



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO

SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS PARA AVALIAÇÃO  
DA CAPACIDADE DO TRÁFEGO DE NAVIOS  
O IMPACTO DA EXPANSÃO DO TECON SALVADOR

Leonardo Ramos

Orientador: Alexandre Hering Coelho

FLORIANÓPOLIS, 2019



Leonardo Ramos

**SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS PARA AVALIAÇÃO  
DA CAPACIDADE DO TRÁFEGO DE NAVIOS**

**O IMPACTO DA EXPANSÃO DO TECON SALVADOR**

Trabalho de Conclusão de Curso  
submetido à Universidade Fede-  
ral de Santa Catarina como requi-  
sito necessário para obtenção do  
grau de Bacharel em Engenharia  
Civil.

Florianópolis, 2019

Ramos, Leonardo

Simulação de eventos discretos para avaliação da capacidade do tráfego de navios : O impacto da expansão do TECON Salvador / Leonardo Ramos ; orientador, Alexandre Hering Coelho, 2019.

53 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Capacidade de tráfego de navios. 3. Simulação de eventos discretos. I. Hering Coelho, Alexandre. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Leonardo Ramos

## **SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS PARA AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DO TRÁFEGO DE NAVIOS**

### **O impacto da expansão do TECON Salvador**

**Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, sendo aprovado em sua forma final pela banca examinadora:**

---

Orientador(a): Prof. Dr. Alexandre Hering  
Coelho  
Universidade Federal de Santa Catarina -  
UFSC

---

Profa. Dra. Luciana Rohde  
Universidade Federal de Santa Catarina -  
UFSC

---

Eng. Yuri Triska  
Universidade Federal de Santa Catarina -  
UFSC



*Este trabalho é dedicado toda pessoa que faz da ciência,  
uma obra de arte.*



# Agradecimentos

Agradeço, em especial, aos meus pais, pelo apoio e amor incondicional, fundamental para cumprir minha missão! A minha querida irmã, eterna parceira de minha vida! Aos meus avós, que sempre estarão em minhas memórias! A todos os familiares, por fazerem parte da minha vida com suas atitudes nobres! A Deus, porque para ELE e por ELE são todas as coisas!

Ao professor Dr. Eng. Alexandre Coelho Hering, pela orientação técnica e acadêmica que me concedeu e a também a banca composta pela Prof. Dra. Eng. Luciana Rohde e o Me. Eng. Yuri Triska, colega de LabTrans, pela avaliação e contribuições ao presente documento. A todo corpo docente da universidade, pelo conhecimento profundo compartilhado.

A todos os amigos do LabTrans e de RoadLabs, pelos dias de trabalho produtivo, busca por soluções, compartilhamento de técnicas, profissionalismo e organização. Aos meus amigos e colegas de classe, pela troca de experiências, ideias e conhecimentos obtidos na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), a qual tive o prazer de fazer parte.



*“Se eu vi mais longe,  
foi por estar sobre ombros de gigantes...“*  
*Sir Isaac Newton*



# Resumo

Uma simulação de eventos discretos é caracterizada por só alterar seu estado quando ocorre um determinado evento. Existem muitos exemplos de sistemas discretos, como filas em bancos, carros chegando em um posto de gasolina e, nesse estudo, navios acessando um terminal portuário. O objetivo deste trabalho é mensurar o desempenho do Terminal de Contêineres de Salvador (TECON Salvador) e estimar a capacidade de movimentação portuária (PNTC), ou seja, qual a demanda de navios que reduz os custos inerentes a manutenção e operacionalização do terminal.

**Palavras-chave:** Capacidade, Simulação a Eventos Discretos.



# Abstract

A Discrete Event Simulation (DES) its a system simulation that only changes with a event request. There are many examples for this kind of system, such as bank queue, cars incoming in a gas station and, in this case, the traffic of ships in the Port of Salvador. In this job, the objective is measure the performance of quay infrastructure of Container Terminals of Salvador (TECON Salvador) and estimate the Port Network Traffic Capacity (PTNC), that means, the outflow of ships results the minimum cost of Terminal operation.

**Keywords:** Port Network Traffic Capacity, Discrete Event Simulation.



# Listas de ilustrações

Figura 1 – Divisão modal do transporte inter-regional brasileiro . . . . .	2
Figura 2 – Variação dos custos por etapa - transporte aquaviário . . . . .	3
Figura 3 – (a): Variação dos custos do navio pelo volume de tráfego; (b): Variação dos custos do terminal portuário; (c): Composição dos custos globais .	8
Figura 4 – Exemplo de gráfico WT/ST vs. <i>Outflow</i> . . . . .	11
Figura 5 – Função contínua vs. função discreta . . . . .	13
Figura 6 – Exemplo de sistema de processamento discreto . . . . .	13
Figura 7 – Localização e zoneamento do Porto de Salvador . . . . .	16
Figura 8 – Média de precipitação e de temperaturas máximas e mínimas . . . .	17
Figura 9 – Obras de abrigo do Porto de Salvador . . . . .	18
Figura 10 – Berços do Porto de Salvador . . . . .	19
Figura 11 – 1 <sup>a</sup> etapa da expansão do TECON Salvador . . . . .	22
Figura 12 – Motivação para a expansão do TECON Salvador . . . . .	23
Figura 13 – Expansão do TECON Salvador . . . . .	23
Figura 14 – Movimentação no Porto de Salvador nos últimos 4 anos . . . . .	24
Figura 15 – Perfil de movimentação de carga no Porto de Salvador (2018) . . . .	25
Figura 16 – Fluxo operacional dos contêineres no TECON Salvador . . . . .	27
Figura 17 – Mapeamento dos processos envolvidos na operação portuária . . . .	31
Figura 18 – Guichês presentes no modelo . . . . .	32
Figura 19 – Tempos acrescentados em cada parte do processo de simulação . . . .	33
Figura 20 – Regime de filas em um ano de simulação no Berço 611 . . . . .	38
Figura 21 – Regime de filas em um ano de simulação no Berço 300 . . . . .	39
Figura 22 – Comportamento do sistema simulado para variações de demanda . . . .	41
Figura 23 – Aumento do tempo de espera em relação ao aumento do <i>outflow</i> . . . .	42
Figura 24 – Regime de filas em um ano de simulação no Berço 300 . . . . .	43
Figura 25 – Comportamento do sistema com expansão simulado para variações de demanda . . . . .	44
Figura 26 – Aumento do tempo de espera em relação ao aumento do <i>outflow</i> - Cenário com expansão . . . . .	45
Figura 27 – Distribuição dos registros de tempo entre chegadas de navios (2015-2018). III	IV
Figura 28 – Análise de distribuição dos registros de tempo entre chegadas sucessivas (2015-2018). . . . .	IV
Figura 29 – Distribuição dos registros de lotes movimentados no Berço 611 (2015-2018). IV	V
Figura 30 – Análise de distribuição dos registros de lotes no Berço 611 (2015-2018). V	V
Figura 31 – Distribuição dos registros de produtividades no Berço 611 (2015-2018). V	V

