14.569 a 38.592 TEU, com valores médios em torno de 24.000 TEU. Ainda, visualmente é possível verificar a maior variância dos valores máximos comparados aos valores mínimos e médios.

Figura 10 — Exemplo de variação de níveis de armazenagem durante um período de simulação



Isso posto, a estabilidade de armazenagem é definida aqui como a forma que a disponibilidade de espaço na armazenagem (*slots* de TEU, no caso de contêineres) afeta os resultados do modelo de simulação de um terminal, em especial o quanto sai de carga do sistema (fluxo ou movimentação de saída). Para melhor apresentação das ideias, são definidos três tipos de regime de estabilidade: o regime estável, o regime de baixa instabilidade e o regime de alta instabilidade.

Em regime estável há grande disponibilidade de armazenagem, e em nenhuma simulação, durante todo o tempo simulado, é observada falta de recursos de armazenagem. No caso da Figura 10, qualquer valor acima de 38.592 TEU se encaixa neste regime. Ainda, poucas rodadas de simulação são identificadas como espúrias (*outliers*) pelo critério de desvio interquartil dos seus indicadores operacionais, conforme descrito na Seção 4.

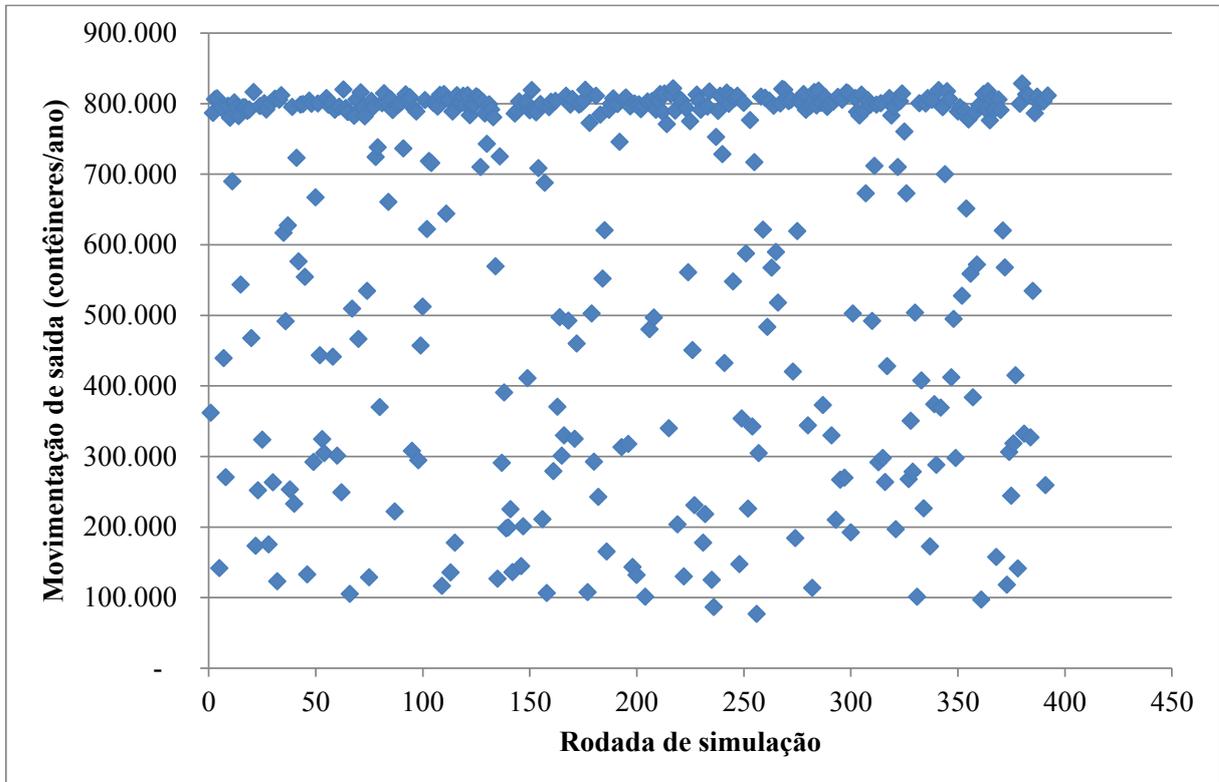
Em regime de baixa instabilidade já há ocorrência de falta de armazenagem em algumas simulações. Isso pode ocorrer por pouco tempo no decorrer do período de simulação. Todavia, todos os valores de queda de fluxo de saída do sistema e anomalias de indicadores operacionais são identificados como *outliers* (também pelo critério de desvio interquartil).

Com isso, os valores médios desses indicadores não são contaminados pelos valores espúrios descartados. Isso pode mascarar uma chance de até 25% das operações serem afetadas por não haver armazenagem livre disponível, considerando que até essa ocorrência o valor do quartil superior (Q3) pode não ser afetado. Ainda, o desempenho computacional do experimento pode ser prejudicado pelo aumento expressivo do tempo necessário para simular essas rodadas espúrias, além de haver chance de parada do programa por conta de memória RAM insuficiente (em função de grande número de entidades dentro do sistema que não conseguem ser conduzidas aos sumidouros).

Em regime de alta instabilidade os valores anômalos não são mais identificados como *outliers* pelo critério do desvio interquartílico. Além dos problemas já descritos para o regime de baixa instabilidade, também há contaminação dos valores médios dos indicadores, o que prejudica a análise do comportamento do modelo. Ainda, o aumento do coeficiente de variação da amostra faz com que o tamanho necessário dela tenha expressivo aumento (conforme Equação 2, na Seção 3.2.3.2), e isso aumenta consideravelmente o tempo para realização do experimento, podendo inviabilizá-lo.

Note-se que, para o planejador portuário, não há interesse no estudo do terminal em regime de alta instabilidade ou até mesmo de baixa instabilidade com chance de indisponibilidade de armazenagem superior a 10%. Isso se deve em decorrência de queda bruta da movimentação de saída, assim como grandes custos financeiros associados ao aumento dos tempos médios de ciclo de navios, contêineres e caminhões no terminal. A Figura 11 ilustra o terminal do caso teste em regime de alta instabilidade, com ocorrência significativa de queda de fluxo de saída (valores dispersos abaixo da concentração em torno de 800.000 contêineres). A partir dessa figura, é verificada a motivação do aumento da disponibilidade de armazenagem estar relacionado à diminuição da probabilidade de ocorrência de instabilidade em vez de melhorias nos valores médios de indicadores operacionais. Essa constatação vai ao encontro da afirmativa inicial desta seção, sobre a armazenagem não interferir diretamente nesses valores e sim na estabilidade do sistema. Além disso, também está em consonância com o que foi comentado sobre o papel da armazenagem portuária ser relacionado principalmente à minimização da interrupção das operações no cais.

Figura 11 — Exemplo de rodadas de simulação com regime de alta instabilidade na armazenagem

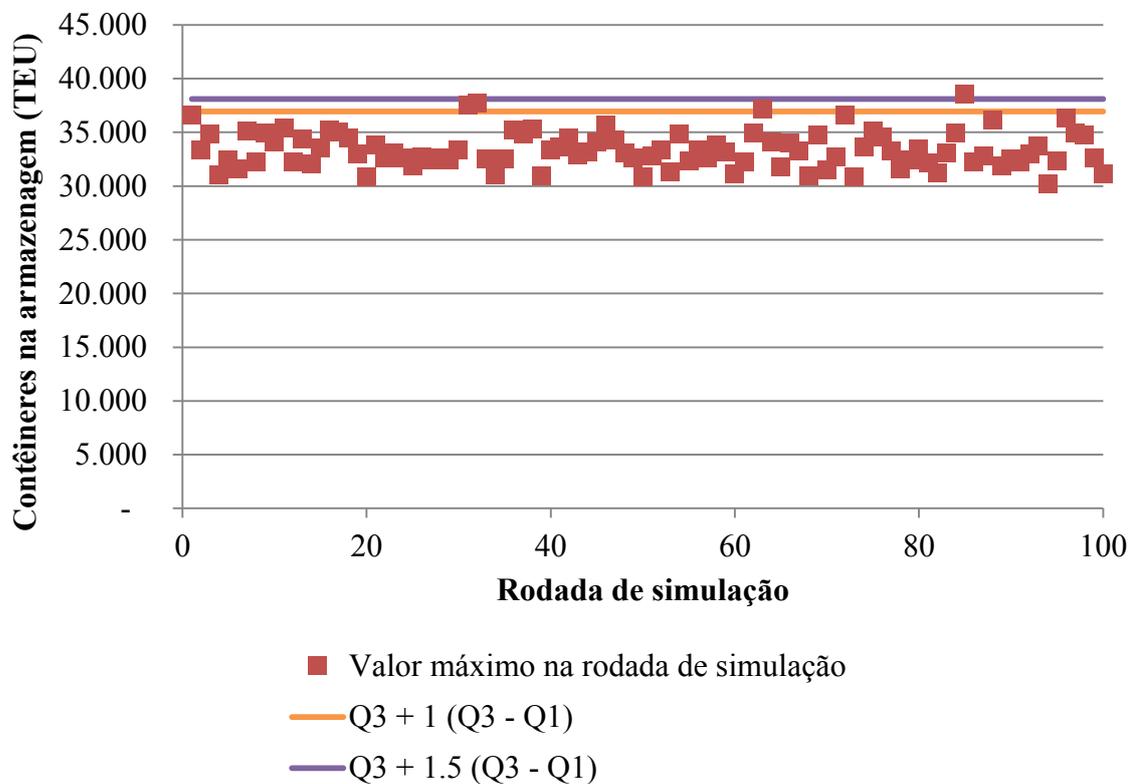


Uma possibilidade para resolver os problemas associados aos regimes de baixa e alta instabilidade seria calcular a proporção de vezes em que a movimentação de saída esteve abaixo de determinado patamar, e determinar um limiar de ocorrência desse comportamento. Por exemplo, buscar através de um procedimento uma movimentação associada a 5% de indisponibilidade de armazenagem, para uma amostra com 1% de margem de erro. No entanto, é observado que o tamanho necessário da amostra aumentaria substancialmente (em cerca de 20 vezes), tornando essa abordagem menos atraente. Além disso, as simulações com *slots* de armazenagem modelados como recursos (utilizando-se blocos *seize* e *release*) se mostraram muito mais custosas computacionalmente, devido à grande quantidade de objetos (dezenas de milhares de *slots* de TEU) que permanecem constantemente na memória do programa. Em termos de ordem de grandeza, foi observado um custo computacional cerca de 15 vezes maior em relação às simulações com fluxo livre na armazenagem, ou seja, com as entidades entrando na armazenagem sem precisarem usufruir de recurso algum.

Isso posto, foi optada a simulação das operações do terminal sem restrição de armazenagem (*i.e.* sem blocos *seize* e *release* condicionando a entrada na armazenagem à disponibilidade de *slot* de TEU) e registrar para cada rodada de simulação o valor máximo de

TEU que permaneceu na armazenagem em um mesmo instante durante todo o período de simulação. Disponíveis esses valores, um valor parametrizado pelo desvio interquartil é adotado como nível necessário de armazenagem. A Figura 12 mostra os valores máximos registrados em 100 rodadas de simulação em um teste preliminar, com dois limiares calculados. Foi adotado neste trabalho o limite com apenas um desvio interquartil acima do quartil superior, o que corresponde ao atendimento pleno de 96% das simulações no teste realizado.

Figura 12 — Valores máximos na rodada de simulação e estabelecimento de limite para obtenção de valor requerido de armazenagem



#### 4.3.4 Dados de entrada do modelo

Os seguintes parâmetros foram adotados para executar os três procedimentos (as siglas correspondem às adotadas nos procedimentos das Seções 4.1 e 4.2):

- (1) Parâmetros gerais

- a. Período de simulação: 1 ano;
- b. Período de *warm up* de simulação: 60 dias (definido por testes preliminares);
- c. Intervalo de confiança: 95%;
- d. Tamanho inicial da amostra ( $ISS$ ): 10 (conforme adotado por Keceli *et al.*, 2013; Olba *et al.*, 2015; Olba *et al.*, 2017; Park e Noh, 1987);
- e. Demanda inicial de simulação ( $SD_0$ ): 250.000 contêineres/ano;
- f. Configuração de recursos no cenário base inicial ( $BS_i$ )
  - i.  $BS_{BERÇOS}$ : 2 berços
  - ii.  $BS_{SLOTS}$ : 30.000 *slots* de TEU;
  - iii.  $BS_{PORTÕES}$ : 6 portões de caminhões.

(2) Perspectiva da oferta

- a. Passo inicial de busca ( $SS$ ): 200.000 contêineres/ano
- b. Erro relativo aceitável da amostra ( $AE$ ): 5%;
- c. Indicador avaliado ( $EC$ ): Tempo de médio de espera de navio (AWT)
- d. Limiar ( $T$ ): 4,8 h de AWT ( $AWT/AST = 0,3$ , conforme recomendado pela UNCTAD, 1985, p. 30. Testes preliminares mostraram o valor de  $AST=16$  h para um estado não congestionado).

(3) Perspectiva de demanda — abordagem de engenharia

- a. Passo de busca ( $SS$ ): 50.000 contêineres/ano
- b. Passo de recursos ( $RS_i$ ):
  - i.  $RS_{BERÇOS}$ : 1 berço;
  - ii.  $RS_{PORTÕES}$ : 1 portão de caminhão.
- c. Erro relativo aceitável da amostra ( $AE$ ): 5%;
- d. Limiares ( $T_i$ ):
  - i.  $T_{BERÇOS}$ : 4,8 h de tempo médio de espera de navio
  - ii.  $T_{PORTÕES}$ : 1,5 h de tempo médio de ciclo de caminhão

(4) Perspectiva de demanda — abordagem econômica

- a. Passo de busca ( $SS$ ): 50.000 contêineres/ano
- b. Passo de recursos ( $RS_i$ ):
  - i.  $RS_{BERÇOS}$ : 1 berço;
  - ii.  $RS_{PORTÕES}$ : 1 portão de caminhão.
- c. Erro relativo aceitável da amostra ( $AE$ ): 0,2%;

- d. Custos de tempo (para calcular *CHC*):
  - i. Navio: 2.279 U\$/h/navio (CHANG *et al.*, 2012)
  - ii. Contêiner: 0,518 U\$/h/contêiner (CHANG *et al.*, 2012)
  - iii. Caminhão: 32,15 U\$/hora/caminhão (GUAN; LIU, 2009)
- e. Custos de expansão (para calcular *CHC*):
  - i. Berço: 8.000.000 U\$/ano/berço
  - ii. Portão de caminhão: 80.000 U\$/ano/portão

Os custos de expansão foram estimados através de custos anuais equivalentes (KAUFFMANN *et al.*, 2012), com os seguintes dados: taxa de juros anual de 12%, período de 50 anos, custos anuais de operação e manutenção de 4% em relação aos custos de construção, e custos de construção de U\$ 50.000.000 para berço e U\$ 500.000 para portão de caminhão.

#### 4.3.5 Dados de saída do modelo

Uma vez executadas rodadas de simulação com mesmos parâmetros de entrada, diferentes informações podem ser obtidas e analisadas, seja para fins de inspeção do modelo durante sua execução ou para estimação de parâmetros de saída por meio de modelagem estatística.

A inspeção do modelo desenvolvido no programa AnyLogic permite verificar sua compatibilidade com a operação de um terminal real e aferir possíveis erros cometidos no processo de modelagem e programação. Para tal, foi utilizada a interface gráfica do programa, que permite verificar durante a simulação o comportamento do sistema nos diversos blocos e variáveis criadas, conforme mostrado na Figura 8 para fins ilustrativos.

Todavia, para a operacionalização dos procedimentos propostos e modelagem estatística, as rodadas de simulação são executadas sem acompanhar na interface gráfica do sistema o seu comportamento. Em vez disso, essas rodadas foram executadas no menor tempo possível pelo programa (em modo *runFast*) e seguidamente uma da outra. Por isso, somente os dados considerados úteis para os procedimentos e alguns outros para inspeção de resultados foram coletados. Isso posto, foram coletadas informações em três tipos de planilhas:

- Planilha do tipo A: dados dos parâmetros de cada rodada de simulação executada individualmente;
- Planilha do tipo B: valores médios e outros parâmetros de conjuntos de rodada de simulação com mesmos dados de entrada. Ressalte-se que no decorrer de um dos três procedimentos, são considerados como dados de entrada a demanda de simulação (*SD*) e disponibilidade de recursos ( $BS_i$  e  $ES_i$ ). Os demais dados de entrada permanecem constantes ou são variáveis auxiliares.
- Planilha do tipo C: dados de saída que formam o plano de expansão (planilha somente é gerada nos procedimentos de perspectiva de demanda), além de alguns parâmetros para inspeção de resultados.

Os dados coletados são sintetizados no Quadro 9. Os dados são escritos no console do programa e copiados via área de transferência, ou são exportados para arquivo *txt*. Em casos de simulações com grande número de rodadas, como foi o caso do procedimento de demanda com abordagem econômica, a exportação dos dados em *txt* é necessária devido ao limite de caracteres do console do programa.