Figura 32 – Análise de distribuição dos registros de produtividades no Berço 611 (2015-2018). . . . .	VI
Figura 33 – Distribuição dos registros de tempos pré-operacionais no Berço 611 (2015-2018). . . . .	VII
Figura 34 – Análise de distribuição dos registros de tempos pré-operacionais no Berço 611 (2015-2018). . . . .	VII
Figura 35 – Distribuição dos registros de tempos pós-operacionais no Berço 611 (2015-2018). . . . .	VIII
Figura 36 – Análise de distribuição dos registros de tempos pós-operacionais no Berço 611 (2015-2018). . . . .	VIII
Figura 37 – Distribuição dos registros de lotes movimentados no Berço 300 (2015-2018). .	IX
Figura 38 – Análise de distribuição dos registros de lotes no Berço 300 (2015-2018). .	IX
Figura 39 – Distribuição dos registros de produtividades no Berço 300 (2015-2018). .	X
Figura 40 – Análise de distribuição dos registros de produtividades no Berço 300 (2015-2018). . . . .	X
Figura 41 – Distribuição dos registros de tempos pré-operacionais no Berço 300 (2015-2018). . . . .	XI
Figura 42 – Análise de distribuição dos registros de tempos pré-operacionais no Berço 300 (2015-2018). . . . .	XI
Figura 43 – Distribuição dos registros de tempos pós-operacionais no Berço 300 (2015-2018). . . . .	XII
Figura 44 – Análise de distribuição dos registros de tempos pós-operacionais no Berço 300 (2015-2018). . . . .	XII
Figura 45 – Distribuição dos registros de tempos de atracação no Berço 300 (2015- 2018). . . . .	XIII
Figura 46 – Análise de distribuição dos registros de tempos de atracação (2015-2018). .	XIII
Figura 47 – Distribuição dos registros de tempos de atracação nos demais berços do Porto de Salvador (2015-2018). . . . .	XIV
Figura 48 – Análise de distribuição dos registros de tempos de atracação nos demais berços do Porto de Salvador (2015-2018). . . . .	XIV

# **Lista de tabelas**

Tabela 1 – Preços de fretes através do Atlântico . . . . .	1
Tabela 2 – Máximas dimensões autorizadas para o Porto de Salvador . . . . .	18
Tabela 3 – Cabeços de amarração disponíveis no Porto de Salvador . . . . .	20
Tabela 4 – Equipamentos de cais e natureza operada nos trechos de cais . . . . .	20
Tabela 5 – Armazéns do Porto de Salvador . . . . .	21
Tabela 6 – Destinação operacional do Porto de Salvador de 2015 a 2018 . . . . .	26
Tabela 7 – Indicadores operacionais dos contêineres no Berço 611 . . . . .	27
Tabela 8 – Indicadores operacionais dos contêineres no Berço 300 . . . . .	28
Tabela 9 – Tempo médio de atracação de outras cargas no Berço 300 . . . . .	28
Tabela 10 – Representatividade das embarcações por tipo de carga (2015 a 2018) .	32
Tabela 11 – Exemplo dos 5 primeiros registros de simulações anuais - Berço 611 .	37
Tabela 12 – Comparação das métricas de desempenho reais e simuladas - Berço 611	38
Tabela 13 – Exemplo dos 5 primeiros registros de simulações anuais - Berço 300 .	38
Tabela 14 – Comparação das métricas de desempenho reais e simuladas - Berço 300	40
Tabela 15 – Comparação das métricas de desempenho reais e simuladas em 2017 - Berço 300 . . . . .	40
Tabela 16 – Exemplo dos 5 primeiros registros de simulações anuais com expansão - Berço 611 . . . . .	43



# **Lista de abreviaturas e siglas**

ANTAQ	Agência Nacional de Transportes Aquaviários
CODEBA	Companhia Docas do Estado da Bahia
DUV	Documento Único Virtual
IMO	<i>International Maritime Organization</i>
LabTrans	Laboratório de Transportes e Logística
LOA	<i>Length Overall</i>
MFD	<i>Macrópico Fundamental Diagram</i>
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
MTPA	Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil
NR	Nível de Redução
PIANC	<i>Permanent International Association of Navigation Congresses</i>
RTG	<i>Rubber Tyred Gantry</i>
SNP	Secretaria Nacional de Portos
TECON	Terminal de contêineres
TEU	<i>Twenty-foot Equivalent Unit</i>
TKU	Tonelada quilômetro útil
TPB	Toneladas de Porte Bruto
TUP	Terminal de Uso Privado
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
Un/uns	Unidade/Unidades



# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	<b>Objetivo</b>	4
1.1.1	Objetivos específicos	4
1.2	<b>Organização</b>	4
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>7</b>
2.1	<b>Capacidade portuária</b>	7
2.1.1	Métricas de operação	9
2.1.2	Métricas de desempenho portuário	10
2.2	<b>Simulação de eventos discretos</b>	12
<b>3</b>	<b>PORTO DE SALVADOR</b>	<b>15</b>
3.1	<b>Localização e características geográficas</b>	15
3.2	<b>Infraestrutura</b>	17
3.2.1	Projetos e expansões	21
3.3	<b>Movimentação</b>	23
3.4	<b>Operações</b>	25
3.4.1	Destinação operacional	26
3.4.2	Aspectos operacionais do TECON Salvador	26
3.4.2.1	Contêineres	27
3.4.2.2	Outras Cargas Gerais	28
3.4.3	Desempenho de cais do TECON Salvador	28
<b>4</b>	<b>MODELO DE SIMULAÇÃO</b>	<b>31</b>
4.1	<b>Simplificações do modelo</b>	34
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>37</b>
5.1	<b>Cenário atual</b>	37
5.2	<b>Comportamento do sistema atual</b>	40
5.3	<b>Cenário de expansão de infraestrutura</b>	42
5.4	<b>Comportamento do sistema com expansão</b>	43
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>47</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>49</b>

## **ANEXOS**

<b>ANEXO A – ANÁLISE DE DISTRIBUIÇÕES PARA CONSTRUÇÃO DO MODELO .....</b>	<b>III</b>
<b>ANEXO B – SCRIPT DE SIMULAÇÃO .....</b>	<b>XV</b>

# 1 Introdução

O transporte marítimo é o mais importante dos seis modos comuns de transporte de cargas, considerando também os meios de transporte por navegação de interior e cabotagem, rodoviário, ferroviário, aéreo e por dutovias, em termos de momento de transporte em toneladas quilômetro útil (TKU)<sup>1</sup> (LIGTERINGEN, 1999).