Quadro 9 — Dados de saída de cada procedimento realizado

Procedimento	Planilha tipo A	Planilha tipo B	Planilha tipo C
Oferta	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Demanda de simulação;</li> <li>• Índice da rodada de simulação;</li> <li>• Movimentação de saída;</li> <li>• AWT de navios;</li> <li>• IO médio de berço;</li> <li>• IO médio de portões de caminhão.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Demanda de simulação;</li> <li>• Tamanho da amostra;</li> <li>• Média das movimentações de saída;</li> <li>• Média dos AWT de navios;</li> <li>• Critério de parada;</li> <li>• Erro relativo dos AWT de navios;</li> <li>• Erro relativo das movimentações de saída;</li> <li>• Taxa de descarte de amostra;</li> <li>• Índices das rodadas de simulação descartadas.</li> </ul>	Não se aplica
Demanda — abordagem de engenharia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Demanda de simulação;</li> <li>• Número de berços;</li> <li>• Número de portões de caminhão;</li> <li>• Índice da rodada de simulação;</li> <li>• Movimentação de saída;</li> <li>• AWT de navios;</li> <li>• IO médio de berço;</li> <li>• IO médio de portões de caminhão</li> <li>• Valor máximo de contêineres na armazenagem;</li> <li>• AWT de navios;</li> <li>• ATT de caminhões.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Demanda de simulação;</li> <li>• Número de berços;</li> <li>• Número de portões de caminhão;</li> <li>• Tamanho da amostra</li> <li>• Média das movimentações de saída;</li> <li>• Média dos AWT de navios</li> <li>• Média dos ATT de caminhões;</li> <li>• Armazenagem requerida;</li> <li>• Erro relativo dos custos totais;</li> <li>• Erro relativo das movimentações de saída;</li> <li>• Taxa de descarte de amostra;</li> <li>• Índices das rodadas de simulação descartadas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Demanda de simulação;</li> <li>• Número de berços;</li> <li>• Número de portões de caminhão;</li> <li>• Número de <i>slots</i> de armazenagem;</li> <li>• Média das movimentações de saída;</li> <li>• Média dos AWT de navios</li> <li>• Média dos ATT de caminhão.</li> </ul>
Demanda — abordagem econômica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Demanda de simulação;</li> <li>• Número de berços;</li> <li>• Número de portões de caminhão;</li> <li>• Índice da rodada de simulação;</li> <li>• Movimentação de saída;</li> <li>• AWT de navios;</li> <li>• IO médio de berço;</li> <li>• IO médio de portões de caminhão</li> <li>• Valor máximo de contêineres na armazenagem;</li> <li>• Custos totais;</li> <li>• Custos de tempo de navios;</li> <li>• Custos de tempo de contêineres;</li> <li>• Custos de tempo de caminhões;</li> <li>• Tempo médio de espera de navios;</li> <li>• AWT/AST de navios</li> <li>• Tempo médio de ciclo de caminhões.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Demanda de simulação;</li> <li>• Número de berços;</li> <li>• Número de portões de caminhão;</li> <li>• Tamanho da amostra</li> <li>• Média das movimentações de saída;</li> <li>• Média dos custos totais;</li> <li>• Armazenagem requerida;</li> <li>• Erro relativo dos custos totais;</li> <li>• Erro relativo das movimentações de saída;</li> <li>• Taxa de descarte de amostra;</li> <li>• Índices das rodadas de simulação descartadas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Demanda de simulação;</li> <li>• Número de berços;</li> <li>• Número de portões de caminhão;</li> <li>• Número de <i>slots</i> de armazenagem;</li> <li>• Média das movimentações de saída;</li> <li>• Média dos custos por contêiner movimentado.</li> </ul>

Cabem alguns esclarecimentos acerca dos dados descritos no Quadro 9, conforme definições adotadas neste trabalho para fins de organização de dados:

- Erro relativo de um parâmetro: dado o tamanho da amostra do parâmetro e nível de confiança, a razão entre o erro máximo e a média dos valores da amostra;
- Índice da rodada de simulação: variável auxiliar que atribui um índice (1, 2, 3...) a rodadas de simulação com mesmos parâmetros de entrada;
- Taxa de descarte de amostra: tamanho da amostra descartada dividido pelo tamanho da amostra total de um conjunto de rodadas de simulação. Descarte é feito conforme descrito na Seção 4;
- Armazenagem requerida: conforme explicado na Seção 4.3.3;

Além de todos esses dados de saída, foram coletados os instantes de início e término de cada um dos procedimentos, de forma que o tempo computacional dos experimentos possa ser registrado.

## 5 APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO EM CASO TESTE

Nesta seção, são descritas as aplicações dos procedimentos descritos nas Seções 4.1 e 4.2, considerando as especificidades metodológicas e caso teste descritos na Seção 4.3.

### 5.1 PERSPECTIVA DA OFERTA

No procedimento da perspectiva da oferta, foram avaliados 6 valores de demanda em 133 rodadas de simulação e 21,3 minutos no total. A Figura 13 confirma o comportamento descrito pela UNCTAD (1985) em relação ao crescimento exponencial do tempo de espera com o aumento da movimentação de carga. O valor obtido para a capacidade do terminal analisado é de 517.070 contêineres/ano ou 858.336 TEU/ano. A Tabela 3 mostra dados do tamanho da amostra, descarte da amostra e erros relativos.

Figura 13 — Gráfico de perspectiva da oferta do caso teste

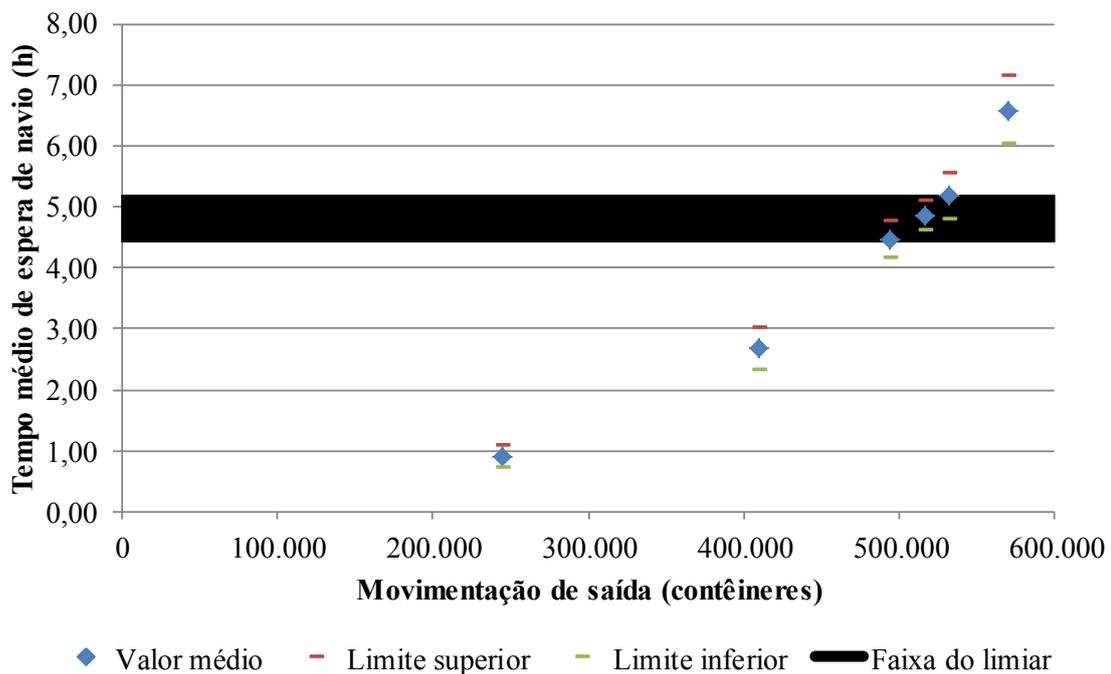


Tabela 3 — Valores de demanda avaliados na perspectiva da oferta e valores relacionados (na ordem da busca realizada)

Demanda de simulação (unidades de contêiner)	Tamanho de amostra	Tamanho de amostra descartada	Erro relativo AWT (%)	Erro relativo movimentação de saída (%)	Faixa de AWT(h)	AWT esperado (h)	Movimentação de saída esperada (unidades de contêiner)
250.000	10	0	20,19	1,76	0,73 – 1,09	0,91	245.201
450.000	10	0	13,14	1,18	2,32 – 3,03	2,67	410.024
650.000	10	1	8,61	1,03	6,02 – 7,16	6,59	570.240
550.000	34	1	6,91	0,62	4,15 – 4,77	4,46	494.942
600.000	23	0	7,07	0,68	4,81 – 5,54	5,17	532.244
575.000	46	0	4,91	0,52	<b>4,62 – 5,10</b>	4,86	<b>517.070</b>

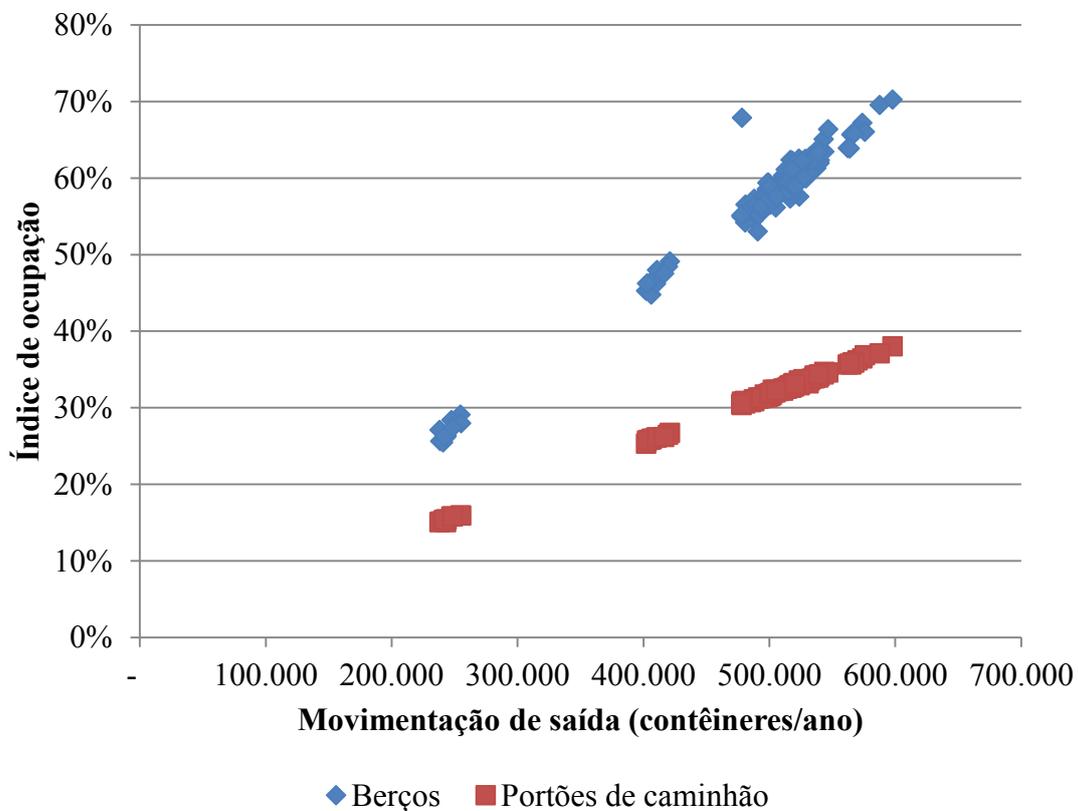
Ao serem analisadas a Figura 13 e a Tabela 3, é constatado que a lógica do procedimento atuou da seguinte forma.

- Com demanda inicial de 250.000 contêineres/ano, encontrou-se valor esperado de 0,91 h para o AWT de navio. Não foram necessárias mais de 10 rodadas de simulação (amostra inicial) para verificar que o valor está abaixo do limiar de 4,8 h, dado o nível de confiança de 95% adotado.
- Como o indicador é diretamente proporcional à demanda, o passo de busca da simulação é positivo, ou seja, foi buscado novo valor à direita no eixo  $x$  da função da Figura 13. O passo inicial da demanda é de 200.000 contêineres/ano, por isso a nova demanda a ser simulada foi de  $250.000 + 200.000 = 450.000$  contêineres/ano. Com valor de 2,67 h do AWT de navio, foi dado mais um passo à direita do eixo  $x$ , para que a demanda de 650.000 contêineres/ano seja simulada.
- O valor encontrado para a demanda de 650.000 contêineres/ano foi de 6,59 h para o AWT de navio, ou seja, acima do limiar. Com isso, é necessário fazer busca à esquerda no eixo  $x$ , e agora com passo de busca igual a 100.000 contêineres/ano (metade do anterior).
- A demanda de 550.000 contêineres/ano foi associada ao AWT de navio igual a 4,46 h, ou seja, abaixo do limiar. Com isso, novo valor foi buscado à direita do eixo  $x$ , agora com passo de busca igual a 50.000 contêineres/ano;
- Agora a demanda de 600.000 contêineres/ano foi relacionada ao AWT de navio igual a 5,17 h, que é acima do limiar. Com isso, novo valor foi buscado à esquerda do eixo  $x$ , com passo de busca igual a 25.000 contêineres/ano;

- O valor de 575.000 contêineres retornou valor de AWT de navio igual a 4,86 h, suficientemente próximo do limiar igual a 4,8 h. O erro relativo desse parâmetro, após 46 rodadas de simulação, é inferior ao erro aceitável.
- A movimentação de saída (ou seja, número de contêineres que passaram pelo modelo, considerando estatísticas coletadas nos sumidouros) associada ao valor de demanda final é de 517.070 contêineres/ano. Este é o valor de capacidade de movimentação de carga do terminal.

A Figura 14 ilustra índices de ocupação de cais e dos portões de caminhão, que foram coletados para fins de inspeção de modelo. É possível observar comportamento linear das duas funções mostradas, ou seja, as variáveis são diretamente proporcionais à movimentação de saída do modelo.

Figura 14 — Gráfico de relação entre índices de ocupação de recursos e movimentação de saída no procedimento da perspectiva de oferta



## 5.2 PERSPECTIVA DA DEMANDA — ABORDAGEM DE ENGENHARIA

Para obter o plano de expansão do terminal guiado por indicadores operacionais, foram realizadas 346 rodadas de simulação em 79,0 minutos. A Figura 15 mostra o plano de ações elaborado por meio do procedimento e a Figura 16 mostra os valores dos indicadores operacionais com demanda crescente e expansões consideradas no plano de expansão. É observado na Figura 16 o comportamento exponencial do tempo médio de espera de navio e quedas abruptas ocasionais desses valores após construção de berço.

Figura 15 — Plano de ações gerado pela abordagem de engenharia da perspectiva da demanda

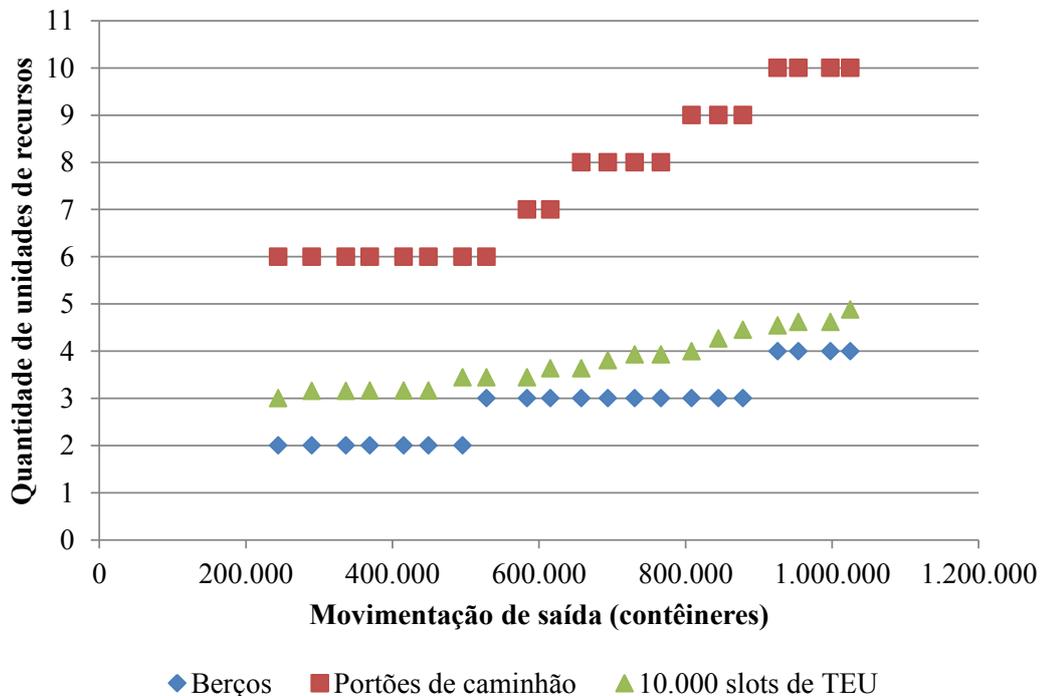
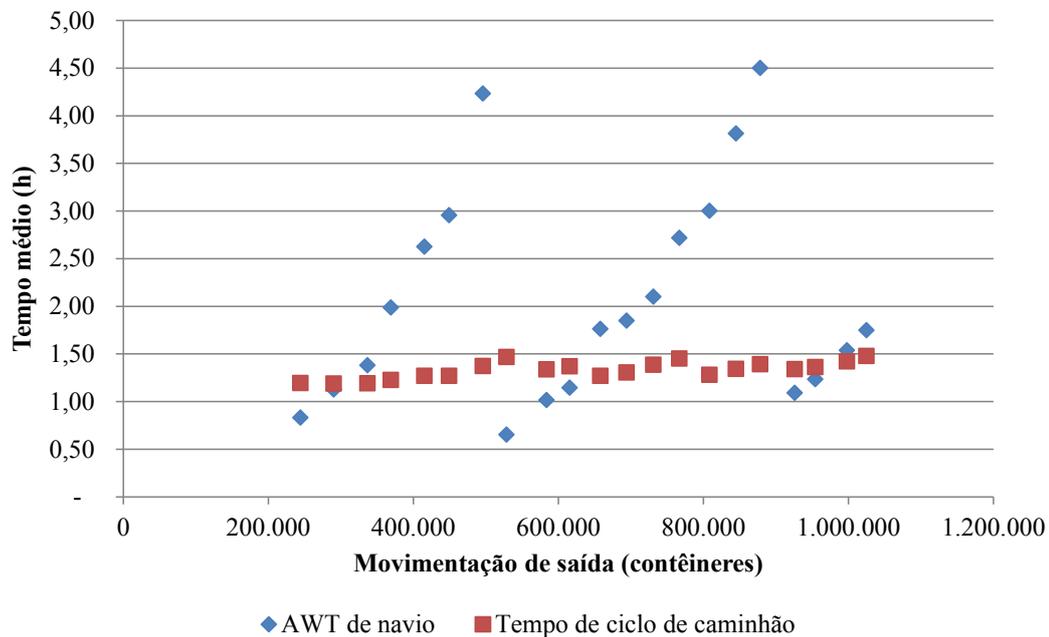


Figura 16 — Indicadores operacionais da abordagem de engenharia da perspectiva da demanda



A Tabela 4 ilustra como a lógica do procedimento atuou no caso teste. Os principais parâmetros para se entender a lógica são: demanda inicial de 250.000 contêineres/ano, passo de busca igual a 50.000 contêineres/ano, gatilho de 4,8 h de AWT de navio para construção de novo berço, gatilho de 1,5 h de ATT de caminhão para construção de novo portão de caminhão, e gatilho de 1.000.000 contêineres/ano de movimentação de saída para término do procedimento.

Tabela 4 — Ilustração da lógica de busca e expansão de recursos no procedimento da perspectiva de demanda com abordagem de engenharia

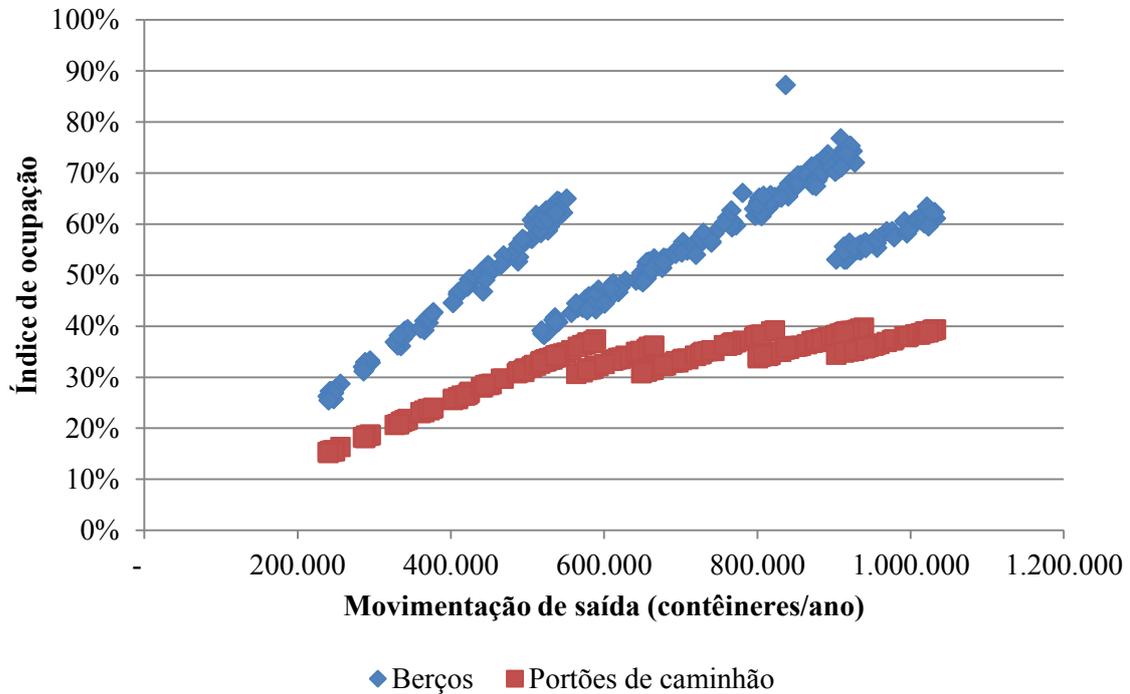
Demanda de simulação (contêineres/ano)	Movimentação de saída (contêineres/ano)	Tamanho da amostra	Média de AWT de navio (h)	Construir berço?	Média de ATT de caminhão (h)	Construir portão?
250.000	244.142	10	0,83	Não	1,19	Não
300.000	290.011	10	1,13	Não	1,19	Não
350.000	336.550	10	1,38	Não	1,19	Não
400.000	368.992	10	1,99	Não	1,23	Não
450.000	415.335	10	2,63	Não	1,27	Não
500.000	449.258	10	2,96	Não	1,27	Não
550.000	495.662	14	4,23	Não	1,37	Não
600.000	531.234	39	5,46	Sim	1,43	Não

Tabela 4 — Continuação

<b>Demanda de simulação (contêineres/ano)</b>	<b>Movimentação de saída (contêineres/ano)</b>	<b>Tamanho da amostra</b>	<b>Média de AWT de navio (h)</b>	<b>Construir berço?</b>	<b>Média de ATT de caminhão (h)</b>	<b>Construir portão?</b>
600.000	531.234	39	5,46	Sim	1,43	Não
600.000	528.266	10	0,65	Não	1,47	Não
650.000	579.958	10	1,08	Não	1,61	Sim
700.000	615.640	10	1,15	Não	1,37	Não
750.000	659.404	10	1,61	Não	1,53	Sim
750.000	657.899	10	1,76	Não	1,27	Não
800.000	693.867	10	1,85	Não	1,30	Não
850.000	730.852	10	2,10	Não	1,39	Não
900.000	766.693	10	2,72	Não	1,45	Não
950.000	807.218	10	3,17	Não	1,54	Sim
950.000	808.222	10	3,00	Não	1,28	Não
1.000.000	844.901	10	3,81	Não	1,34	Não
1.050.000	878.420	32	4,50	Não	1,39	Não
1.100.000	912.767	31	5,48	Sim	1,47	Não
1.100.000	926.419	10	1,17	Não	1,54	Sim
1.100.000	925.849	10	1,09	Não	1,34	Não
1.150.000	954.157	10	1,23	Não	1,36	Não
1.200.000	997.879	10	1,54	Não	1,42	Não
1.250.000	1.024.940	10	1,75	Não	1,48	Não

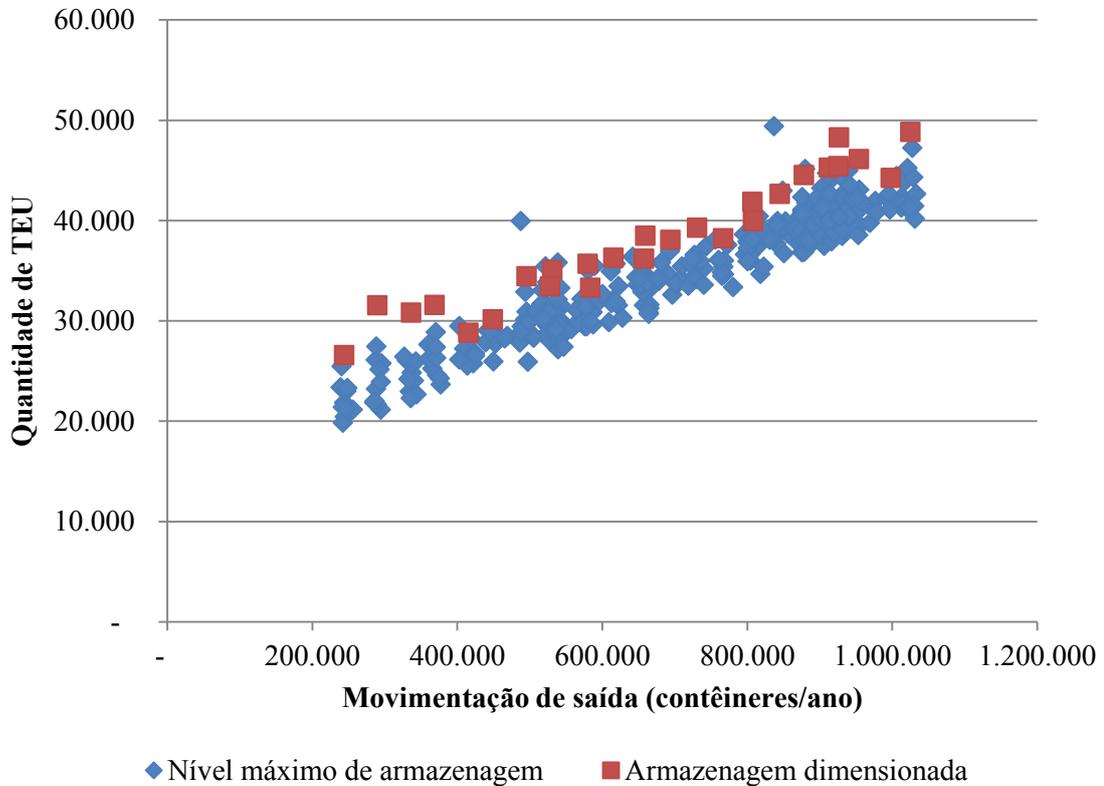
A Figura 17 ilustra índices de ocupação de cais e dos portões de caminhão, que foram coletados para fins de inspeção de modelo. Exceto quando ocorre expansão de recursos, é possível observar comportamento linear das duas funções mostradas, ou seja, as variáveis são diretamente proporcionais à movimentação de saída do modelo. Outra característica que se pode inferir é a respeito dos índices de ocupação admissíveis. Para um mesmo limiar de espera (4,8 h), o índice de ocupação associado é de aproximadamente 65% quando a movimentação de saída é da ordem de 550.000 contêineres/ano, e de aproximadamente 75% para a movimentação de 920.000 contêineres/ano. Essa característica do índice de ocupação admissível aumentar com o aumento do número de berços é suportada pela literatura (UNCTAD, 1985; BRASIL, 2018). No caso dos portões de caminhão, o comportamento do índice de ocupação é semelhante, porém o aumento do índice de ocupação admissível é menos acentuado do que o dos berços.

Figura 17 — Gráfico de relação entre índices de ocupação de recursos e movimentação de saída no procedimento da perspectiva de demanda com abordagem de engenharia



Sobre o dimensionamento realizado para a armazenagem, a Figura 18 compara os níveis máximos de armazenagem requeridos nas rodadas de simulação com o dimensionamento realizado conforme indicado na Seção 4.3.3. Note-se que a grande maioria dos cenários simulados é atendida pelos valores de armazenagem dimensionados. É verificado também que o dimensionamento efetuado pode variar para amostras diferentes, ainda que sejam de uma mesma demanda de simulação. Isso ocorre devido ao procedimento ter requerido baixo tamanho de amostra na maioria das demandas simuladas (conforme Tabela 4), e isso afetar a sensibilidade dos valores de quartis superior e inferior. Apesar dessas questões, considera-se que, dada a precisão do modelo e possíveis variações nos parâmetros de entrada, o dimensionamento efetuado foi adequado.

Figura 18 — Dimensionamento da armazenagem na perspectiva da demanda com abordagem de engenharia



### 5.3 PERSPECTIVA DA DEMANDA — ABORDAGEM ECONÔMICA

Esse procedimento levou 16.554 rodadas de simulação que foram executadas em 42,52 horas. Os custos computacionais foram maiores em comparação a outros procedimentos devido às diferentes configurações de recursos simuladas com uma mesma demanda e devido ao maior tamanho da amostra como resultado da sensibilidade dos valores de custo.

A Figura 19 mostra o plano de ações elaborado através do procedimento e a Figura 20 mostra o custo por contêiner movimentado com demanda crescente e expansões estipuladas.

Figura 19 — Plano de ações gerado pela abordagem econômica da perspectiva da demanda

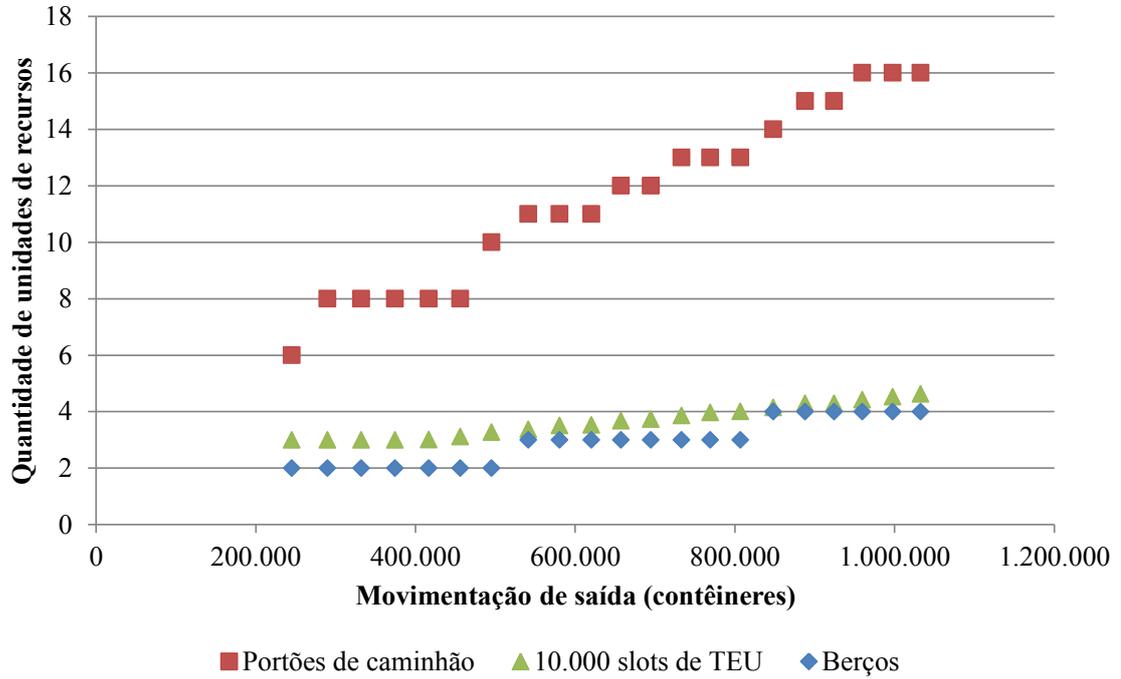
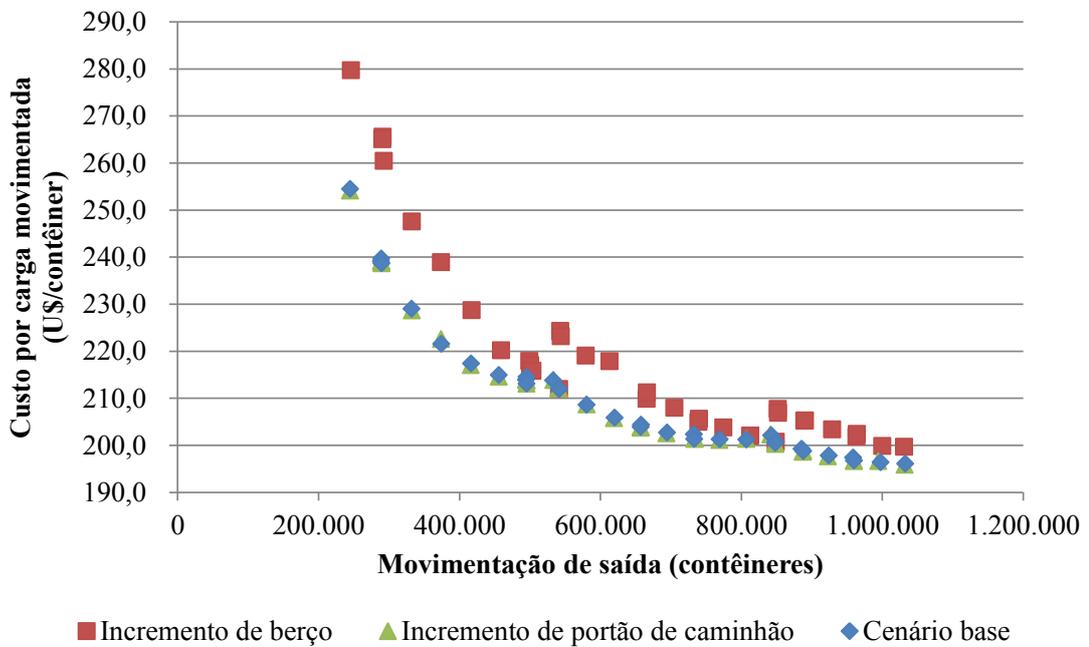


Figura 20 — Custo por carga movimentada na abordagem econômica da perspectiva da demanda



A lógica do procedimento no caso teste é ilustrada na Tabela 5. O passo de busca foi de 50.000 contêineres/ano, e o gatilho para determinado incremento ser incorporado ao cenário base foi se o seu custo é menor do que o do cenário base vezes 0,998, ou seja, abaixo da margem de erro de 0,2%. Ressalte-se que um cenário base só muda após a avaliação de todos os incrementos possíveis, ou seja, quando o cenário de expansão de berço é vantajoso, ele só é incorporado ao cenário base após também ter sido avaliada a expansão do número de portões.

Tabela 5 — Ilustração da lógica de busca e expansão de recursos no procedimento da perspectiva de demanda com abordagem econômica

Demanda de simulação (un/ano)	Quantidade de recursos		Tamanho da amostra	Movimentação de saída (un/ano)	Custo por contêiner (US/un)	Cenário avaliado	Virou cenário base?
	Berços	Portões de caminhão					
250.000	2	6	925	244.998	254,47	Base	-
250.000	3	6	10	246.051	279,74	Base +1 berço	-
250.000	2	7	930	244.691	254,13	Base +1 portão	-
300.000	2	6	683	289.155	239,68	Base	-
300.000	3	6	10	292.526	260,44	Base +1 berço	-
300.000	2	7	639	288.817	239,09	Base +1 portão	Sim
300.000	3	7	10	290.902	265,59	Base +1 berço	-
300.000	2	8	686	289.605	238,67	Base +1 portão	Sim
300.000	3	8	10	290.602	265,06	Base +1 berço	-
300.000	2	9	615	289.559	239,07	Base +1 portão	-
350.000	2	8	506	331.878	229,00	Base	-
350.000	3	8	10	332.355	247,59	Base +1 berço	-
350.000	2	9	519	332.359	228,65	Base +1 portão	-
400.000	2	8	459	374.293	221,56	Base	-
400.000	3	8	10	373.949	238,90	Base +1 berço	-
400.000	2	9	88	373.947	222,56	Base +1 portão	-
450.000	2	8	397	416.519	217,40	Base	-
450.000	3	8	10	417.140	228,71	Base +1 berço	-
450.000	2	9	358	416.076	217,05	Base +1 portão	-
500.000	2	8	341	456.013	214,93	Base	-
500.000	3	8	10	459.204	220,19	Base +1 berço	-
500.000	2	9	328	455.889	214,60	Base +1 portão	-
550.000	2	8	404	495.108	214,53	Base	-
550.000	3	8	10	499.452	217,91	Base +1 berço	-
550.000	2	9	376	494.521	213,95	Base +1 portão	Sim
550.000	3	9	10	500.596	217,05	Base +1 berço	-
550.000	2	10	345	495.167	213,07	Base +1 portão	Sim
550.000	3	10	14	503.600	215,86	Base +1 berço	-
550.000	2	11	300	495.687	213,73	Base +1 portão	-
600.000	2	10	411	533.221	213,78	Base	-
600.000	3	10	253	541.527	211,96	Base +1 berço	Sim
600.000	2	11	422	533.504	213,86	Base +1 portão	-
600.000	4	10	212	543.186	224,33	Base +1 berço	-
600.000	3	11	274	541.417	212,03	Base +1 portão	Sim
600.000	4	11	10	544.011	223,17	Base +1 berço	-
600.000	3	12	271	540.490	212,11	Base +1 portão	-