É relevante fazer a distinção entre transporte marítimo a longo curso e as modalidades de cabotagem ou navegação de interior devido à diferença competitiva entre as modalidades. No comércio intercontinental, o transporte aéreo é a única alternativa frente ao marítimo, mas para a maioria das cargas não é realmente um concorrente, devido à grande diferença nas taxas de frete conforme a Tabela 1 (LIGTERINGEN, 1999).

Tabela 1 – Preços de fretes através do Atlântico

Modo de transporte	Tempo de translado (dias)	Preço (US\$/kg)
Aéreo <i>premium</i>	2-3	3,3
Aéreo <i>standart</i>	4-7	1-1,19
Navegação de longo curso	14-28	0,13-0,26

Fonte: Ligteringen (1999)

O Brasil possui 7.367 km de linha costeira voltada para o oceano Atlântico e mais de 20.000 km de vias fluviais em condições navegáveis (ALFREDINI, 2009). Essas características, aliadas à extensão territorial brasileira e às características de ocupação populacional concentradas no litoral, corroboram para a utilização do modo aquaviário no transporte de cargas.

No entanto, embora pareça natural que a utilização da navegação de cabotagem e interior seja importante no Brasil, não é isso que ocorre. O que se observa, atualmente, é que a navegação de cabotagem transporta 11% das cargas movimentadas inter-regionalmente, mesmo sendo o meio de transporte mais atrativo, menos poluente e com menor número de acidentes comparativamente (TEIXEIRA et al., 2018).

Segundo o Plano Nacional de Logística (BRASIL, 2015), a divisão modal do transporte inter-regional de cargas no Brasil tem o modo rodoviário como mais representativo, ferroviário como segundo e a cabotagem e navegação de interior como terceiro e quarto respectivamente. A Figura 1 exibe a divisão modal.

<sup>1</sup> TKU refere-se a Toneladas por Quilômetro Útil, unidade que mensura o esforço físico de translado, resultado da multiplicação do peso pela distância percorrida, momento de transporte. Fonte: <<https://portogente.com.br/portopedia/75325-tku-toneladas-por-quilometro-util>>. Acesso em: 21 de Junho de 2019

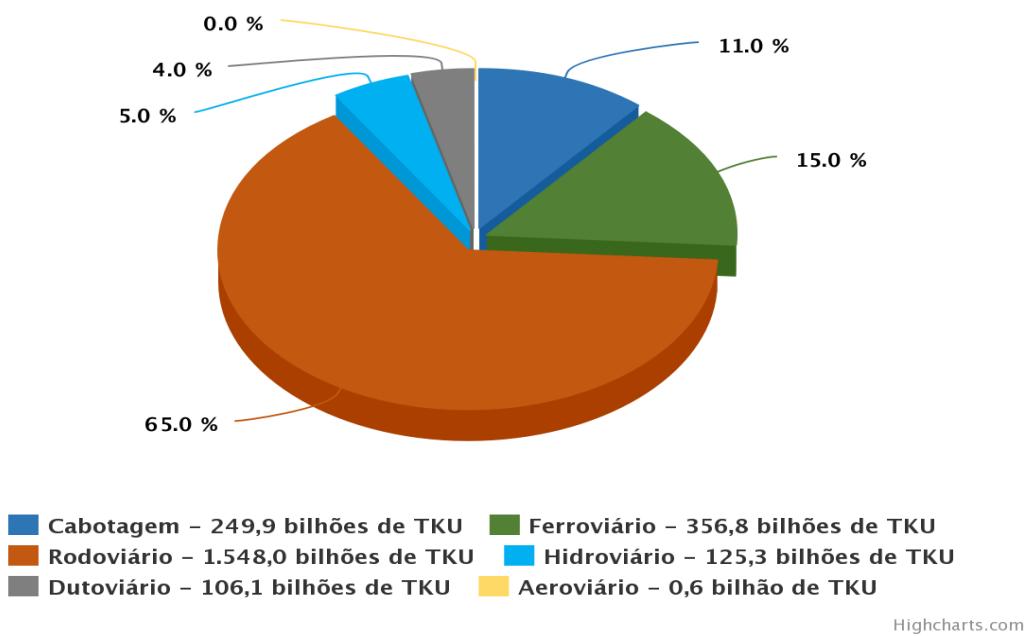


Figura 1 – Divisão modal do transporte inter-regional brasileiro

Fonte: Brasil (2015)

O transporte marítimo concorre com outros modos, sendo o transporte rodoviário o principal deles. Mais uma vez, o modo de transporte aéreo é bem diferente dos outros em termos da taxa de frete. Mas os transportes marítimos, rodoviários, ferroviários e de navegação interior estão na mesma faixa de custos e, portanto, em competição (LIGTERINGEN, 1999).

O transporte marítimo tem a desvantagem em comparação com o modo rodoviário por necessitar frequentemente de transporte adicional entre o porto e o destino final. Isso cria custos adicionais na cadeia devido à necessidade de transbordo nos terminais de origem e destino (*loading/unloading/storage*), o que aumenta o tempo e a falta de confiabilidade e diminui a atratividade do modo de transporte (LIGTERINGEN, 1999). A Figura 2 demonstra de forma esquemática o que foi citado.

Nesse sentido, o estudo do desempenho da rede de operações portuárias é a chave para uma cadeia de fornecimento eficiente, que reduz os custos inerentes ao terminal e retoma a atratividade do modo aquaviário (OLBA et al., 2015).