Tabela 5 — Continuação

Demanda de simulação (un/ano)	Quantidade de recursos		Tamanho da amostra	Movimentação de saída (un/ano)	Custo por contêiner (US/un)	Cenário avaliado	Virou cenário base?
	Berços	Portões de caminhão					
650.000	3	11	240	580.556	208,62	Base	-
650.000	4	11	10	579.320	219,07	Base +1 berço	-
650.000	3	12	230	580.314	208,70	Base +1 portão	-
700.000	3	11	200	620.366	205,87	Base	-
700.000	4	11	10	613.131	217,86	Base +1 berço	-
700.000	3	12	190	619.623	205,75	Base +1 portão	-
750.000	3	11	203	657.621	204,37	Base	-
750.000	4	11	10	665.513	209,88	Base +1 berço	-
750.000	3	12	177	657.303	203,93	Base +1 portão	Sim
750.000	4	12	10	666.035	211,24	Base +1 berço	-
750.000	3	13	177	657.248	203,76	Base +1 portão	-
800.000	3	12	182	694.627	202,73	Base	-
800.000	4	12	10	704.852	207,99	Base +1 berço	-
800.000	3	13	152	693.680	202,52	Base +1 portão	-
850.000	3	12	158	732.851	202,36	Base	-
850.000	4	12	10	739.254	204,98	Base +1 berço	-
850.000	3	13	186	733.132	201,32	Base +1 portão	Sim
850.000	4	13	10	740.025	205,65	Base +1 berço	-
850.000	3	14	187	734.275	201,39	Base +1 portão	-
900.000	3	13	174	769.278	201,29	Base	-
900.000	4	13	10	774.699	203,77	Base +1 berço	-
900.000	3	14	201	769.135	201,12	Base +1 portão	-
950.000	3	13	234	806.941	201,22	Base	-
950.000	4	13	18	812.726	202,03	Base +1 berço	-
950.000	3	14	176	806.983	201,35	Base +1 portão	-
1.000.000	3	13	251	842.335	202,11	Base	-
1.000.000	4	13	118	849.045	200,77	Base +1 berço	Sim
1.000.000	3	14	295	841.479	202,30	Base +1 portão	-
1.000.000	5	13	83	851.551	207,75	Base +1 berço	-
1.000.000	4	14	128	848.117	200,51	Base +1 portão	Sim
1.000.000	5	14	10	852.040	206,88	Base +1 berço	-
1.000.000	4	15	86	848.559	200,25	Base +1 portão	-
1.050.000	4	14	116	885.645	199,24	Base	-
1.050.000	5	14	10	889.331	205,20	Base +1 berço	-
1.050.000	4	15	108	887.807	198,77	Base +1 portão	Sim
1.050.000	5	15	10	890.146	205,26	Base +1 berço	-
1.050.000	4	16	125	887.178	198,60	Base +1 portão	-
1.100.000	4	15	111	924.223	197,85	Base	-
1.100.000	5	15	10	929.071	203,38	Base +1 berço	-
1.100.000	4	16	123	923.061	197,62	Base +1 portão	-
1.150.000	4	15	119	958.461	197,40	Base	-
1.150.000	5	15	10	963.571	201,80	Base +1 berço	-
1.150.000	4	16	124	959.687	196,73	Base +1 portão	Sim
1.150.000	5	16	10	963.877	202,40	Base +1 berço	-
1.150.000	4	17	110	959.920	196,62	Base +1 portão	-
1.200.000	4	16	141	997.712	196,40	Base	-
1.200.000	5	16	10	1.000.073	199,86	Base +1 berço	-
1.200.000	4	17	127	994.467	196,63	Base +1 portão	-

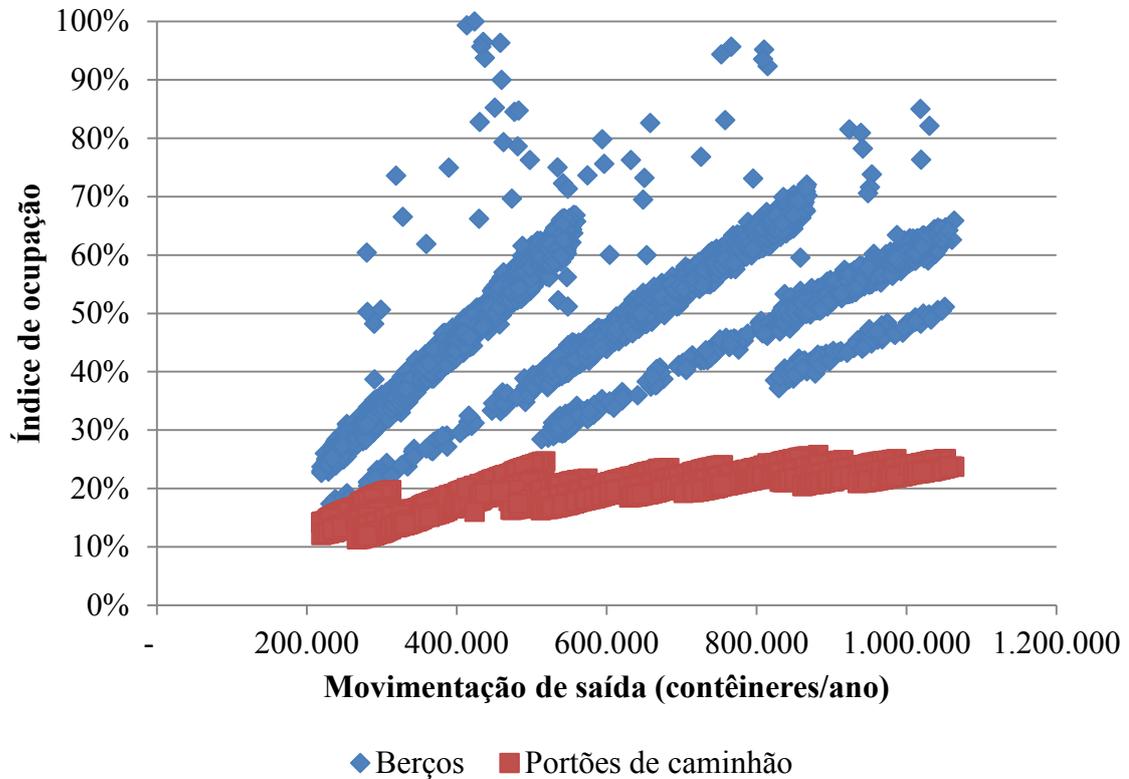
Tabela 5 — Continuação

Demanda de simulação (un/ano)	Quantidade de recursos		Tamanho da amostra	Movimentação de saída (un/ano)	Custo por contêiner (US/un)	Cenário avaliado	Virou cenário base?
	Berços	Portões de caminhão					
1.250.000	4	16	134	1.032.677	196,12	Base	-
1.250.000	5	16	10	1.030.964	199,65	Base +1 berço	-
1.250.000	4	17	144	1.031.783	195,83	Base +1 portão	-

É possível verificar na Tabela 5 que o cenário base geralmente requereu maior tamanho de amostra, e que o cenário com incremento de portão também requer grande tamanho de amostra devido ao custo de construção ser baixo em comparação com os custos relacionados a tempo. No caso dos cenários de incremento de berço, o tamanho da amostra é pequeno quando os custos são muito superiores ao do cenário base, e vai aumentando à medida que eles se aproximam do cenário base. Outra característica que se nota em relação aos tamanhos de amostra é sua redução à medida que a demanda de simulação aumenta, devido à menor variância dos custos de tempo e menor impacto dos custos de expansão nos custos totais.

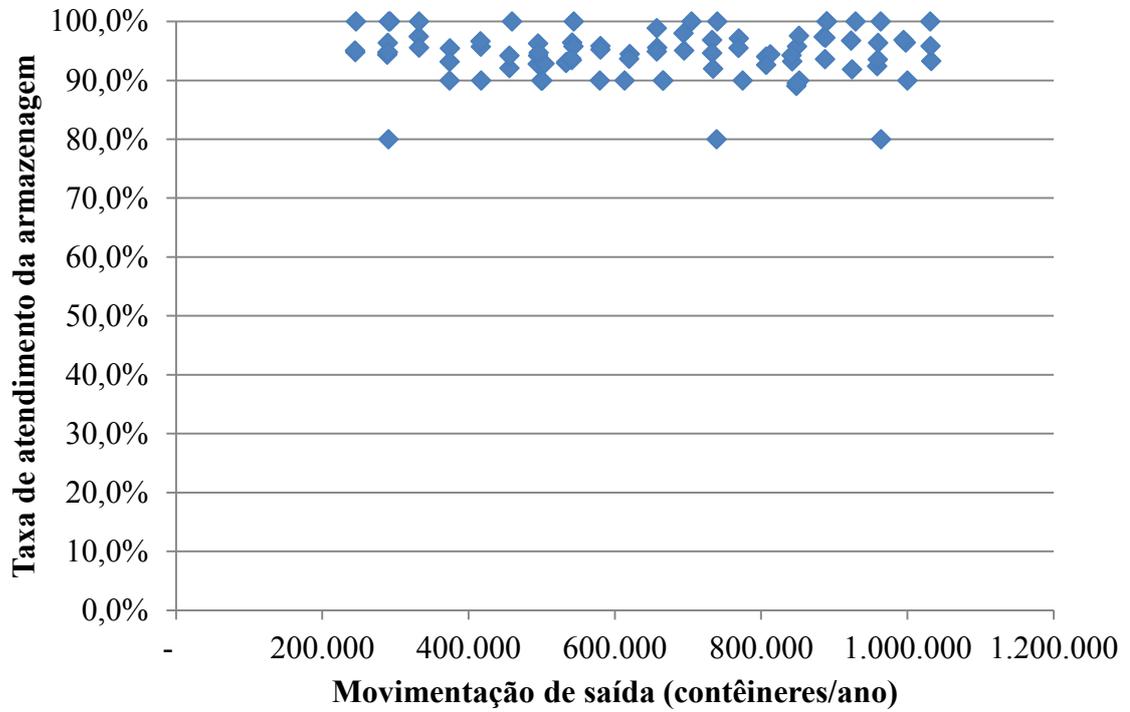
A Figura 21 ilustra índices de ocupação de cais e dos portões de caminhão, que foram coletados para fins de inspeção de modelo. Os resultados se comportaram de maneira semelhante à da Figura 17. A maior ocorrência de *outliers* é explicada pelo maior tamanho total da amostra, de 16.554 simulações em vez de 346.

Figura 21 — Gráfico de relação entre índices de ocupação de recursos e movimentação de saída no procedimento da perspectiva de demanda com abordagem econômica



A Figura 22 mostra a taxa de atendimento da armazenagem nas simulações, ou seja, o percentual de vezes em que as simulações tiveram nível máximo de armazenagem igual ou inferior à armazenagem dimensionada. É possível verificar que a maior parte dos valores oscila na faixa entre 90% e 100%, e alguns poucos valores são de 80%. Considera-se que, dada a precisão dos dados, o dimensionamento adotado foi adequado. Todavia são recomendados estudos mais aprofundados para refinamento do método, em especial para avaliação do coeficiente que multiplica o desvio interquartilico (possivelmente adotar o valor 1,5).

Figura 22 —Taxa de atendimento da armazenagem dimensionada no procedimento da perspectiva de demanda com abordagem econômica



## 6 CONCLUSÃO

As conclusões foram divididas em seções sobre contribuições do trabalho e limitações e sugestões para futuras pesquisas.

### 6.1 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

Este trabalho teve como objetivo propor um método baseado em simulação para avaliação de capacidade e planejamento de expansão de um porto ou terminal. Esse objetivo foi alcançado, considerando os três procedimentos propostos e a aplicação ilustrativa em um caso teste, que também foi útil para adaptar e aprimorar o método.

A revisão sistemática da literatura contribuiu para o mapeamento do estado da arte na avaliação da capacidade portuária baseada em simulação. Na análise de conteúdo, foi identificada a falta de explicação quanto ao detalhamento do método e à escolha de critérios, heterogeneidade dos critérios e baixo rigor metodológico. Esse processo confirmou a oportunidade de se propor um método com maior rigor metodológico, flexibilidade, integração entre processos e não restrito a determinados grupos de recursos (*e.g.* não restrito apenas ao acesso aquaviário).

O trabalho identificou duas perspectivas para o planejamento da capacidade portuária, em que uma associa uma determinada movimentação crítica a uma configuração de recursos (perspectiva da oferta) e outra associa as configurações de recursos aos valores de movimentação de carga (perspectiva de demanda). Além disso, para a perspectiva da demanda, é possível usar a abordagem de engenharia (baseada em indicadores operacionais) ou a abordagem econômica (baseada em custos portuários), conforme indicado na literatura existente. No entanto, a abordagem econômica não é aplicável à perspectiva da oferta, uma vez que o valor ótimo de movimentação carece de significado prático e é sensível a custos fixos.

O procedimento proposto para a perspectiva da oferta permite o fornecimento de um valor que expresse o atendimento da demanda por uma determinada configuração de recursos. Esse valor pode ser usado como um indicador operacional que orienta a necessidade de uma

expansão do terminal. Além disso, se o planejador portuário decidir elaborar um modelo de simulação com escopo limitado, o valor de capacidade poderá orientar o desenvolvimento de um planejamento de expansão juntamente com outras análises de diferentes partes do sistema.

Os procedimentos da perspectiva de demanda permitem o planejamento de expansão de um porto ou terminal de maneira eficaz. O planejamento de expansão pode ser aplicado a terminais existentes ou *greenfield*, neste último caso considerando uma configuração inicial com poucos recursos. Os planejadores portuários têm flexibilidade devido às abordagens de engenharia e econômica, e porque o plano de ações é orientado a níveis de movimentação de carga e não ao tempo, o que é útil considerando variações na previsão de demanda.

Dito isto, as contribuições deste trabalho podem ser aplicadas ao planejamento de médio e longo prazo de portos e terminais. Os planejadores portuários podem usar o método para orientar quando executar melhorias nos terminais, como: construção de berços e outras estruturas; aquisição de equipamentos portuários; contratação de mão-de-obra; dragagem; e outras mudanças nas vias navegáveis. Também há potencial para aplicação no planejamento de curto prazo, ao ser avaliado o impacto de melhorias operacionais (por exemplo, mudanças na programação do berço e no agendamento de caminhões) nos valores de capacidade ou no planejamento de expansão de um terminal.

Essas implicações gerenciais têm impacto na sociedade, considerando a contribuição do trabalho em direção a uma maior assertividade dos investimentos em portos e terminais. No caso de governança portuária pública (*e.g.* investimento em dragagem, ampliação de portos no sistema *landlord*), esse efeito consegue ser diretamente avaliado, considerando que o dinheiro do pagador de impostos pode ser melhor gasto, seja na área de infraestrutura ou direcionando recursos para outras áreas, como educação e saúde. Porém mesmo no caso de investimentos privados a sociedade se beneficia com a assertividade de investimentos, em função da redução de custos logísticos que é potencialmente repassada ao consumidor, além de viabilizar maior desenvolvimento econômico.

Além de ser aplicável a Planos Mestres e outros documentos que visam avaliar alternativas de expansão portuária, o trabalho tem potencial de afetar políticas públicas na ANTAQ (Agência Nacional de Transportes Aquaviários), no exemplo brasileiro. A agência reguladora utiliza valores de capacidade portuária para, por exemplo, definir reequilíbrio de contratos de arrendamento, realizar leilões de arrendamento de áreas em portos organizados e autorizar terminais de uso privado. Este trabalho poderia em especial direcionar mudanças em

relação a como a capacidade de instalações de armazenagem é considerada no planejamento portuário nacional.

## 6.2 LIMITAÇÕES E SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS

A revisão sistemática realizada possui limitações inerentes ao próprio processo de busca, pois nunca se pode afirmar que um assunto foi procurado em toda a literatura disponível. No entanto, conforme explicado ao longo do trabalho, a lógica de pesquisa adotada foi considerada suficientemente abrangente.

O método proposto apresenta algumas limitações relacionadas ao custo computacional, principalmente na abordagem econômica do procedimento de demanda. Portanto, o método pode não ser adequado para o planejamento de expansão de recursos com baixo impacto percentual nos custos relacionados ao tempo, devido ao grande tamanho de amostra necessário. No entanto, o uso de pacotes computacionais mais leves, computação paralela e configurações de *hardware* mais poderosas tem o potencial de atenuar o problema.

Trabalhos futuros podem ser dedicados a melhorias do método proposto, aplicação do método a terminais portuários reais e adaptação do método a outros sistemas, conforme explorado a seguir.

### 6.2.1 Melhorias do método proposto

A lógica do método proposto neste trabalho é uma simplificação do problema de escolha de capacidade portuária. Futuros trabalhos podem incorporar outros aspectos considerados na literatura, tais como:

- Competição portuária. Luo, Liu e Gao (2012) mostram como a competição entre terminais pode afetar a escolha de capacidade portuária, ou seja, considerar apenas o terminal analisado no planejamento de expansão pode não considerar aspectos relevantes para tomada de decisão;
- Economias de escala na expansão de capacidade. Ainda que a literatura (NOVAES *et al.*, 2012) mostre que o preço por unidade de recursos (e.g. preço de construção de um berço) caia à medida que o número de recursos

aumento, o método proposto considerou para tomada de decisão apenas um passo pré-determinado de aumento de recursos e um preço associado a ele.

- Incertezas. Conforme abordado por Balliauw *et al.* (2018), diversos são os fatores que trazem incerteza à escolha de capacidade portuária, como a competição entre cadeias de suprimento globais e mudanças tecnológicas. Embora diversos fatores considerados no modelo do caso teste sejam estocásticos, os valores de custos considerados foram todos determinísticos. Poderia ser avaliada a adequabilidade de se conciliar o método proposto com a abordagem de avaliação de opções reais (BALLIAUW *et al.*, 2018).

Além disso, a abordagem econômica pode ser adaptada para considerar os custos do investimento para determinada vida útil dos componentes e determinado horizonte de planejamento, em vez dos custos anuais. Ou seja, considerar um horizonte de planejamento (*e.g.* 50 anos), demanda projetada para o período, e montar fluxos de caixa associados às diferentes possibilidades de expansão, escolhendo como melhor cenário o com menor custo.

### 6.2.2 Aplicação do método a terminais portuários reais

Aplicações futuras em terminais portuários reais podem gerar resultados empíricos que contribuam para:

- Literatura de *benchmark* de desempenho portuário. Embora diversos artigos tenham sido destinados a avaliar quais indicadores operacionais são os mais relevantes, não são consolidados os limiares associados a eles. Ainda, salvo melhor juízo, a literatura quase nunca associa esses valores à capacidade portuária e gatilhos para expansão portuária.
- Auxiliar na atualização de gráficos de planejamento como os da UNCTAD (1985). A referida publicação é do ano de 1985, e embora os conceitos descritos no trabalho ainda perdurem, diversos valores numéricos merecem atualização. Além disso, considerando que a simulação computacional é um método que consome mais tempo e recursos financeiros do que outros (conforme Seção 3.2), seria interessante a construção de ábacos com resultados de simulações e que guiem a expansão de terminais portuários. Embora essa abordagem possa não retratar com detalhes a operação do

terminal portuário em análise, ela pode ser útil pois busca aliar as vantagens da adoção das regras empíricas e da modelagem de simulação.

- Testar o planejamento de expansão de outros grupos de recursos não considerados neste documento. Os *slots* de armazenagem já mereceram atencional especial no caso teste (conforme Seção 4.3.3), e possivelmente outros recursos não considerados no caso teste (*e.g.* acesso aquaviário) também devem ter suas especificidades consideradas no planejamento de expansão portuária.

### **6.2.3 Adaptação do método a outros sistemas produtivos e logísticos**

O método proposto tem como objetivo avaliar a necessidade de expansão de recursos de um modelo de simulação, e embora toda a argumentação deste trabalho seja voltada a portos e terminais, ele também pode ser aplicado a outros sistemas produtivos e logísticos.

Dadas as adaptações apropriadas, o método também pode ser aplicado à avaliação de capacidade e planejamento de expansão, seja em logística e transporte (*e.g.*, estações ferroviárias, portos secos), bem como na indústria (*e.g.*, fábricas) e setor de serviços (*e.g.*, hospitais). As adaptações devem ser feitas levando em consideração as especificidades de cada caso, os indicadores operacionais adequados e os custos associados.