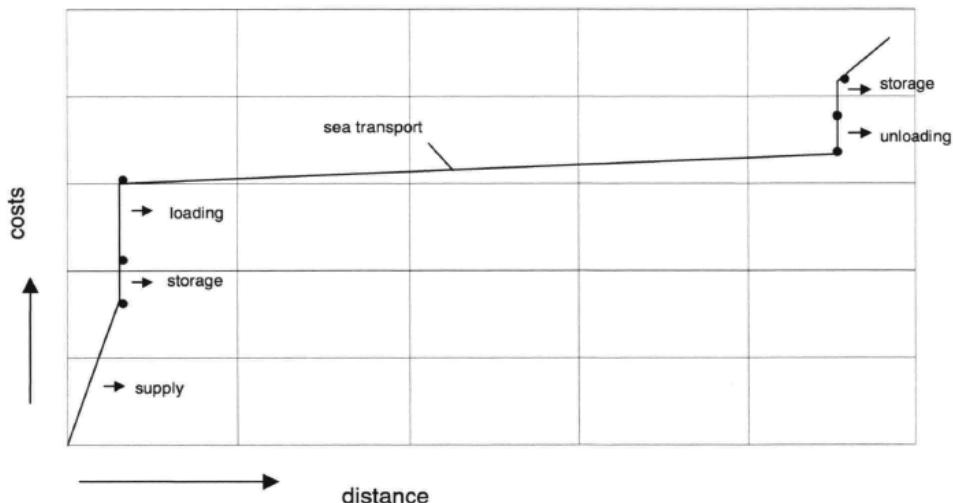


Figura 2 – Variação dos custos por etapa - transporte aquaviário

Fonte: Ligteringen (1999)

Com o crescimento da competição entre terminais de contêineres, devido principalmente às grandes taxas de crescimento nas principais rotas marítimas, os terminais são confrontados com mais e mais contêineres a serem manuseados em curto espaço de tempo a baixo custo. Portanto, são forçados a ampliar as capacidades de manuseio e se esforçarem para obter ganhos de produtividade (STAHLBOCK; VOSS, 2008).

A simulação de processos é uma ferramenta interessante para a análise e diagnóstico de alternativas e também para o processo de tomada de decisão, permitindo a manipulação, a avaliação e a validação das variáveis que compõem um sistema, ou um modelo deste, com o intuito de determinar seu comportamento (FRIGERI; BIACHI; BACKES, 2018).

A simulação permite, por meio de análises, avaliar os resultados que serão encontrados em situações reais, ampliando a compreensão do comportamento de sistemas ou mesmo avaliar as estratégias frente a fatos dos quais não se consegue vislumbrar os resultados finais ou a totalidade de suas implicações (FRIGERI; BIACHI; BACKES, 2018).

Frigeri, Biachi e Backes (2018) afirmam ainda que a necessidade de controle nasce no planejamento estratégico e operacional. Desse modo, conciliar os benefícios da simulação com as ferramentas de análise e avaliação de desempenho possibilita a minimização de riscos e a maximização de resultados.

A adoção de tecnologias digitais de gestão de informação e conhecimento de processos avançam rapidamente em todos os segmentos industriais, assim como nos terminais portuários brasileiros. Conceitos da chamada Revolução 4.0 influenciam tendências a serem aplicadas nos portos nos próximos anos. Os terminais que não acompanharem as mudanças correm risco de ficar para trás e perder competitividade (OLIVEIRA, 2018).

## 1.1 Objetivo

O objetivo do presente trabalho é avaliar a capacidade do TECON Salvador através do desenvolvimento de um modelo de simulação computacional das operações portuárias que ocorrem no Porto de Salvador.

A partir de um modelo condizente com a realidade operacional, ou seja, com métricas de operação e desempenho semelhantes as observadas, pretende-se analisar o impacto de ações de melhorias de infraestrutura que a operacionalização do projeto de expansão de cais do TECON Salvador trará.

### 1.1.1 Objetivos específicos

Considerando o desenvolvimento do trabalho e o objetivo geral apresentado, listam-se os seguintes objetivos específicos:

1. Formular um modelo de simulação que corresponda aos parâmetros operacionais reais obtidos no TECON Salvador.
2. Avaliar a capacidade do sistema real e o seu comportamento segundo uma variação do número de navios que demanda as instalações portuárias.
3. Avaliar a capacidade do sistema com a expansão do TECON realizada e o seu comportamento segundo uma variação do número de navios que demanda as instalações portuárias.

## 1.2 Organização

O presente trabalho está organizado da seguinte forma:

1. **Introdução:** Abordagem do panorama geral do modo hidroviário na matriz de transportes brasileira e abordagem da importância da utilização das simulações na assertividade da alocação de recursos.
2. **Revisão bibliográfica:** Abordagem da definição de capacidade portuária, definição das métricas operacionais para construção do modelo e das métricas de avaliação de desempenho a serem avaliadas na simulação.
3. **Porto de Salvador:** Análise das características geográficas, de movimentação e de operação do Porto de Salvador. Estudo da destinação operacional dos berços, normas de atracação, cálculo dos indicadores operacionais das movimentações portuárias.

4. **Modelo de simulação:** Descrição do modelo de simulação por eventos discretos utilizado, modelagem das métricas utilizadas para a construção do modelo, considerações para cálculo de capacidade.
5. **Resultados:** Apresentação dos resultados obtidos através da simulação para cenário atual, para cenário com expansão, avaliação do ganho de capacidade do terminal.
6. **Conclusões**



## 2 Revisão bibliográfica

Este capítulo objetiva introduzir conceitos relacionados às operações portuárias e à importância do estudo de capacidade de movimentação para a boa gestão de portos e terminais privados. Além disso, será discutida a utilização de técnicas de simulação de eventos discretos como fonte para a análise de capacidade de movimentação.

### 2.1 Capacidade portuária

No passado, a capacidade de um berço era estimada apenas através do conhecimento empírico de outros portos existentes. Assim, frequentemente era assumido que um berço destinado a carga geral possuía uma capacidade de movimentação de 100 a 150 mil toneladas/ano ou que um berço destinado a movimentação de contêineres 50 a 100 mil unidades/ano (AGERSCHOU, 1983).

Ainda segundo o autor, tais regras não necessariamente retratam a realidade. Essa definição ignora o fato da taxa de ocupação ótima do berço (porcentagem de tempo de cais ocupado que resulte nos menores custos globais para o sistema) variar de 25% considerando um simples berço para mais de 75% em cais de grandes portos. Essa capacidade, aliada a uma movimentação ótima, é função direta da taxa de ocupação do berço.

PIANC (2014) afirma que a capacidade de um terminal pode ser interpretada de três maneiras diferentes dependendo do contexto. Os três indicadores mais comuns relacionados ao termo são:

- Capacidade máxima de movimentação instantânea.
- Capacidade máxima de movimentação anual.
- Capacidade ótima de movimentação anual.

No setor de planejamento estratégico portuário considera-se a capacidade ótima de movimentação. Este ótimo se relaciona a um ótimo econômico, podendo ser avaliada conforme algum critério de nível de serviço ou diretamente com cálculos financeiros (PIANC, 2014). Assim, o termo de capacidade refere-se à medida de volume que pode ser operada por um porto ou terminal correspondendo a uma espera média das embarcações que resulte menor custo global para o sistema.

UNCTAD (1985) reafirmam a ideia do parágrafo anterior acrescentando que o custo total é determinado por dois componentes:

- Custo de manutenção da infraestrutura portuária.
- Custo de operação do navio.