## REFERÊNCIAS

- ANGELOUDIS, P.; BELL, M. G. A review of container terminal simulation models. **Maritime Policy & Management**, v. 38, n. 5, p. 523-540, 2011. DOI: 10.1080/03088839.2011.597448.
- BALLIAUW, M.; MEERSMAN, H.; VAN DE VOORDE, E.; VANELSLANDER, T. Towards improved port capacity investment decisions under uncertainty: a real options approach. **Transport Reviews**, v. 39, n. 4, p. 531-552, 2019. DOI: 10.1080/01441647.2018.1556228.
- BARBETTA, P.A.; REIS, M.M.; BORNIA, A.C. **Estatística para cursos de engenharia e informática**, 3 ed. São Paulo: Editora Atlas S.A, 2010. 410 p.
- BORSHCHEV, A. In: **The Big Book of Simulation Modeling: Multimethod Modeling with AnyLogic 6**. Estados Unidos: AnyLogic North America, 2013.
- BRASIL. Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil. Secretaria Nacional de Portos. **Planos Mestres – Versão Completa**. Brasília, 2018. Disponível em: <<http://www.portosdobrasil.gov.br/assuntos-1/pnpl/planos-mestres>>. Acesso em: 08 ago. 2018.
- BRASIL. Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil – MTPA. Secretaria Nacional de Portos. **Porto sem papel – PSP**. Brasília, 2017. Disponível em: <<http://www.portosdobrasil.gov.br/assuntos-1/inteligencia-logistica/porto-sem-papel-ppsp>>. Acesso em: 02 jul. 2018.
- CHANG, Y. T.; TONGZON, J.; LUO, M.; LEE, P. T. W. Estimation of optimal handling capacity of a container port: an economic approach. **Transport Reviews**, v. 32, n. 2, p. 241-258, 2012. DOI: 10.1080/01441647.2011.644346.
- CHU, C. Y.; HUANG, W. C. Determining container terminal capacity on the basis of an adopted yard handling system. **Transport Reviews**, v. 25, n. 2, p. 181-199, 2005. DOI: 10.1080/0144164042000244608.
- CHWIF, L.; BANKS, J.; MOURA FILHO, J. P. de; SANTINI, B. A framework for specifying a discrete-event simulation conceptual model. **Journal of Simulation**, v. 7, n. 1, p. 50-60, 2013.
- CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e Simulação de Eventos Discretos: Teoria e Aplicações**. 2 ed. São Paulo: Bravarte, 2007.
- COOPER, M.C.; LAMBERT, D.M; PAGH, J.D. Supply Chain Management: More Than a New Name for Logistics. **The International Journal of Logistics Management**, 1997, v. 8, p. 1-14.
- CSCMP – COUNCIL OF SUPPLY CHAIN MANAGEMENT PROFESSIONALS. **CSCMP Supply Chain Management Definitions and Glossary**. Lombard-IL (EUA), 2018.

Disponível em:  
[http://cscmp.org/CSCMP/Educate/SCM\\_Definitions\\_and\\_Glossary\\_of\\_Terms/CSCMP/Educate/SCM\\_Definitions\\_and\\_Glossary\\_of\\_Terms.aspx?hkey=60879588-f65f-4ab5-8c4b-6878815ef921](http://cscmp.org/CSCMP/Educate/SCM_Definitions_and_Glossary_of_Terms/CSCMP/Educate/SCM_Definitions_and_Glossary_of_Terms.aspx?hkey=60879588-f65f-4ab5-8c4b-6878815ef921). Acesso em: 13 set. 2018.

DA CRUZ, M. R. P.; FERREIRA, J. J.; AZEVEDO, S. G. Key factors of seaport competitiveness based on the stakeholder perspective: An Analytic Hierarchy Process (AHP) model. **Maritime Economics & Logistics**, v. 15, n. 4, p. 416-443, 2013. DOI: 10.1057/mel.2013.14.

DE BORGER, B.; PROOST, S.; VAN DENDER, K. Private and public investment in port and hinterland capacity. *Journal of Transport Economics and Policy*, v. 42, n. 3, p. 527-561, 2008. DOI: 10.2139/ssrn.1024691.

DE BORGER, B.; VAN DENDER, K. Prices, capacities and service levels in a congestible Bertrand duopoly. **Journal of Urban Economics**, v. 60, n. 2, p. 264-283, 2006. DOI: 10.1016/j.jue.2006.03.001.

DEKKER, R.; VAN DER HEIDE, S.; VAN ASPEREN, E.; YPSILANTIS, P. A chassis exchange terminal to reduce truck congestion at container terminals. **Flexible Services and Manufacturing Journal**, v. 25, n. 4, p. 528-542, 2013. DOI: 10.1007/s10696-012-9146-3.

DEVANNEY III, J. W.; TAN, L. H. The relationship between short-run pricing and investment timing: The port pricing and expansion example. **Transportation Research**, v. 9, n. 6, p. 329-337, 1975. DOI: 10.1016/0041-1647(75)90003-9.

DING, Y. Z. Throughput capacity of a container terminal considering the combination patterns of the types of arriving vessels. **Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)**, v. 15, n. 1, p. 124-128, 2010. DOI: 10.1007/s12204-010-8174-y.

DRAGOVIĆ, B.; TZANNATOS, E.; PARK, N. K. Simulation modelling in ports and container terminals: literature overview and analysis by research field, application area and tool. **Flexible Services and Manufacturing Journal**, v. 29, n. 1, p. 4-34, 2017. DOI: 10.1007/s10696-016-9239-5.

EASA, S. M. Approximate queueing models for analyzing harbor terminal operations. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 21, n. 4, p. 269-286, 1987. DOI: 10.1016/0191-2615(87)90027-0.

EASYFIT Professional. **Version 5.6**. [S.l.]: Mathwave Technologies, 2015. Disponível em: <<http://www.mathwave.com>>. Acesso em: 09 set. 2019.

FENG, X.; WANG, M.; LI, Y.; GU, W.; ZHANG, Y. Optimal throughput of crude oil terminals with options for infrastructure improvements. **Journal of Coastal Research**, v. 73, p. 628-634, 2015. DOI: 10.2112/SI73-109.1.

FIGUEIRA, G.; ALMADA-LOBO, B. Hybrid simulation–optimization methods: A taxonomy and discussion. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 46, p. 118-134, 2014. DOI: 10.1016/j.simpat.2014.03.007.

GOOGLE. **Google Earth**. [201-]. Disponível em: <<https://www.google.com/earth/>>. Acesso em: 2 abr. 2015.

GROENVELD, R. **Service systems in ports and inland waterways**. Delft (Países Baixos): VSSD, 2001. 76 p.

GUAN, C. Q.; LIU, R. Modeling Gate Congestion of Marine Container Terminals, Truck Waiting Cost and Optimization. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2100, n. 1, p. 58-67, 2009. DOI: 10.3141/2100-07.

GUO, Z.; YU, X.; TANG, G.; WANG, W. A simulation model for determining throughput capacity of container terminals. In: HMS - International Conference on Harbor, Maritime and Multimodal Logistics Modelling and Simulation, 17., 2015, Red Hook-NY (United States). **Proceedings [...]**. Red Hook-NY (United States): Curran Associates, 2015, p. 23-27.

HA, M. H.; YANG, Z. Comparative analysis of port performance indicators: Independency and interdependency. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 103, p. 264-278, 2017. DOI: 10.1016/j.tra.2017.06.013.

HABEEB, B. R.; GUO, Z.; SONG, X. A Simulation Model to Determine the Capacity of a Y-Type Waterway Intersection for a Real Seaport. **The Open Transportation Journal**, v. 12, n. 1, p. 8-20, 2018. DOI: 10.2174/1874447801812010008.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à pesquisa operacional**. 8. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.

HUANG, S. Y.; HSU, W. J.; CHEN, C.; YE, R.; NAUTIYAL, S. Capacity analysis of container terminals using simulation techniques. **International Journal of Computer Applications in Technology**, v. 32, n. 4, p. 246-253, 2008. DOI: 10.1504/IJCAT.2008.021379.

KAUFFMAN, P.; HOWARD, E.; YAO, J.; HARBINSON, D.; BROOKS, N.; WILLIAMS, R.; GURGANUS, C. Criteria for Fleet Management: Identification of Optimal Disposal Points with the Use of Equivalent Uniform Annual Cost. **Transportation Research Record**, v. 2292, n. 1, p. 171-178, 2012. DOI: 10.3141/2292-20

KECELI, Y.; AKSOY, S.; AYDOGDU, Y. A simulation model for decision support in Ro-Ro terminal operations. **International Journal of Logistics Systems and Management**, v. 15, n. 4, p. 338-358, 2013. DOI: 10.1504/IJLSM.2013.054896.

KROESE, D.P.; BRERETON, T.; TAIMRE, T.; BOTEV, Z. I. Why the Monte Carlo method is so important today. **WIRES Comput Stat**, v. 6, n. 6, p. 386-392, 2014. DOI: 10.1002/wics.1314

KULKARNI, K.; TRAN, K. T.; WANG, H.; LAU, H. C. Efficient gate system operations for a multipurpose port using simulation-optimization. In: WSC - WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2017, Las Vegas-NV (United States). **Proceedings** [...]. Las Vegas-NV (United States): IEEE, 2017, p. 3090-3101.

LAYAA, J.; DULLAERT, W. Measuring and analysing terminal capacity in East Africa: The case of the seaport of Dar es Salaam. **Maritime Economics & Logistics**, v. 16, n. 2, p. 141-164, 2014. DOI: 10.1057/mel.2013.23.

LEE., B.K.; LEE, L.H.; CHEW, E.P. Analysis on container port capacity: a Markovian modeling approach. **OR Spectrum**, v.36, p. 425-454, 2014. DOI: 10.1007/s00291-012-0318-z

LI, A.; LEE, L. H.; CHEW, E. P.; TAN, K. C. A simulation approach in estimating the impact of channel on port capacity. **World Review of Intermodal Transportation Research**, v. 1, n. 4, p. 343-356, 2007. DOI: 10.1504/WRITR.2007.017092.

LI, H.; ZHOU, C.; LEE, B. K.; LEE, L. H.; CHEW, E. P.; GOH, R. S. M. Capacity planning for mega container terminals with multi-objective and multi-fidelity simulation optimization. **IIE Transactions**, v. 49, n. 9, p. 849-862, 2017. DOI: 10.1080/24725854.2017.1318229.

LI, N.; YU, J.; TANG, G.; LI, D.; ZHANG, Y. Container terminals capacity evaluation considering port service level based on simulation. In: ECMS - EUROPEAN CONFERENCE ON MODELLING AND SIMULATION, 31., 2017, Budapest (Hungary). **Proceedings** [...]. Budapest (Hungary): European Council for Modelling and Simulation, 2017, p. 197-203.

LIBERATI, A. *et al.* The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate health care interventions: explanation and elaboration. **PLoS medicine**, v. 6, n.7, p. e1000100, 2009. DOI: 10.1371/journal.pmed.1000100.

LIGTERINGEN, H.; VELSINK, H. **Ports and Terminals**. Delft (Holanda): VSSD, 2012. 276 p.

LIU, Q.; CHEN, Y. Q.; WANG, H. Y.; ZHANG, Y. J.; ZHANG, W. Exploring the Shunt Capacity of Transshipment Port in front of the Three Gorges Dam Based on Arena Simulation. In: ICIM - INTERNATIONAL CONFERENCE ON INNOVATION & MANAGEMENT, 2016, Wuhan (China). **Proceedings** [...]. Wuhan (China): Wuhan University of Technology Press, 2016, p. 684-688.

LUO, M.; LIU, L.; GAO, F. Post-entry container port capacity expansion. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 46, p. 120–138, 2012. DOI: 10.1016/j.trb.2011.09.001.

MALAVASI, G.; RICCI, S. The sea-side port capacity: a synthetic evaluation model. In: MARCET I BARBE, R.; BREBBIA C. A.; OLIVELLA, J. (Eds.). **WIT Transactions on The Built Environment**, v. 79. Southampton, UK: WIT Press, 2005, p. 471-479.

- MARINACCI, C.; QUATTRINI, A.; RICCI, S. Integrated design process of maritime terminals assisted by simulation models. In: HMS - INTERNATIONAL WORKSHOP ON HARBOR, MARITIME & MULTIMODAL LOGISTICS MODELING & SIMULATION, 11., 2008, Rende (Italy). **Proceedings** [...]. Rende (Italy): DIPTTEM University of Genoa, 2008, p. 190-201.
- MARSAGLIA, G.; ZAMAN, A.; TSANG, W.W. Toward a universal random number generator. **Statistics & Probability Letters**, v. 9, n. 1, p. 35-39, 1990. DOI: 10.1016/0167-7152(90)90092-L.
- MARTÍNEZ-COSTA, C.; MAS-MACHUCA, M.; BENEDITO, E.; COROMINAS, A. A review of mathematical programming models for strategic capacity planning in manufacturing. **International Journal of Production Economics**, v. 153, p. 66-85, 2014. DOI: 10.1016/j.ijpe.2014.03.011.
- MAZOUZ, A.; NAJI, L.; LYU, Y. Container-Terminal-Gate-System Optimization. **Journal of Applied Business Research**, v. 33, n. 3, p. 605-614, 2017. DOI: 10.19030/jabr.v33i3.9949.
- MUNISAMY, S. Timber terminal capacity planning through queuing theory. **Maritime Economics & Logistics**, v. 12, n. 2, p. 147-161, 2010. DOI: 10.1057/mel.2010.3.
- NETTO, J. F.; BOTTER, R. C.; MEDINA, A. C. Analysis of capacity associated to levels of service at port terminals using systemic approach and simulation of discrete events. In: WSC – WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2015, Huntington Beach-CA (Estados Unidos). **Proceedings** [...]. Huntington Beach, CA: IEEE, p. 3426-3437.
- NG, W. C.; WONG, C. S. Evaluating the impact of vessel-traffic interference on container terminal capacity. **Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering**, v. 132, n. 2, p. 76-82, 2006. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-950X(2006)132:2(76).
- NIE, Y.; LIU, K.; XIN, X.; YU, Q. A Novel Through Capacity Model for One-way Channel Based on Characteristics of the Vessel Traffic Flow. **TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation**, v. 11, n. 3, p. 495-502, 2017. DOI: 10.12716/1001.11.03.16.
- NOVAES, A.G. **Logística e Gerenciamento da Cadeia de Distribuição**. 4. Ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.
- NOVAES, A. G.; SCHOLZ-REITER, B.; SILVA, V. M. D.; ROSA, H. Long-term planning of a container terminal under demand uncertainty and economies of scale. **Pesquisa Operacional**, v. 32, n. 1, p. 55-86, 2012. DOI: 10.1590/S0101-74382012005000009.
- OLBA, X. B.; DAAMEN, W.; VELLINGA, T.; HOOGENDOORN, S. P. Estimating port network traffic capacity. **Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin**, v. 42, n. 114, p. 45-53, 2015. DOI: 10.17402/019.
- OLBA, X. B.; DAAMEN, W.; VELLINGA, T.; HOOGENDOORN, S. P. Network capacity estimation of vessel traffic: an approach for port planning. **Journal of Waterway, Port,**

**Coastal, and Ocean Engineering**, v. 143, n. 5, p. 04017019, 2017. DOI: 10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000400.

OLBA, X. B.; DAAMEN, W.; VELLINGA, T.; HOOGENDOORN, S. P. Multi-criteria evaluation of vessel traffic for port assessment: A case study of the Port of Rotterdam. **Case Studies on Transport Policy**, v.7, n. 4, p. 871-881, 2019. DOI: 10.1016/j.cstp.2019.07.005.

PARK, C. S.; NOH, Y. D. A port simulation model for bulk cargo operations. **Simulation**, v. 48, n. 6, p. 236-246, 1987. DOI: 10.1177/003754978704800605.

PIANC - Permanent International Association of Navigation Congresses. **Masterplans for the Development of Existing Ports**. PIANC Report n° 158 – Maritime Navigation Commission. Bruxelles, 2014b. Disponível em: <http://www.pianc.org/downloads/publications>. Acesso em: 14 abr. 2015.

RADMILOVICH, Z. R. Ship-berth link as bulk queueing system in ports. **Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering**, v. 118, n. 5, p. 474-495, 1992. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-950X(1992)118:5(474).

REIS, V.; ALMEIDA, A. Capacity evaluation of a railway terminal using microsimulation: case study of a Freight Village in Turin. **Frontiers in Built Environment**, v. 5, p. 75, 2019. DOI: 10.3389/fbuil.2019.00075

REZAEI, J.; VAN WULFFTEN PALTHE, L.; TAVASSZY, L.; WIEGMANS, B.; VAN DER LAAN, F. Port performance measurement in the context of port choice: an MCDA approach. **Management Decision**, v. 57, n. 2, p. 396-417, 2018. DOI: 10.1108/MD-04-2018-0482.

RICCI, S.; MARINACCI, C.; RIZZETTO, L. The modelling support to maritime terminals sea operation: The case study of port of Messina. **Journal of Maritime Research**, v. 9, n. 3, p. 39-44, 2012.

RUHKIN, A.L. Testing randomness: a suite of statistical procedures. **Theory of Probability & Its Applications**, v. 45, n. 1, p. 111-132, 2001. DOI: 10.1137/S0040585X97978087.

RUSGIYARTO, F.; SJAFRUDDIN, A.; FRAZILA, R. B.; SUPRAYOGI, B.; BURHANI, J. T. Inland container depots effect for import container terminal performance at Koja container terminal, Jakarta based on optimization–simulation model. In: PRASETYO, H.; HIDAYATI, N.; SETIAWAN, E.; WIDAYATNO, T. **AIP Conference Proceedings**, v. 1977, n. 1. Surakarta (Indonésia): AIP Publishing, 2018, p. 020038.

SANG, L. Z.; TONG, X. P.; XU, W. X.; MAO, Z.; YAN, X. P. An agent-based simulation on navigational capacity of multi-bridge waterways. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment**, v. 231, n. 1, p. 200-211, 2017.

SHANG, J.; WANG, W.; PENG, Y.; TIAN, Q.; TANG, Y.; GUO, Z. Simulation research on the influence of special ships on waterway through capacity for a complex waterway system: a case study for the Port of Meizhou Bay. **Simulation**, 2019. DOI: 10.1177/0037549719875224.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; HARLANDM C.; HARRISON, A.; JOHNSTON, R. **Administração da Produção**. São Paulo: Atlas, 1996.

SOLAVIKI, T.; HOFMANN, E.; TÖYLI, J.; OJALA, L. The performance of logistics service providers and the logistics costs of shippers: a comparative study of Finland and Switzerland. **International Journal of Logistics Research and Applications**, v. 21, n. 4, p. 444-463, 2018. DOI: 10.1080/13675567.2018.1439906.

STAHLBOCK, R.; VOß, S. Operations research at container terminals: a literature update. **OR spectrum**, v. 30, n. 1, p. 1-52, 2008. DOI: 10.1007/s00291-007-0100-9.

STAUDT, F.H.; COELHO, A.S.; GONÇALVES, M.B. Determinação da capacidade real necessária de um processo produtivo utilizando cadeia de Markov. **Production**, v. 21, n. 4, p. 634-644, 2011. DOI: 10.1590/S0103-65132011005000058.

TAHA, H. A. **Pesquisa Operacional**. 8a edição. Pearson Prentice Hall: São Paulo, 2008.

TAN, Z.; LI, W.; ZHANG, X.; YANG, H. Service charge and capacity selection of an inland river port with location-dependent shipping cost and service congestion. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 76, p. 13-33, 2015.

TIAN, Q.; GUO, Z.; WANG, W.; PENG, Y. Simulation research on seaport fairway capacity and its promotion measure: A case study of Jingtang Port Area in China. In: HMS - INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARBOR, MARITIME AND MULTIMODAL LOGISTICS MODELLING AND SIMULATION, 18., 2016, Lárnaca (Chipre) . **Proceedings** [...]. Red Hook-NY (Estados Unidos): Curran Associates, p. 1-7.

TRISKA, Y. **Cálculo de capacidade de movimentação de cais: aplicação para terminal de granéis sólidos**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) — Departamento de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 139 p. 2015.

TRISKA, Y.; FRAZZON, E.M. Discussão conceitual sobre capacidade de armazenagem portuária e métodos para sua avaliação. In: V CIDESPORT – CONGRESSO INTERNACIONAL DE DESEMPENHO PORTUÁRIO, 2018, Florianópolis, Brazil. **Anais eletrônicos** [...]. Campinas: Galoá, 2018. DOI: 10.17648/cidesport-2018-89348.

TUKEY, J.W. **Exploratory data analysis**. Reading, MA (Estados Unidos): Addison-Wesley, 1977.

UNCTAD – United Nations Conference on Trade and Development. **Port development: A handbook for panner in developing countries**. 2ª ed. Nova Iorque (Estados Unidos), 1985.

UNCTAD – United Nations Conference on Trade and Development. **Infographics**. Geneva (Suíça), 2019. Disponível em: <https://unctadstat.unctad.org/EN/Infographics.html>. Acesso em: 01. abr. 2019.

WADHWA, L. C. Planning operations of bulk loading terminals by simulation. **Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering**, v. 118, n. 3, p. 300-315, 1992. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-950X(1992)118:3(300).

WANG, W.; PENG, Y.; SONG, X.; ZHOU, Y. Impact of navigational safety level on seaport fairway capacity. **The Journal of Navigation**, v. 68, n. 6, p. 1120-1132, 2015. DOI: 10.1017/S0373463315000387.

WANG, W.; PENG, Y.; TIAN, Q.; SONG, X. Key influencing factors on improving the waterway through capacity of coastal ports. **Ocean Engineering**, v. 137, p. 382-393, 2017. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.04.013.

WANG, W.; TANG, G. L.; GUO, Z. J.; SONG, X. Q.; DU, P. C. Study on the Impact of Inner Anchorage on Waterway Traffic Capacity. **Applied Mechanics and Materials**, v. 438, p. 2013-2016, 2013. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.438-439.2013.

WANG, W.; YANG, B.; GUO, Z. Influence of operation days on fairway capacity in coastal bulk cargo port area based on port service level. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SERVICE OPERATIONS AND LOGISTICS, AND INFORMATICS, 2013, Dongguan (China). **Proceedings** [...]. Dongguan (China): IEEE, 2013, p. 287-291.

XIAO, Y.; NG, A. K.; YANG, H.; FU, X. An analysis of the dynamics of ownership, capacity investments and pricing structure of ports. **Transport Reviews**, v. 32, n. 5, p. 629-652, 2012. DOI: 10.1080/01441647.2012.709888.

XIN, X.; LIU, K.; YANG, X.; YUAN, Z.; ZHANG, J. A simulation model for ship navigation in the “Xiazhimen” waterway based on statistical analysis of AIS data. **Ocean Engineering**, v. 180, p. 279-289, 2019. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.03.052

ZHANG, Y.; AGUILAR, R.; LAZCANO, G. Using simulation to evaluate and optimize a port system — a case study. In 15TH TRIENNIAL INTERNATIONAL CONFERENCE, Pittsburgh (United States), 2019. **Ports 2019**. Reston-VA, United States: ASCE, 2019, p. 389-398. DOI: 10.1061/9780784482629.037.

ZHU, B.; ZHOU, Q.; TIAN, Y.; CHEN, K. Analysis Method of Terminal Throughput Capacity for Coal Export Terminals. **Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering**, v. 144, n. 1, p. 04017036, 2017. DOI: 10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000422.

**APÊNDICE A – Prova da influência de custos fixos no valor de capacidade obtido por abordagem econômica**

Afirmção: Uma mudança no parâmetro de custo fixo da função de custo por carga movimentada modifica o valor de movimentação ótima, *i.e.* o valor de capacidade atribuído ao terminal portuário por abordagem econômica (CHANG *et al.*, 2012).

A função de custo por carga movimentada ( $Y$ ) pode ser representada pela divisão dos custos ( $C$ , dependente de  $t$ ) pela quantidade de carga movimentada ( $t$ ). No entanto,  $C$  é composta pela soma de custos variáveis ( $V$ , dependente de  $t$ ) e custos fixos ( $F$ , constante). Assumindo-se que  $Y$  é convexa, encontrar a movimentação ótima significa encontrar  $t$  onde  $dY/dt$  (ou  $Y'$ ) seja igual a zero.

$$Y' = 0 \quad (\text{A.1})$$

$$\left(\frac{V + F}{t}\right)' = 0 \quad (\text{A.2})$$

Aplicando as regras de soma e de produto para diferenciação:

$$\left[V' \times \frac{1}{t} + V \times (-t^{-2})\right] + [F \times (-t^{-2})] = 0 \quad (\text{A.3})$$

Prosseguindo com manipulações elementares da equação anterior:

$$\frac{V'}{t} + \frac{(F + V)}{-t^{-2}} = 0 \quad (\text{A.4})$$

$$t \times V' - (F + V) = 0 \quad (\text{A.5})$$

$$F = t \times V' - V \quad (\text{A.6})$$

Ao ser analisada a equação anterior, é possível verificar que, para que a igualdade seja mantida, uma mudança (seja aumento ou diminuição) na constante  $F$  modifica o valor de  $t$  e/ou funções dependents de  $t$  ( $V'$  e  $V$ ). Isso significa que o ponto de valor mínimo de  $Y$  é deslocado no eixo  $t$ , *i.e.* o valor de capacidade atribuído ao terminal portuário é modificado, o que prova a afirmação.

## APÊNDICE B – Código do procedimento de oferta do método proposto

Código implementado em Java no programa AnyLogic como um custom experiment. Abaixo são inseridos o código nos campos “code” e “additional class code”.

### Code

```
//input experiment parameters
double threshold = 4.8;
double acceptedPercentualErrorReference = 0.05;
int initialSample = 10;
double[] zValues = {12.706, 4.303, 3.182, 2.776, 2.571, 2.447, 2.365, 2.306, 2.262, 2.228,
                    2.207, 2.179, 2.16, 2.145, 2.131, 2.12, 2.11, 2.101, 2.093, 2.086,
                    2.08, 2.074, 2.069, 2.064, 2.06, 2.056, 2.052, 2.048, 2.045, 2.042};
double stepDemandaDeSimulacao = 200000.0;

//input model parameters
int BS_nBercos = 2;
int BS_nSlotsArmazenagem = 30000;
int BS_nPortoesCaminhoes = 6;
double demandaDeSimulacao = 250000.0;
int[] ES_resources = {BS_nBercos, BS_nSlotsArmazenagem, BS_nPortoesCaminhoes};

// values are added to the following lists in the scenario evaluation procedure
LinkedList<Double> recordSimulationDemands = new LinkedList<Double>();
LinkedList<Double> recordOutflows = new LinkedList<Double>();
LinkedList<Double> recordWaitingTimes = new LinkedList<Double>();

// auxiliar variables
int i = 0;
double neededSampleSizeOutflows = (double) initialSample;
double neededSampleSizeWaitingTimes = (double) initialSample;
LinkedList<Double> outflows = new LinkedList<Double>();
LinkedList<Double> waitingTimes = new LinkedList<Double>();
LinkedList<Integer> indexesToPurge = new LinkedList<Integer>();
LinkedList<Double> outflowsIQR = new LinkedList<Double>();
LinkedList<Double> waitingTimesIQR = new LinkedList<Double>();
double acceptedPercentualError = acceptedPercentualErrorReference;
double currentZ = 0.0;

//output control
long timeBegginingProcedure = System.currentTimeMillis();
traceln("Sheet A; Simulation Demand; nBerths; nStorage; nTruckGates; Round index; rhoBerths; rhoStorage;
rhoGates; Outflow; AWT");
traceln("Sheet B; Simulation Demand; nBerths; nStorage; nTruckGates; SampleSize; MeanOutflow; MeanAWT;
StopCriterion; RE AWT; RE outflow; Discard ratio; Discard indexes");

//---beggining scenario evaluation
```

```

i = 0;
outflows.clear();
waitingTimes.clear();
neededSampleSizeOutflows = initialSample;
neededSampleSizeWaitingTimes = initialSample;

do {

//simulation itself
    Engine engine = createEngine();
    engine.setTimeUnit( HOUR );
    long seed = System.currentTimeMillis();
    engine.getDefaultRandomGenerator().setSeed(seed);
    engine.setSimultaneousEventsSelectionMode( Engine.EVENT_SELECTION_LIFO );
    engine.setStartTime( 0.0 );
    engine.setStartDate( toDate( 2019, MAY, 23, 0, 0, 0 ) );
    engine.setStopTime( 10200.0 );
    Main root = new Main( engine, null, null );
    root.nBercos = BS_nBercos;
    root.nSlotsArmazenagem = BS_nSlotsArmazenagem;
    root.nPortoesCaminhoes = BS_nPortoesCaminhoes;
    root.demandaDeSimulacao = demandaDeSimulacao;
    engine.start( root );
    engine.runFast();
    i++;
    outflows.addLast( (double) root.nContainers);
    waitingTimes.addLast(root.meanShipWaitingTime);
    println("A ." + demandaDeSimulacao + ";" + root.nBercos + ";" +
            root.nSlotsArmazenagem + ";" + root.nPortoesCaminhoes + ";" + i + ";" +
            root.bercos.utilization() + ";" + root.armazenagem.utilization() + ";" +
            root.portoesCaminhoes.utilization() + ";" +
            root.nContainers + ";" + root.meanShipWaitingTime);
    engine.stop();

//check if sample is ok
    if(i >= initialSample) {
        if(i > 30){
            currentZ = 1.96;
        } else {
            currentZ = zValues[i-1];
        }
        indexesToPurge.clear();
        outflowsIQR.clear();
        waitingTimesIQR.clear();
        indexesToPurge.addAll(joinIndexLists(getIndexesToPurge_IQR(waitingTimes),
getIndexesToPurge_IQR(outflows)));
        outflowsIQR.addAll(listAfterPurge(outflows, indexesToPurge) );
        waitingTimesIQR.addAll(listAfterPurge(waitingTimes, indexesToPurge) );

        acceptedPercentualError = Math.max(acceptedPercentualErrorReference, Math.abs((threshold -
getMean(waitingTimesIQR))/getMean(waitingTimesIQR)));

        neededSampleSizeOutflows = Math.pow( (currentZ * getStandardDeviation(outflowsIQR) /
getMean(outflowsIQR) / acceptedPercentualError), 2.0);
        neededSampleSizeWaitingTimes = Math.pow( (currentZ * getStandardDeviation(waitingTimesIQR) /
getMean(waitingTimesIQR) / acceptedPercentualError), 2.0);
    }
}
}

```

```

while( (double) (i - indexesToPurge.size() ) <= ( Math.max(neededSampleSizeOutflows,
neededSampleSizeWaitingTimes) ) );
recordSimulationDemands.addLast( (double) demandaDeSimulacao);
recordOutflows.addLast(getMean(outflowsIQR));
recordWaitingTimes.addLast(getMean(waitingTimesIQR));

//trace summary of simulation round
println("B ;" + demandaDeSimulacao + ";" + ES_resources[0] + ";" + ES_resources[1] + ";" +
ES_resources[2] + ";" + i + ";" +
recordOutflows.getLast() + ";" + recordWaitingTimes.getLast() + ";" +
acceptedPercentualError + ";" +
currentZ * getStandardDeviation(waitingTimesIQR) / getMean(waitingTimesIQR) /
Math.sqrt(waitingTimesIQR.size()) + ";" +
currentZ * getStandardDeviation(outflowsIQR) / getMean(outflowsIQR) /
Math.sqrt(outflowsIQR.size()) + ";" +
( (double) indexesToPurge.size()/ (double) waitingTimes.size() ) + ";" +
setValuesPlusOne(indexesToPurge) );

/--end scenario evaluation

double currentWaitingTime = recordWaitingTimes.getLast();

if(currentWaitingTime > threshold){
    stepDemandaDeSimulacao = stepDemandaDeSimulacao * (-1);
}

while( Math.abs(currentWaitingTime - threshold) > acceptedPercentualErrorReference * threshold) {
    boolean crossedThreshold = false;

    while(!crossedThreshold){
        demandaDeSimulacao += stepDemandaDeSimulacao;
        double diffToThreshold = currentWaitingTime - threshold;

        if(recordSimulationDemands.contains(demandaDeSimulacao)){
            crossedThreshold = true;
        } else {

            /---begging scenario evaluation (in step 4)

            i = 0;
            outflows.clear();
            waitingTimes.clear();
            neededSampleSizeOutflows = initialSample;
            neededSampleSizeWaitingTimes = initialSample;

            do {

                //simulation itself
                Engine engine = createEngine();
                engine.setTimeUnit( HOUR );
                long seed = System.currentTimeMillis();
                engine.getDefaultRandomGenerator().setSeed(seed);
                engine.setSimultaneousEventsSelectionMode( Engine.EVENT_SELECTION_LIFO );
                engine.setStartTime( 0.0 );
                engine.setStartDate( toDate( 2019, MAY, 23, 0, 0, 0 ) );

```

```

engine.setStopTime( 10200.0 );
Main root = new Main( engine, null, null );
    root.nBercos = BS_nBercos;
    root.nSlotsArmazenagem = BS_nSlotsArmazenagem;
    root.nPortoesCaminhoes = BS_nPortoesCaminhoes;
    root.demandaDeSimulacao = demandaDeSimulacao;
engine.start( root );
engine.runFast();
    i++;
    outflows.addLast( (double) root.nContainers);
    waitingTimes.addLast(root.meanShipWaitingTime);
    println("A ;" + demandaDeSimulacao + ";" + root.nBercos + ";" +
        root.nSlotsArmazenagem + ";" + root.nPortoesCaminhoes + ";" + i + ";" +
        root.bercos.utilization() + ";" + root.armazenagem.utilization() + ";" +
root.portoesCaminhoes.utilization() + ";" +
        root.nContainers + ";" + root.meanShipWaitingTime);
    engine.stop();

//check if sample is ok and checking for outliers
if(i >= initialSample) {
    if(i > 30){
        currentZ = 1.96;
    } else {
        currentZ = zValues[i-1];
    }
    outflowsIQR.clear();
    waitingTimesIQR.clear();
    indexesToPurge.clear();
    indexesToPurge.addAll(joinIndexLists(getIndexesToPurge_IQR(waitingTimes),
getIndexesToPurge_IQR(outflows)));
    outflowsIQR.addAll(listAfterPurge(outflows, indexesToPurge) );
    waitingTimesIQR.addAll(listAfterPurge(waitingTimes, indexesToPurge) );

    acceptedPercentualError = Math.max(acceptedPercentualErrorReference, Math.abs((threshold
- getMean(waitingTimesIQR))/getMean(waitingTimesIQR)));

    neededSampleSizeOutflows = Math.pow( (currentZ * getStandardDeviation(outflowsIQR) /
getMean(outflowsIQR) / acceptedPercentualError), 2.0);
    neededSampleSizeWaitingTimes = Math.pow( (currentZ *
getStandardDeviation(waitingTimesIQR) / getMean(waitingTimesIQR) / acceptedPercentualError), 2.0);
}
}
while( (double) (i - indexesToPurge.size() ) <= ( Math.max(neededSampleSizeOutflows,
neededSampleSizeWaitingTimes) ) );
recordSimulationDemands.addLast( (double) demandaDeSimulacao);
recordOutflows.addLast(getMean(outflowsIQR));
recordWaitingTimes.addLast(getMean(waitingTimesIQR));

//trace summary of simulation round
println("B ;" + demandaDeSimulacao + ";" + ES_resources[0] + ";" + ES_resources[1] + ";" +
ES_resources[2] + ";" + i + ";" +
    recordOutflows.getLast() + ";" + recordWaitingTimes.getLast() + ";" +
acceptedPercentualError + ";" +
    currentZ * getStandardDeviation(waitingTimesIQR) / getMean(waitingTimesIQR) /
Math.sqrt(waitingTimesIQR.size()) + ";" +
    currentZ * getStandardDeviation(outflowsIQR) / getMean(outflowsIQR) /
Math.sqrt(outflowsIQR.size() ) + ";" +
    ( (double) indexesToPurge.size()/ (double) waitingTimes.size() ) + ";" +
setValuesPlusOne(indexesToPurge) );

```

```

        currentWaitingTime = recordWaitingTimes.getLast();
    }

    if(diffToThreshold * (currentWaitingTime - threshold) <= 0) crossedThreshold = true;
}
stepDemandaDeSimulacao = stepDemandaDeSimulacao/(-2);
}
traceln("-----End of procedure!-----");
traceln("Duration of procedure: " + (System.currentTimeMillis() - timeBegginingProcedure) + " miliseconds");
traceln("Simulated demands: " + recordSimulationDemands);
traceln("Respective outflows: " + recordOutflows);
traceln("Respective AWTs: " + recordWaitingTimes);
traceln("System capacity is " + recordOutflows.getLast() + " containers, related to a waiting time of " +
recordWaitingTimes.getLast() + " hours.");

```

### Additional class code

//Methods for getting mean value, standard deviation and closest value to a reference.  
//All these methods are only applicable in LinkedList of double values

```

public static double getMean(LinkedList<Double> linkedList){
    int nElements = linkedList.size();
    if(nElements == 0){
        return -1;
    }

    double sumElements = 0.0;
    for (int i=0; i< nElements; i++){
        sumElements += linkedList.get(i);
    }
    return sumElements / (double) nElements;
}

public static double getStandardDeviation(LinkedList<Double> linkedList){
    int nElements = linkedList.size();
    if(nElements < 2){
        return -1;
    }
    double meanElements = getMean(linkedList);
    double sumDiffSquare = 0.0;

    for(int i=0; i < nElements; i++){
        sumDiffSquare += Math.pow( (linkedList.get(i) - meanElements), 2);
    }

    return Math.sqrt(sumDiffSquare / (double) (nElements - 1) );
}

public static LinkedList<Integer> setValuesPlusOne(LinkedList<Integer> list){
    //inicialização evitando bugs do anylogic
    LinkedList<Integer> _list = new LinkedList<Integer>();