UNCTAD (1985) aborda que tais custos são variáveis conforme a variação do volume de tráfego, conforme exibe a Figura 3.

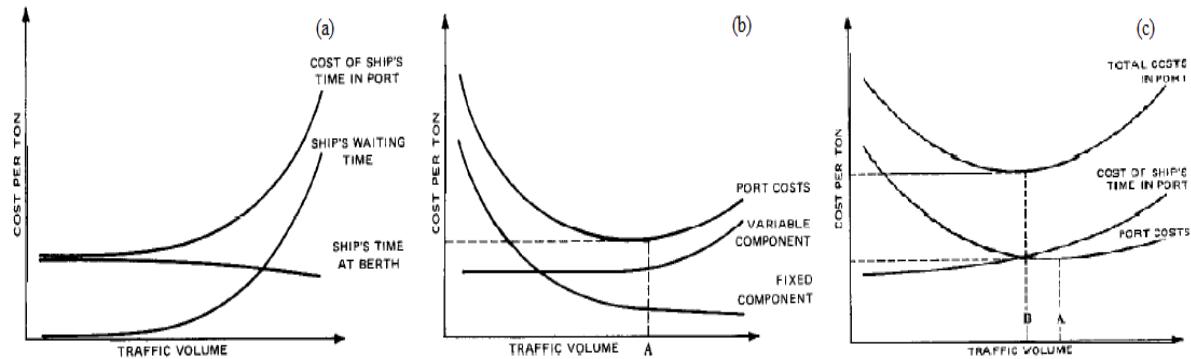


Figura 3 – (a): Variação dos custos do navio pelo volume de tráfego; (b): Variação dos custos do terminal portuário; (c): Composição dos custos globais

Fonte: UNCTAD (1985)

A análise da Figura 3 (a) permite inferir que com o aumento do tráfego de navios, os custos referentes ao tempo de estadia do navio nos portos também aumentam.

Considerando os custos do terminal, Figura 3 (b), UNCTAD (1985) afirma que podem ser divididos entre fixos e variáveis. Os custos fixos de terminal (por exemplo: implantação de cais, portêineres, pátios) tendem a ser diluídos pela maior quantidade de cargas movimentadas. Já os custos variáveis (por exemplo: mão de obra, combustível e manutenção de terminal) tendem a aumentar com o aumento do fluxo de navios.

Fazendo a composição dos custos, Figura 3 (c), busca-se avaliar o volume de tráfego que retorne esse custo mínimo para o sistema. Esse ponto de volume de tráfego caracteriza a capacidade de movimentação portuária (UNCTAD, 1985).

O contexto se torna ainda mais fundamental quando os armadores<sup>1</sup> detém a posse, arrendamento ou parceria com o terminal que movimenta, uma vez que nesse caso arcaram com os custos do terminal e das embarcações.

Groenveld (1993) aborda uma solução analítica para o cálculo de capacidade através do modelo de filas e fornece bases para a análise através de modelos computacionais de simulação.

<sup>1</sup> Transportador marítimo, proprietário dos navios e dos contêineres utilizados no transporte de mercadorias em águas nacionais ou internacionais. Fonte:<<http://www.portal-administracao.com/2014/02/armadores-no-comercio-exterior.html>>. Acesso em: 21 de junho de 2019.

“Os modelos de simulação estão se tornando cada vez mais comuns também para o planejador de usar para estabelecer o layout portuário mais favorável ou a utilização mais eficiente de instalações existentes, simulando uma situação real ou prevista” (GROENVELD, 1993).

Apesar do fato de que existem várias definições de capacidade portuária publicadas, baseadas em diferentes abordagens, como capacidade de terminal (LIGTERINGEN; VELSINK, 2012) e abordagem de gargalo (FAN; CAO, 2000), não existe uma definição padronizada e amplamente aceita de capacidade de um porto como rede hidroviária (OLBA et al., 2015). Portanto, (OLBA et al., 2015) define como capacidade:

“O máximo fluxo médio de navios que pode acessar um porto com sua específica infraestrutura, característica de frota, composição de demanda e satisfazendo condições básicas de segurança e nível de serviço” (OLBA et al., 2015).

O autor ainda afirma que para o cálculo de capacidade portuária por simulação de eventos, duas questões devem ser satisfeitas:

1. **Métricas de operação** necessárias para a construção do modelo de simulação.
2. **Métricas de desempenho** das operações afim de estimar a capacidade da rede de movimentação portuária.

Nesse sentido, primeiro avalia-se quais serão os indicadores operacionais para construção do modelo e depois quais serão as métricas obtidas do processo de simulação.

### 2.1.1 Métricas de operação

Para a construção do modelo, estuda-se o comportamento dos seguintes indicadores por carga/berço movimentado (OLBA et al., 2015; AGERSCHOU, 1983; LIGTERINGEN, 1999):

- **Lotes (L)**: Volume de mercadoria movimentado nas operações portuárias.
- **Produtividades (P)**: Fluxo médio das cargas movimentadas após o início da operação até o seu término.
- **Tempos inoperantes (TI)**: Tempos dedicados a amarração/desamarração, movimentação de pessoal e de equipamentos para realizar a operação.
- **Tempos de navegação**: Tempo dedicado a navegação e manobra do navio.

A divisão do lote pela produtividade gera o tempo de operação da embarcação que, se somado aos tempos inoperantes, gera o tempo de atracação, em inglês, *Service Time* (ST), conforme a Equação 2.1

$$ST = (L/P) + TI \quad (2.1)$$

Olba et al. (2015) afirma também a necessidade de profundo conhecimento sobre as características da área de estudo. Apesar do presente trabalho ter como objetivo simular as operações do TECON de Salvador, é necessário entender todas as características do Porto de Salvador, uma vez que a demanda de outros terminais influencia na requisição do canal de acesso, rebocadores e, portanto, na eficiência de movimentações de outros terminais, como o TECON. O capítulo 3 visa apresentar essas características.

### 2.1.2 Métricas de desempenho portuário

O desempenho portuário deve ser medido por dois tipos de indicadores, financeiros e operacionais (OLBA et al., 2015). Os principais indicadores ligados ao desempenho das operações portuárias (AGERSCHOU, 1983; LIGTERINGEN, 1999; GROENVELD, 1993; OLBA et al., 2015) se referem a:

- **Índice de ocupação ( $\rho$ ):** Porcentagem de tempo que um berço fica ocupado durante o ano.
- **Tempo médio de espera (AWT):** Média dos tempos de espera para atracar, enquanto embarcações permanecem fundeadas.
- ***Outflow:*** Fluxo de navios que demanda as instalações, em navios por unidade de tempo.

Segundo Olba et al. (2015), algumas teorias de tráfego descrevem o comportamento dos sistemas de tráfego seguindo um padrão específico. A partir de um determinado fluxo de produção de veículos, não ocorre mais o processamento instantâneo da malha com relação aos veículos adicionais, e as filas no sistema começam a se acumular. Esta é a base do *Macrópico Fundamental Diagram* (MFD) (GEROLIMINIS; DAGANZO, 2008).

O MFD mostra que se os dados de tráfego de uma malha são ampliados, ocorrerá uma relação entre o agrupamento na fila e o fluxo médio de veículos que chega na malha, por unidade de tempo. Nesse sentido, o MFD foi avaliado como um indicador de rede para avaliar acessibilidade de uma rede. Mais tarde, mais pesquisas foram feitas em relação ao MFD, e outros sistemas foram acrescentados a esse conceito de análise (KNOOP; HOOGENDOORN; LINT, 2012).

Devido à sua aplicação bem-sucedida ao tráfego de veículos nas rodovias (KNOOP; HOOGENDOORN; LINT, 2012), foram investigadas relações relevantes entre vários indicadores MFD na tentativa de desenvolver um bom estimador de capacidade portuária, em inglês, *Port Network Traffic Capacity* (PNTC). Nesse sentido, aplica-se a construção do MFD para avaliar a capacidade do sistema de tráfego de navios no Porto de Salvador (OLBA et al., 2015).

Neste caso, a relação entre o tempo de espera e o tempo de serviço para cada operação (WT/ST) se caracteriza como medida apropriada de pontualidade de serviço do terminal (OLBA et al., 2015). A Figura 4 demonstra um exemplo da análise do referido parâmetro.

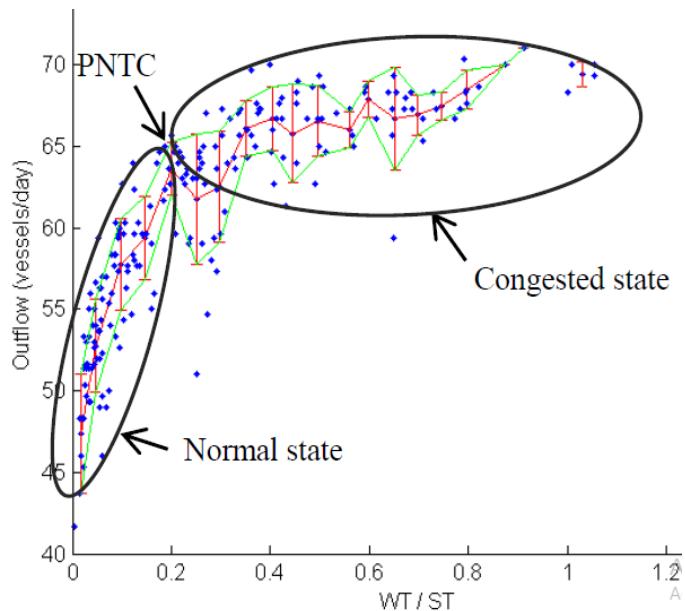


Figura 4 – Exemplo de gráfico WT/ST vs. *Outflow*

Fonte: Olba et al. (2015)

A análise gráfica da Figura 4 permite avaliar dois momentos, o primeiro regime linear (estado normal) demonstra um estado não-congestionado. O fluxo de navios aumenta até os tempos de espera começarem a aumentar devido a formação de filas (estado congestionado). Dessa forma, considera-se a capacidade do sistema o final da capacidade de absorção da rede, nas transições entre os estados normais e congestionados (OLBA et al., 2015).

Para o cálculo da capacidade, considera-se:

$$PNTC = Outflow_{PNTC} * LM \quad (2.2)$$

Como os indicadores de contêineres são calculados em unidades (uns), para melhor caracterização da produtividade (BRASIL, 2018c), a Equação 2.2 resulta na capacidade

de movimentação do sistema em uns/ano. Para a conversão de unidade para TEUs<sup>2</sup>, considera-se o fator 1,57 TEUs/un, verificado na ANTAQ (2018).

O real valor da solução ótima é, no entanto, determinado por regras específicas e pelos custos associados à espera. O uso deste indicador sozinho pode resultar em informações enganosas se uma relação de espera para serviço muito baixa é causada por uma equipe de serviço muito inefficiente, e não gargalos operacionais intrínsecos ao sistema (OLBA et al., 2015).

Ademais, Brasil (2018c) afirma que o tempo de espera admissível para navios de contêineres, já considerando os indicadores financeiros, resulta em um valor próximo a 6 horas. Esse parâmetro também será avaliado pelo sistema de simulação.

## 2.2 Simulação de eventos discretos

A simulação pode ser definida como uma técnica que possibilita estudar o comportamento de um sistema ou de um modelo, permitindo, por meio de análises, avaliar os resultados que serão encontrados em caso de variação nas situações reais, ampliando a compreensão do comportamento de sistemas ou mesmo avaliar as estratégias frente a fatos dos quais não se consegue prever a totalidade de suas implicações (FRIGERI; BIACHI; BACKES, 2018).

A simulação de eventos é considerado uma das 3 metodologias utilizadas por engenheiros industriais, gestores e pesquisadores operacionais. Usualmente chamada de "técnica do último recurso", a simulação de processos tem se tornado uma importante metodologia de resolução de problemas (BANKS, 1998).

Um sistema discreto, por definição, é um processo que se altera apenas quando ocorre um determinado evento, para todos os demais instantes, nada muda (NOGUEIRA, 2009).

A Figura 5 exemplifica a diferença entre um sistema  $F(x)$  contínuo e discreto. Note que no modelo discreto, o sistema é alterado após um evento genérico  $x_1$ .

---

<sup>2</sup> Medida padrão para transporte de contêineres equivalente a um contêiner de 20 pés de comprimento. As medidas mais comuns de contêineres são de 20 e 40 pés de comprimento (equivalente a 2 TEUs). Fonte: <<https://dictionary.cambridge.org/pt/dicionario/ingles/teu>>. Acesso em: 23 de Junho de 2019.