```

```

_list.addAll(list);

if(_list.size()==0) return list;

for(int i = 0; i < _list.size(); i++){
    _list.set(i, (list.get(i) + 1) );
}
return _list;
}
//-----

public static LinkedList<Double> listAfterPurge(LinkedList<Double> evaluatedList, LinkedList<Integer>
indexesToPurge) {
    //must be bottom-top because the indexes would change otherwise
    //if i starts negative it does not even enter the loop

    //inicialização evitando bugs do anylogic
    LinkedList<Double> _evaluatedList = new LinkedList<Double>();
    LinkedList<Integer> _indexesToPurge = new LinkedList<Integer>();
    _evaluatedList.addAll(evaluatedList);
    _indexesToPurge.addAll(indexesToPurge);

    for (int i = (_indexesToPurge.size() - 1); i >= 0; i--) {
        _evaluatedList.remove( (int) _indexesToPurge.get(i));
    }
    return _evaluatedList;
}

public static LinkedList<Integer> getIndexesToPurge_IQR(LinkedList<Double> linkedList) {
    /*sort list in a copy, calculate supLimit and infLimit, and store indexes of the
    original list which have to be removed later */

    LinkedList<Integer> output = new LinkedList<Integer>();
    int n = linkedList.size();
    if(n < 2) return output;
    LinkedList<Double> auxList = new LinkedList<Double>();
    for(int i = 0; i < linkedList.size(); i++){
        auxList.add(linkedList.get(i));
    }
    Collections.sort(auxList);

    //calculate q1
    double p = 0.25;
    double q1 = 0.0;
    if(n*p % 1 == 0.0){
        q1 = ( auxList.get((int) (n*p) - 1) + auxList.get((int) (n*p) ) ) / 2.0;
    } else{
        q1 = auxList.get((int) Math.ceil(n*p) - 1 );
    }
    //calculate q3
    p = 0.75;
    double q3 = 0.0;
    if(n*p % 1 == 0.0){
        q3 = ( auxList.get((int) (n*p) - 1) + auxList.get((int) (n*p) ) ) / 2.0;
    } else{
        q3 = auxList.get((int) Math.ceil(n*p) - 1 );
    }

    double supLimit = q3 + 1.5 * (q3 - q1);

```

```

double infLimit = q1 - 1.5 * (q3 - q1);

for (int i = 0; i < n; i++) {
    double element = linkedList.get(i);
    if (element > supLimit || element < infLimit) output.add(i);
}

return output;
}

public static LinkedList<Integer> joinIndexLists(LinkedList<Integer> list1, LinkedList<Integer> list2) {
//logic is to add elements from list2 to list1, remove duplicates (from bottom to top) and return list1

    //inicialização evitando bugs do anylogic
    LinkedList<Integer> _list1 = new LinkedList<Integer>();
    LinkedList<Integer> _list2 = new LinkedList<Integer>();
    _list1.addAll(list1);
    _list2.addAll(list2);
    //

    while (_list2.size() > 0) {
        _list1.add(_list2.removeFirst());
    }
    Collections.sort(_list1);
    int size = _list1.size();
    if(size < 2) return _list1;
    for (int i = (size - 1); i > 0; i--) {
        if (_list1.get(i).equals(_list1.get(i - 1))) _list1.remove(i);
    }
    return _list1;
}

```

## APÊNDICE C –Código do procedimento de demanda (abordagem de engenharia) do método proposto

Código implementado em Java no programa AnyLogic como um custom experiment. Abaixo são inseridos o código nos campos “code” e “additional class code”.

### Code

```

/* Siglas importantes
IS = initial scenario
BS = base scenario
ES = evaluated scenario
TTT = truck turnaround time
*/

//input model parameters initial scenario
int IS_nBercos = 2;
int IS_nSlotsArmazenagem = 30000;
int IS_nPortoesCaminhoes = 6;
int demandaDeSimulacao = 250000;

//input experiment parameters
double[] thresholds = {4.8, 1.5}; //thresholds for AWT and TTT, respectively
double acceptedPercentualErrorReference = 0.05;
int initialSample = 10;
double[] zValues = {12.706, 4.303, 3.182, 2.776, 2.571, 2.447, 2.365, 2.306, 2.262, 2.228,
                    2.207, 2.179, 2.16, 2.145, 2.131, 2.12, 2.11, 2.101, 2.093, 2.086,
                    2.08, 2.074, 2.069, 2.064, 2.06, 2.056, 2.052, 2.048, 2.045, 2.042};

//search steps
int stepDemandaDeSimulacao = 50000;
int maxDemandaDeSimulacao = 1000000;
int stepBercos = 1;
int stepPortoesCaminhoes = 1;

//evaluated scenario parameters and related data structures
boolean resourceNeedsExpansion = false;
//int[] ES_resources = new int[2];
int[] BS_resources = new int[]{IS_nBercos, IS_nPortoesCaminhoes};
int[] stepResources = new int[]{stepBercos, stepPortoesCaminhoes};
double[] BS_evaluationCriterion = {Double.POSITIVE_INFINITY, Double.POSITIVE_INFINITY};
//double[] ES_evaluationCriterion = new double[2];
double BS_outflow = 0.0;
double BS_neededStorage = (double) IS_nSlotsArmazenagem;

// values are added to the following lists in the scenario evaluation procedure
LinkedList<Double> recordSimulationDemands = new LinkedList<Double>();
LinkedList<Double> recordOutflows = new LinkedList<Double>();
LinkedList<Double> recordWaitingTimes = new LinkedList<Double>();
LinkedList<Double> recordTtt = new LinkedList<Double>();
LinkedList<Double> recordNeededStorage = new LinkedList<Double>();
LinkedList<int[]> recordResourceConfigurations = new LinkedList<int[]>();

```

```

// auxiliary variables
int i = 0;
double neededSampleSizeOutflows = (double) initialSample;
double neededSampleSizeWaitingTimes = (double) initialSample;
double neededSampleSizeTtt = (double) initialSample;
LinkedList<Double> outflows = new LinkedList<Double>();
LinkedList<Double> waitingTimes = new LinkedList<Double>();
LinkedList<Double> ttt = new LinkedList<Double>();
LinkedList<Double> maxStorage = new LinkedList<Double>();
LinkedList<Integer> indexesToPurge = new LinkedList<Integer>();
LinkedList<Double> outflowsIQR = new LinkedList<Double>();
LinkedList<Double> waitingTimesIQR = new LinkedList<Double>();
LinkedList<Double> maxStorageIQR = new LinkedList<Double>();
LinkedList<Double> tttIQR = new LinkedList<Double>();
double[] acceptedPercentualError = {acceptedPercentualErrorReference, acceptedPercentualErrorReference};
double currentZ = 0.0;

//output control
long timeBegginingProcedure = System.currentTimeMillis();
traceln("Sheet A; Simulation Demand; nBerths; nTruckGates; Round index; rhoBerths; rhoGates; Outflow;
AWT; TTT; MaxStorage");
traceln("Sheet B; Simulation Demand; nBerths; nTruckGates; SampleSize; MeanOutflow; MeanAWT; Mean
TTT; SupLimStorage; " +
"RE AWT; RE outflow; RE TTT; Discard ratio; Discard indexes");
traceln("Sheet C; Simulation Demand; BS_nBerths; BS_nTruckGates; BS_nStorage; BS_MeanOutflow;
BS_MeanAWT; BS_MeanTTT");
traceln("-----Beggining of procedure!-----");

do{

//calculate BS criteria values
do
{
//SIMULATE!!
i = 0;
outflows.clear();
waitingTimes.clear();
ttt.clear();
maxStorage.clear();
neededSampleSizeOutflows = initialSample;
neededSampleSizeWaitingTimes = initialSample;
neededSampleSizeTtt = initialSample;
acceptedPercentualError[0] = acceptedPercentualErrorReference;
acceptedPercentualError[1] = acceptedPercentualErrorReference;

do {
Engine engine = createEngine();
engine.setTimeUnit( HOUR );
long seed = System.currentTimeMillis();
engine.getDefaultRandomGenerator().setSeed(seed);
engine.setSimultaneousEventsSelectionMode( Engine.EVENT_SELECTION_LIFO );
engine.setStartTime( 0.0 );
engine.setStartDate( toDate( 2019, MAY, 23, 0, 0, 0 ) );
engine.setStopTime( 10200.0 );
Main root = new Main( engine, null, null );

```

```

    root.nBercos = BS_resources[0];
    root.nPortoesCaminhoes = BS_resources[1];
    root.demandaDeSimulacao = demandaDeSimulacao;
    engine.start( root );
    engine.runFast();
    i++;
    outflows.addLast( (double) root.nContainers);
    waitingTimes.addLast(root.meanShipWaitingTime);
    ttt.addLast(root.meanTruckTurnaroundTime);
    maxStorage.addLast( (double) root.maxSlotsSimultaneouslyUsed);
    println("A ;" + demandaDeSimulacao + ";" + root.nBercos + ";" + root.nPortoesCaminhoes + ";" +
i + ";" +
        root.bercos.utilization() + ";" + root.portoesCaminhoes.utilization() + ";" +
        root.nContainers + ";" + root.meanShipWaitingTime + ";" +
root.meanTruckTurnaroundTime + ";" + root.maxSlotsSimultaneouslyUsed);
    engine.stop();

    //check if sample is ok
    if(i >= initialSample) {
        if(i > 30){
            currentZ = 1.96;
        } else {
            currentZ = zValues[i-1];
        }
        indexesToPurge.clear();
        outflowsIQR.clear();
        waitingTimesIQR.clear();
        tttIQR.clear();
        indexesToPurge.addAll(joinIndexLists(joinIndexLists(getIndexesToPurge_IQR(waitingTimes),
getIndexesToPurge_IQR(outflows)), getIndexesToPurge_IQR(ttt)));
        outflowsIQR.addAll(listAfterPurge(outflows, indexesToPurge) );
        waitingTimesIQR.addAll(listAfterPurge(waitingTimes, indexesToPurge) );
        tttIQR.addAll(listAfterPurge(ttt, indexesToPurge));

        acceptedPercentualError[0] = Math.max(acceptedPercentualErrorReference, (thresholds[0] -
getMean(waitingTimesIQR))/getMean(waitingTimesIQR));
        acceptedPercentualError[1] = Math.max(acceptedPercentualErrorReference, (thresholds[1] -
getMean(tttIQR))/getMean(tttIQR));
        //formula was adapted because the logic relates only to values below threshold.
        Otherwise error must be acceptedPercentualErrorReference

        neededSampleSizeOutflows = Math.pow( (currentZ * getStandardDeviation(outflowsIQR) /
getMean(outflowsIQR) / Math.max(acceptedPercentualError[0], acceptedPercentualError[1])), 2.0);
        neededSampleSizeWaitingTimes = Math.pow( (currentZ *
getStandardDeviation(waitingTimesIQR) / getMean(waitingTimesIQR) / acceptedPercentualError[0]), 2.0);
        neededSampleSizeTtt = Math.pow( (currentZ * getStandardDeviation(tttIQR) / getMean(tttIQR) /
acceptedPercentualError[1]), 2.0);
    }
}
while( (double) (i - indexesToPurge.size() ) <= Math.max(neededSampleSizeOutflows,
Math.max(neededSampleSizeWaitingTimes, neededSampleSizeTtt) ) );
recordSimulationDemands.addLast( (double) demandaDeSimulacao);
recordOutflows.addLast(getMean(outflowsIQR));
recordWaitingTimes.addLast(getMean(waitingTimesIQR));
recordTtt.addLast(getMean(tttIQR));
BS_evaluationCriterion[0] = recordWaitingTimes.getLast();
BS_evaluationCriterion[1] = recordTtt.getLast();
recordNeededStorage.addLast(getSupLim_IQR(maxStorage));
recordResourceConfigurations.addLast(BS_resources);

```

```

        println("B ;" + demandaDeSimulacao + ";" + BS_resources[0] + ";" + BS_resources[1] + ";" + i + ";" +
            recordOutflows.getLast() + ";" + recordWaitingTimes.getLast() + ";" + recordTtt.getLast() + ";" +
            recordNeededStorage.getLast() + ";" +
            currentZ * getStandardDeviation(waitingTimesIQR) / getMean(waitingTimesIQR) /
Math.sqrt(waitingTimesIQR.size()) + ";" +
            currentZ * getStandardDeviation(outflowsIQR) / getMean(outflowsIQR) /
Math.sqrt(outflowsIQR.size() ) + ";" +
            currentZ * getStandardDeviation(tttIQR) / getMean(tttIQR) / Math.sqrt(tttIQR.size() ) + ";" +
            ( (double) indexesToPurge.size()/ (double) waitingTimes.size() ) + ";" +
setValuesPlusOne(indexesToPurge) );

//verification of expansion need and resource increasing
resourceNeedsExpansion = false;
for (int j = 0; j < BS_resources.length; j++){
    if(BS_evaluationCriterion[j] > thresholds[j]){
        BS_resources[j] += stepResources[j];
        resourceNeedsExpansion = true;
    }
}
}
while (resourceNeedsExpansion);

if(recordNeededStorage.getLast() > BS_neededStorage) BS_neededStorage =
recordNeededStorage.getLast();

println("C ;" + demandaDeSimulacao + ";" + BS_resources[0] + ";" + BS_resources[1] + ";" +
BS_neededStorage + ";" + recordOutflows.getLast() + ";" +
    BS_evaluationCriterion[0] + ";" + BS_evaluationCriterion[1]);
demandaDeSimulacao += stepDemandaDeSimulacao;
} while(recordOutflows.getLast() < maxDemandaDeSimulacao);

println("-----End of procedure!-----");
println("Duration of procedure: " + (double) (System.currentTimeMillis() - timeBegginigProcedure)/1000 + "
seconds");
println("Simulated demands: " + recordSimulationDemands);
println("Respective outflows: " + recordOutflows);
println("Respective AWTs: " + recordWaitingTimes);
println("Respective resource configurations: ");
for(int j = 0; j<recordResourceConfigurations.size(); j++){
    trace(Arrays.toString(recordResourceConfigurations.get(j)) + ", ");
}
}

```

### Additional class code

```

public static double getSupLim_IQR(LinkedList<Double> linkedList) {

    int n = linkedList.size();
    if (n==0) return -1.0;
    if(n == 1) return linkedList.getLast();
    LinkedList<Double> auxList = new LinkedList<Double>();
}

```

```

    for(int i = 0; i < linkedList.size(); i++){
        auxList.add(linkedList.get(i));
    }
    Collections.sort(auxList);

    //calculate q1
    double p = 0.25;
    double q1 = 0.0;
    if(n*p % 1 == 0.0){
        q1 = ( auxList.get((int) (n*p) - 1) + auxList.get((int) (n*p) ) ) / 2.0;
    } else{
        q1 = auxList.get((int) Math.ceil(n*p) - 1 );
    }
    //calculate q3
    p = 0.75;
    double q3 = 0.0;
    if(n*p % 1 == 0.0){
        q3 = ( auxList.get((int) (n*p) - 1) + auxList.get((int) (n*p) ) ) / 2.0;
    } else{
        q3 = auxList.get((int) Math.ceil(n*p) - 1 );
    }

    double supLimit = q3 + 1.5 * (q3 - q1);

    return supLimit;
}

public static int getIndexOfMinimumValue(double[] list){
    int listSize = list.length;
    if(listSize==0) return -1;
    double minimumValue = Double.POSITIVE_INFINITY;
    int indexOfMinimumValue = -1;

    for(int i = 0; i < listSize; i++){
        double currentValue = list[i];
        if(currentValue <= minimumValue) {
            minimumValue = currentValue;
            indexOfMinimumValue = i;
        }
    }

    return indexOfMinimumValue;
}

public static double getMean(LinkedList<Double> linkedList){
    int nElements = linkedList.size();
    if(nElements == 0){
        return -1;
    }

    double sumElements = 0.0;
    for (int i=0; i< nElements; i++){
        sumElements += linkedList.get(i);
    }
    return sumElements / (double) nElements;
}

public static double getStandardDeviation(LinkedList<Double> linkedList){

```

```

int nElements = linkedList.size();
if(nElements < 2){
    return -1;
}
double meanElements = getMean(linkedList);
double sumDiffSquare = 0.0;

for(int i=0; i < nElements; i++){
    sumDiffSquare += Math.pow( (linkedList.get(i) - meanElements), 2);
}

return Math.sqrt(sumDiffSquare / (double) (nElements - 1) );
}

public static LinkedList<Integer> setValuesPlusOne(LinkedList<Integer> list){
    //inicialização evitando bugs
    LinkedList<Integer> _list = new LinkedList<Integer>();
    _list.addAll(list);

    if(_list.size()==0) return list;

    for(int i = 0; i < _list.size(); i++){
        _list.set(i, (list.get(i) + 1) );
    }
    return _list;
}
//-----

public static LinkedList<Double> listAfterPurge(LinkedList<Double> evaluatedList, LinkedList<Integer>
indexesToPurge) {
    //must be bottom-top because the indexes would change otherwise
    //if i starts negative it does not even enter the loop

    //inicialização evitando bugs do anylogic
    LinkedList<Double> _evaluatedList = new LinkedList<Double>();
    LinkedList<Integer> _indexesToPurge = new LinkedList<Integer>();
    _evaluatedList.addAll(evaluatedList);
    _indexesToPurge.addAll(indexesToPurge);

    for (int i = (_indexesToPurge.size() - 1); i >= 0; i--) {
        _evaluatedList.remove( (int) _indexesToPurge.get(i));
    }
    return _evaluatedList;
}

public static LinkedList<Integer> getIndexesToPurge_IQR(LinkedList<Double> linkedList) {
    /*sort list in a copy, calculate supLimit and infLimit, and store indexes of the
    original list which have to be removed later */

    LinkedList<Integer> output = new LinkedList<Integer>();
    int n = linkedList.size();
    if(n < 2) return output;
    LinkedList<Double> auxList = new LinkedList<Double>();
    for(int i = 0; i < linkedList.size(); i++){
        auxList.add(linkedList.get(i));
    }
}

```

```

Collections.sort(auxList);

//calculate q1
double p = 0.25;
double q1 = 0.0;
if(n*p % 1 == 0.0){
    q1 = ( auxList.get((int) (n*p) - 1) + auxList.get((int) (n*p) ) ) / 2.0;
} else{
    q1 = auxList.get((int) Math.ceil(n*p) - 1 );
}
//calculate q3
p = 0.75;
double q3 = 0.0;
if(n*p % 1 == 0.0){
    q3 = ( auxList.get((int) (n*p) - 1) + auxList.get((int) (n*p) ) ) / 2.0;
} else{
    q3 = auxList.get((int) Math.ceil(n*p) - 1 );
}

double supLimit = q3 + 1.5 * (q3 - q1);
double infLimit = q1 - 1.5 * (q3 - q1);

for (int i = 0; i < n; i++) {
    double element = linkedList.get(i);
    if (element > supLimit || element < infLimit) output.add(i);
}

return output;
}

public static LinkedList<Integer> joinIndexLists(LinkedList<Integer> list1, LinkedList<Integer> list2) {
//logic is to add elements from list2 to list1, remove duplicates (from bottom to top) and return list1

    //inicialização evitando bugs do anylogic
    LinkedList<Integer> _list1 = new LinkedList<Integer>();
    LinkedList<Integer> _list2 = new LinkedList<Integer>();
    _list1.addAll(list1);
    _list2.addAll(list2);
    //

    while (_list2.size() > 0) {
        _list1.add(_list2.removeFirst());
    }
    Collections.sort(_list1);
    int size = _list1.size();
    if(size < 2) return _list1;
    for (int i = (size - 1); i > 0; i--) {
        if (_list1.get(i).equals(_list1.get(i - 1) )) _list1.remove(i);
    }
    return _list1;
}
}

```

## APÊNDICE D – Código do procedimento de demanda (abordagem econômica) do método proposto

Código implementado em Java no programa AnyLogic como um custom experiment. Abaixo são inseridos o código nos campos “code”, “imports section” e “additional class code”.