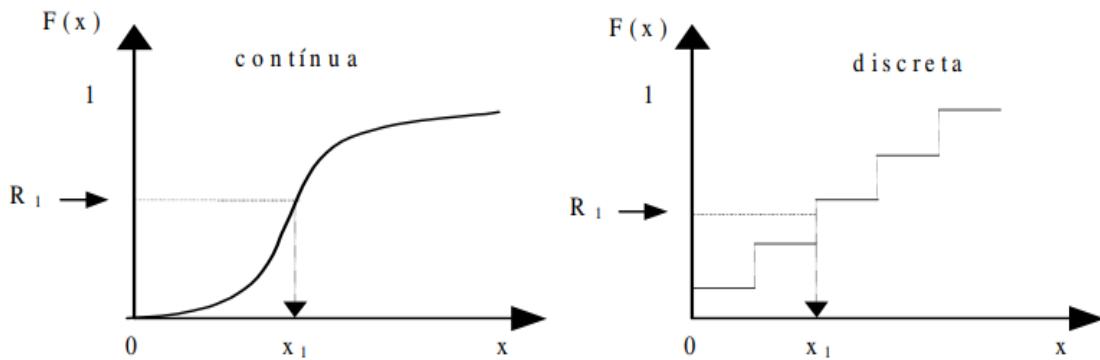


Figura 5 – Função contínua vs. função discreta

Fonte: Nogueira (2009)

Um modelo discreto também é caracterizado pela possibilidade de formação de filas (NOGUEIRA, 2009). Como exemplo, podemos citar o caso das embarcações esperando para atracar na área de fundeio ou clientes esperando para utilizar caixas eletrônicos bancários.

Banks (1998) afirma que a simulação é uma imitação das operações que ocorrem em algum processo no mundo real. Ela envolve a geração de dados fictícios para possibilitar a análise das interações entre o sistema. A Figura 6 demonstra uma simulação do processamento de um guichê bancário com chegada de clientes entre 1 e 6 minutos.

(1) Customer	(2) Time Between Arrivals	(3) Arrival Time	(4) Service Time	(5) Service Begins	(6) Service Ends	(7) Time in System	(8) Idle Time	(9) Time in Queue
1	—	0	2	0	2	2	0	0
2	5	5	2	5	7	2	3	0
3	1	6	6	7	13	7	0	1
4	10	16	5	16	21	5	3	0
5	6	22	6	22	28	6	1	0

Figura 6 – Exemplo de sistema de processamento discreto

Fonte: Banks (1998)

Em um modelo de simulação de eventos discretos, processamos chegadas aleatórias de entidades com probabilidades semelhantes as reais. São então requisitados os guichês de processamento onde a entidade demandará um *delay* do sistema. Em caso de chegadas de mais entidades com o guichê ocupado, ocorre a formação de fila. Em um sistema discreto, estamos interessados em mensurar e caracterizar o comportamento da fila com relação as chegadas das entidades (BANKS, 1998).

Nesse sentido, o SimPy é módulo em Python desenvolvido especificamente para

simulação de eventos discretos e está sob a licença do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT). Os desenvolvedores da linguagem ressaltam ainda que é importante compartilhar os modelos de simulação e técnicas de modelagem SimPy com a própria comunidade SimPy.<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup> <[www.https://simpy.readthedocs.io/en/latest/](https://simpy.readthedocs.io/en/latest/)>. Acesso em: 11 de Abril de 2019.

# 3 Porto de Salvador

Este capítulo objetiva introduzir as características da área de estudo a ser simulada. Apesar do presente estudo ater-se a análise de capacidade do TECON Salvador, para a compreensão total do sistema é fundamental estudar todo Porto de Salvador, uma vez que as mercadorias que demandam outros terminais podem influenciar de forma indireta no desempenho do TECON Salvador.

Atualmente, a Companhia das Docas do Estado da Bahia (CODEBA), vinculada à Secretaria Nacional de Portos (SNP/MTPA), é a autoridade responsável pela gerência do Porto de Salvador.

Compete à CODEBA, entre outras atribuições, promover a realização de estudos e projetos, realização de obras e serviços, de construção, ampliação, melhoramento, manutenção e operação das instalações portuárias sob sua jurisdição e responsabilidade. A CODEBA também apoia a Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ) na fiscalização dos contratos de arrendamentos e das cessões de áreas e instalações portuárias.<sup>1</sup>

## 3.1 Localização e características geográficas

O Porto de Salvador está localizado na Baía de Todos-os-Santos, entre a Ponta do Monte Serrat, ao norte, e a Ponta de Santo Antônio, ao sul, em Salvador, capital do estado da Bahia. A Figura 7 apresenta a localização e o zoneamento do Porto de Salvador (BRASIL, 2018b).

As coordenadas geográficas do Porto de Salvador são:

- **Latitude:** 13° 00' 37"S
- **Longitude:** 38° 35' 00"O

---

<sup>1</sup> <[http://www.codeba.com.br/eficiente/sites/portalcodeba/pt-br/site.php?secao=institucional\\_historia](http://www.codeba.com.br/eficiente/sites/portalcodeba/pt-br/site.php?secao=institucional_historia)>. Acesso em: 12 de Abril de 2019.