### Code

```

/* Siglas importantes
IS = initial scenario
BS = base scenario
ES = evaluated scenario
TTT = truck turnaround time
*/

//input model parameters initial scenario
int IS_nBercos = 2;
int IS_nSlotsArmazenagem = 30000;
int IS_nPortoesCaminhoes = 6;
int demandaDeSimulacao = 250000;

//input experiment parameters
double acceptedPercentualErrorReference = 0.002;
int initialSample = 10;
double[] zValues = {12.706, 4.303, 3.182, 2.776, 2.571, 2.447, 2.365, 2.306, 2.262, 2.228,
                    2.207, 2.179, 2.16, 2.145, 2.131, 2.12, 2.11, 2.101, 2.093, 2.086,
                    2.08, 2.074, 2.069, 2.064, 2.06, 2.056, 2.052, 2.048, 2.045, 2.042};

//search steps
int stepDemandaDeSimulacao = 50000;
int maxDemandaDeSimulacao = 1000000;
int stepBercos = 1;
int stepPortoesCaminhoes = 1;

//cost parameters
double costExpansion_newBerth = 8000000.0;
double costExpansion_newGate = 80000.0;
double costTime_ship = 2279.0;
double costTime_container = 0.518;
double costTime_truck = 32.15;

//evaluated scenario parameters and related data structures
boolean resourceNeedsExpansion = false;
int[] stepResources = new int[]{stepBercos, stepPortoesCaminhoes};
int[] ES_resources = new int[]{IS_nBercos, IS_nPortoesCaminhoes};
int[] BS_resources = new int[]{IS_nBercos, IS_nPortoesCaminhoes};
double BS_neededStorage = (double) IS_nSlotsArmazenagem;
double[] ES_neededStorage = {IS_nSlotsArmazenagem, IS_nSlotsArmazenagem};
double[] unitCostsTime = new double[]{costTime_ship, costTime_container, costTime_truck};
double[] costExpansionVector = new double[]{costExpansion_newBerth, costExpansion_newGate};
double costCurrentExpansion = 0.0;
double BS_outflow = 0.0;

```

```

double[] ES_outflows = new double[2];
double BS_costPerCtrn = 0.0;
double[] ES_costPerCtrn = new double[2];

// values are added to the following lists in the scenario evaluation procedure
LinkedList<Double> recordSimulationDemands = new LinkedList<Double>();
LinkedList<Double> recordOutflows = new LinkedList<Double>();
LinkedList<Double> recordCosts = new LinkedList<Double>();
LinkedList<Double> recordCostsPerOutflow = new LinkedList<Double>();
LinkedList<Double> recordNeededStorage = new LinkedList<Double>();
LinkedList<int[]> recordResourceConfigurations = new LinkedList<int[]>();

// auxiliary variables
int i = 0;
double neededSampleSizeOutflows = (double) initialSample;
double neededSampleSizeCosts = (double) initialSample;
LinkedList<Double> outflows = new LinkedList<Double>();
LinkedList<Double> costs = new LinkedList<Double>();
LinkedList<Double> maxStorage = new LinkedList<Double>();
LinkedList<Integer> indexesToPurge = new LinkedList<Integer>();
LinkedList<Double> outflowsIQR = new LinkedList<Double>();
LinkedList<Double> costsIQR = new LinkedList<Double>();
LinkedList<Double> maxStorageIQR = new LinkedList<Double>();
LinkedList<Double> tttIQR = new LinkedList<Double>();
double acceptedPercentualError = acceptedPercentualErrorReference;
double currentZ = 0.0;

//output control
long timeBegginingProcedure = System.currentTimeMillis();
writeln("Sheet A; Simulation Demand; nBerths; nTruckGates; Round index; rhoBerths; rhoGates; Outflow;
MaxStorage; " +
        "TotalCosts; ShipTimeCosts; ContainerTimeCosts; TruckTimeCosts; AWT_AST; AWTships; TTT");
writeln("Sheet B; Simulation Demand; nBerths; nTruckGates; SampleSize; MeanOutflow; MeanCosts;
SupLimStorage; " +
        "RE Costs; RE outflow; Discard ratio; Discard indexes");
writeln("Sheet C; Simulation Demand; BS_nBerths; BS_nTruckGates; BS_nStorage; BS_MeanOutflow;
BS_MeanCostsPerCtrn");
traceln("-----Beggining of procedure!-----");

do{

    boolean BSnotSimulated = true;

    //calculate BS criteria values
    do
    {
        for(int j = 0; j < ES_resources.length; j++){
            //assigning resource configuration of the simulation round
            ES_resources = Arrays.copyOf(BS_resources, BS_resources.length);
            if(BSnotSimulated){
                j = -1;
                costCurrentExpansion = 0.0;
            } else{
                ES_resources[j] += stepResources[j];
                costCurrentExpansion = costExpansionVector[j]*stepResources[j];
            }
        }

        //SIMULATE!!
        i = 0;

```

```

outflows.clear();
costs.clear();
maxStorage.clear();
neededSampleSizeOutflows = initialSample;
neededSampleSizeCosts = initialSample;
acceptedPercentualError = acceptedPercentualErrorReference;

do {
    Engine engine = createEngine();
    engine.setTimeUnit( HOUR );
    long seed = System.currentTimeMillis();
    engine.getDefaultRandomGenerator().setSeed(seed);
    engine.setSimultaneousEventsSelectionMode( Engine.EVENT_SELECTION_LIFO );
    engine.setStartTime( 0.0 );
    engine.setStartDate( toDate( 2019, MAY, 23, 0, 0, 0 ) );
    engine.setStopTime( 10200.0 );
    Main root = new Main( engine, null, null );
        root.nBercos = ES_resources[0];
        root.nPortoesCaminhoes = ES_resources[1];
        root.demandaDeSimulacao = demandaDeSimulacao;
    engine.start( root );
    engine.runFast();
    i++;
    costs.addLast(root.sumShipTurnaroundTime*unitCostsTime[0] +
root.sumContainerTurnaroundTime*unitCostsTime[1] +
        root.sumTruckTurnaroundTime*unitCostsTime[2] + costCurrentExpansion);
    outflows.addLast( (double) root.nContainers);
    maxStorage.addLast( (double) root.maxSlotsSimultaneouslyUsed);
    writeln("A ;" + demandaDeSimulacao + ";" + root.nBercos + ";" + root.nPortoesCaminhoes +
";" + i + ";" +
        root.bercos.utilization() + ";" + root.portoesCaminhoes.utilization() + ";" +
        root.nContainers + ";" + root.maxSlotsSimultaneouslyUsed + ";" + costs.getLast() + ";"
+
        root.sumShipTurnaroundTime*unitCostsTime[0] + ";" +
root.sumContainerTurnaroundTime*unitCostsTime[1] + ";" +
        root.sumTruckTurnaroundTime*unitCostsTime[2] + ";" +
        root.AWT_AST + ";" + root.meanShipWaitingTime + ";" +
root.meanTruckTurnaroundTime);
    engine.stop();

    //check if sample is ok
    if(i >= initialSample) {
        if(i > 30){
            currentZ = 1.96;
        } else {
            currentZ = zValues[i-1];
        }
        indexesToPurge.clear();
        outflowsIQR.clear();
        costsIQR.clear();
        indexesToPurge.addAll(joinIndexLists(getIndexesToPurge_IQR(costs),
getIndexesToPurge_IQR(outflows)));
        outflowsIQR.addAll(listAfterPurge(outflows, indexesToPurge) );
        costsIQR.addAll(listAfterPurge(costs, indexesToPurge) );

        if(BSnotSimulated){

```

```

        acceptedPercentualError = acceptedPercentualErrorReference;
    } else{
        acceptedPercentualError = Math.max(acceptedPercentualErrorReference, (
(getMean(costsIQR)/getMean(outflowsIQR) - BS_costPerCtnr)/BS_costPerCtnr );
        //formula was adapted because the logic relates only to values below threshold.
        Otherwise error must be acceptedPercentualErrorReference
    }
        neededSampleSizeCosts = Math.pow( (currentZ * getStandardDeviation(costsIQR) /
getMean(costsIQR) / acceptedPercentualError), 2.0);
        neededSampleSizeOutflows = Math.pow( (currentZ * getStandardDeviation(outflowsIQR) /
getMean(outflowsIQR) / acceptedPercentualError), 2.0);
    }
}
while( (double) (i - indexesToPurge.size() ) <= Math.max(neededSampleSizeOutflows,
neededSampleSizeCosts ) );

//register values of the simulation ruond
recordSimulationDemands.addLast( (double) demandaDeSimulacao);
recordOutflows.addLast(getMean(outflowsIQR));
recordCosts.addLast(getMean(costsIQR));
recordCostsPerOutflow.addLast(recordCosts.getLast()/recordOutflows.getLast());
recordNeededStorage.addLast(getSupLim_IQR(maxStorage));

if(BSnotSimulated){
    if(BS_neededStorage < recordNeededStorage.getLast()) BS_neededStorage =
recordNeededStorage.getLast();
    BS_costPerCtnr = recordCostsPerOutflow.getLast();
    BS_outflow = recordOutflows.getLast();
} else{
    ES_neededStorage[j] = recordNeededStorage.getLast();
    ES_costPerCtnr[j] = recordCostsPerOutflow.getLast();
    ES_outflows[j] = recordOutflows.getLast();
}
recordResourceConfigurations.addLast(ES_resources);

writeln("B ;" + demandaDeSimulacao + ";" + ES_resources[0] + ";" + ES_resources[1] + ";" + i + ";"
+
    recordOutflows.getLast() + ";" + recordCosts.getLast() + ";" +
    recordNeededStorage.getLast() + ";" +
    currentZ * getStandardDeviation(costsIQR) / getMean(costsIQR) / Math.sqrt(costsIQR.size())
+ ";" +
    currentZ * getStandardDeviation(outflowsIQR) / getMean(outflowsIQR) /
Math.sqrt(outflowsIQR.size() ) + ";" +
    ( (double) indexesToPurge.size()/ (double) costs.size() ) + ";" +
setValuesPlusOne(indexesToPurge) );

    BSnotSimulated = false;
}
//verification of expansion need and change of BS parameters (except demand)

int k = getIndexOfMinimumValue(ES_costPerCtnr);
if(BS_costPerCtnr > (1 + acceptedPercentualErrorReference) * ES_costPerCtnr[k]){
    if(BS_neededStorage < ES_neededStorage[k]) BS_neededStorage = ES_neededStorage[k];
    BS_costPerCtnr = ES_costPerCtnr[k];
    BS_outflow = ES_outflows[k];
    BS_resources[k] += stepResources[k];
    resourceNeedsExpansion = true;
} else{

```

```

        resourceNeedsExpansion = false;
    }
}
while (resourceNeedsExpansion);

    writeln("C ;" + demandaDeSimulacao + ";" + BS_resources[0] + ";" + BS_resources[1] + ";" +
BS_neededStorage + ";" + BS_outflow + ";" +
        BS_costPerCtrn );
    demandaDeSimulacao += stepDemandaDeSimulacao;

} while(recordOutflows.getLast() < maxDemandaDeSimulacao);

writeln("-----End of procedure!-----");
writeln("Duration of procedure: " + (double) (System.currentTimeMillis() - timeBegginigProcedure)/1000 + "
seconds");
writeln("Simulated demands: " + recordSimulationDemands);
writeln("Respective outflows: " + recordOutflows);
writeln("Respective costs: " + recordCosts);
writeln("Respective resource configurations: ");
    for(int j = 0; j<recordResourceConfigurations.size(); j++){
        trace(Arrays.toString(recordResourceConfigurations.get(j)) + ", ");
    }
}

```

### Imports section

```

import java.nio.file.Files;
import java.nio.file.Paths;
import java.nio.file.StandardOpenOption;
import java.io.IOException;

```

### Additional class code

```

private static void writeln(String data) {
    writeln(data);
    data += System.lineSeparator();
    try {
        Files.write(Paths.get("C:\\Users\\Yuri\\Documents\\outputExperiment_currentTry.txt"), data.getBytes(),
StandardOpenOption.APPEND);
    } catch (IOException e) {
        e.printStackTrace();
    }
}

public static double getSupLim_IQR(LinkedList<Double> linkedList) {

    int n = linkedList.size();
    if (n==0) return -1.0;
    if(n == 1) return linkedList.getLast();
    LinkedList<Double> auxList = new LinkedList<Double>();
    for(int i = 0; i < linkedList.size(); i++){
        auxList.add(linkedList.get(i));
    }
    Collections.sort(auxList);
}

```

```

//calculate q1
double p = 0.25;
double q1 = 0.0;
if(n*p % 1 == 0.0){
    q1 = ( auxList.get((int) (n*p) - 1) + auxList.get((int) (n*p) ) ) / 2.0;
} else{
    q1 = auxList.get((int) Math.ceil(n*p) - 1 );
}
//calculate q3
p = 0.75;
double q3 = 0.0;
if(n*p % 1 == 0.0){
    q3 = ( auxList.get((int) (n*p) - 1) + auxList.get((int) (n*p) ) ) / 2.0;
} else{
    q3 = auxList.get((int) Math.ceil(n*p) - 1 );
}

double supLimit = q3 + 1.5 * (q3 - q1);

return supLimit;
}

```

```

public static int getIndexOfMinimumValue(double[] list){
    int listSize = list.length;
    if(listSize==0) return -1;
    double minimumValue = Double.POSITIVE_INFINITY;
    int indexOfMinimumValue = -1;

    for(int i = 0; i < listSize; i++){
        double currentValue = list[i];
        if(currentValue <= minimumValue) {
            minimumValue = currentValue;
            indexOfMinimumValue = i;
        }
    }

    return indexOfMinimumValue;
}

```

```

public static double getMean(LinkedList<Double> linkedList){
    int nElements = linkedList.size();
    if(nElements == 0){
        return -1;
    }

    double sumElements = 0.0;
    for (int i=0; i< nElements; i++){
        sumElements += linkedList.get(i);
    }
    return sumElements / (double) nElements;
}

```

```

public static double getStandardDeviation(LinkedList<Double> linkedList){
    int nElements = linkedList.size();
    if(nElements < 2){
        return -1;
    }
}

```

```

double meanElements = getMean(linkedList);
double sumDiffSquare = 0.0;

for(int i=0; i < nElements; i++){
    sumDiffSquare += Math.pow( (linkedList.get(i) - meanElements), 2);
}

return Math.sqrt(sumDiffSquare / (double) (nElements - 1) );
}

public static LinkedList<Integer> setValuesPlusOne(LinkedList<Integer> list){
    //inicialização evitando bugs do anylogic
    LinkedList<Integer> _list = new LinkedList<Integer>();
    _list.addAll(list);

    if(_list.size()==0) return list;

    for(int i = 0; i < _list.size(); i++){
        _list.set(i, (list.get(i) + 1) );
    }
    return _list;
}
//-----

public static LinkedList<Double> listAfterPurge(LinkedList<Double> evaluatedList, LinkedList<Integer>
indexesToPurge) {
    //must be bottom-top because the indexes would change otherwise
    //if i starts negative it does not even enter the loop

    //inicialização evitando bugs do anylogic
    LinkedList<Double> _evaluatedList = new LinkedList<Double>();
    LinkedList<Integer> _indexesToPurge = new LinkedList<Integer>();
    _evaluatedList.addAll(evaluatedList);
    _indexesToPurge.addAll(indexesToPurge);

    for (int i = (_indexesToPurge.size() - 1); i >= 0; i--) {
        _evaluatedList.remove( (int) _indexesToPurge.get(i));
    }
    return _evaluatedList;
}

public static LinkedList<Integer> getIndexesToPurge_IQR(LinkedList<Double> linkedList) {
    /*sort list in a copy, calculate supLimit and infLimit, and store indexes of the
    original list which have to be removed later */

    LinkedList<Integer> output = new LinkedList<Integer>();
    int n = linkedList.size();
    if(n < 2) return output;
    LinkedList<Double> auxList = new LinkedList<Double>();
    for(int i = 0; i < linkedList.size(); i++){
        auxList.add(linkedList.get(i));
    }
    Collections.sort(auxList);

    //calculate q1
    double p = 0.25;

```

```

double q1 = 0.0;
if(n*p % 1 == 0.0){
    q1 = ( auxList.get((int) (n*p) - 1) + auxList.get((int) (n*p) ) ) / 2.0;
} else{
    q1 = auxList.get((int) Math.ceil(n*p) - 1 );
}
//calculate q3
p = 0.75;
double q3 = 0.0;
if(n*p % 1 == 0.0){
    q3 = ( auxList.get((int) (n*p) - 1) + auxList.get((int) (n*p) ) ) / 2.0;
} else{
    q3 = auxList.get((int) Math.ceil(n*p) - 1 );
}

double supLimit = q3 + 1.5 * (q3 - q1);
double infLimit = q1 - 1.5 * (q3 - q1);

for (int i = 0; i < n; i++) {
    double element = linkedList.get(i);
    if (element > supLimit || element < infLimit) output.add(i);
}

return output;
}

public static LinkedList<Integer> joinIndexLists(LinkedList<Integer> list1, LinkedList<Integer> list2) {
//logic is to add elements from list2 to list1, remove duplicates (from bottom to top) and return list1

    //inicialização evitando bugs do anylogic
    LinkedList<Integer> _list1 = new LinkedList<Integer>();
    LinkedList<Integer> _list2 = new LinkedList<Integer>();
    _list1.addAll(list1);
    _list2.addAll(list2);
    //

    while (_list2.size() > 0) {
        _list1.add(_list2.removeFirst());
    }
    Collections.sort(_list1);
    int size = _list1.size();
    if(size < 2) return _list1;
    for (int i = (size - 1); i > 0; i--) {
        if (_list1.get(i).equals(_list1.get(i - 1) )) _list1.remove(i);
    }
    return _list1;
}
}

```