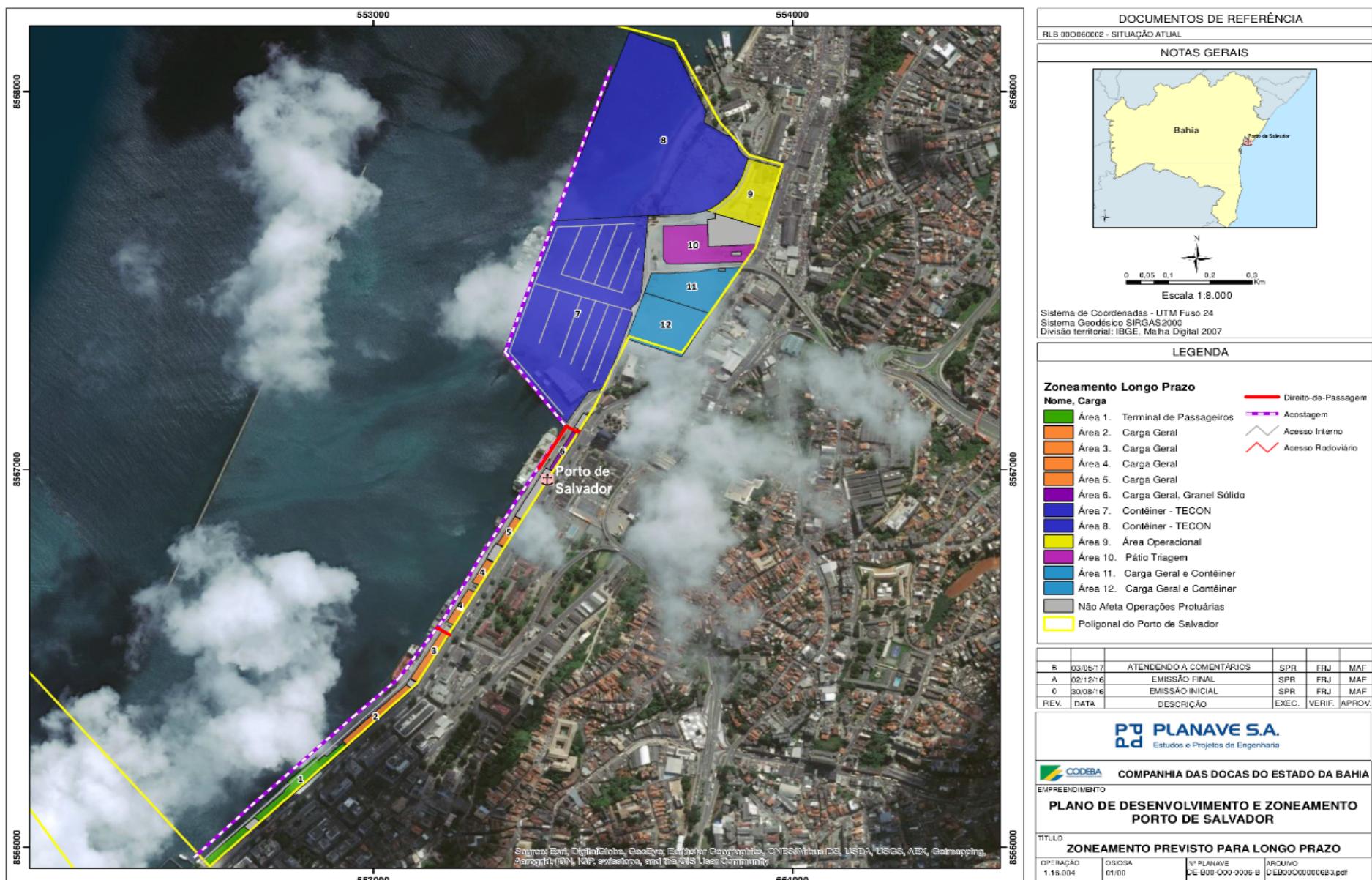


Figura 7 – Localização e zoneamento do Porto de Salvador

Fonte: Brasil (2018a)

Quanto a pluviometria, na análise mensal realizada durante o período de 1961 a 2011, abril foi o mês com maior volume pluviométrico, de até 889,8 mm em 1984. No entanto, maio é o mês mais chuvoso na média mensal (SANTOS et al., 2016).

A Figura 8 apresenta a média de precipitação e temperaturas máximas e mínimas de Salvador nos últimos 30 anos.<sup>2</sup>

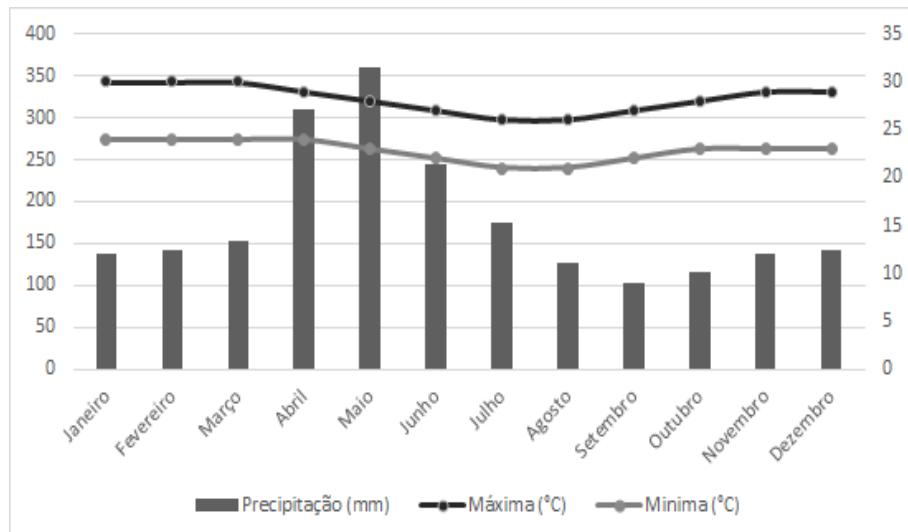


Figura 8 – Média de precipitação e de temperaturas máximas e mínimas

[www.climatempo.com.br](http://www.climatempo.com.br)

Já os ventos predominantes são provenientes do sudeste e leste.<sup>3</sup>

- **Sudeste:** Ocorrência de 28,5%.
- **Leste:** Ocorrência de 26,0%.
- **Nordeste:** Ocorrência de 15,2%.

## 3.2 Infraestrutura

O Porto de Salvador possui um molhe, construído em 1981 com 920 metros e estrutura na forma de enrocamento, e um quebra-mar de 1.474,5 metros de comprimento e construído também em 1981. A Figura 9 ilustra as obras de abrigo do Porto de Salvador (BRASIL, 2018b)

Com relação à infraestrutura de acostagem, há um cais contínuo não alinhado com um total de 2.084 metros de extensão, dividido em dois trechos: cais comercial, com 1.469 metros e cais do TECON Salvador, com 615 metros.

<sup>2</sup> <<https://www.climatempo.com.br/climatologia/56/salvador-ba>>. Acesso em: 12 de Abril de 2019.

<sup>3</sup> <[http://www.codeba.com.br/eficiente/sites/portalcodeba/pt-br/porto\\_salvador.php?secao=porto\\_salvador\\_infraestrutura](http://www.codeba.com.br/eficiente/sites/portalcodeba/pt-br/porto_salvador.php?secao=porto_salvador_infraestrutura)>. Acesso em: 12 de Abril de 2019.



Figura 9 – Obras de abrigo do Porto de Salvador

Fonte: Brasil (2018b)

Toda infraestrutura de cais é dividida em 10 berços (atracadouros), porém, por ser uma divisão antiga, grande parte dos berços possui comprimento pequeno se comparado ao porte atual das embarcações que frequentam o Porto, o que diminui o número efetivo de berços (BRASIL, 2018b).

A Tabela 2 mostra as características físicas dos berços do Porto de Salvador. Os berços do cais comercial são agrupados de dois em dois devido ao baixo comprimento de cada atracadouro individual. A localização dos berços é exibida na Figura 10.

Tabela 2 – Máximas dimensões autorizadas para o Porto de Salvador

Berços	Comprimento acostável (m)	Calado máximo autorizado (m)	Porte bruto (t)	Material de fundo
201/202	384	8.0	40,000	Areia
203/204	300	11.5	50,000	Pedra
205/206	260	8.0	40,000	Areia
207/208	525	8.0	40,000	Areia
300	240	12.0	65,000	Areia
611	375	13.9	105,000	Areia

Fonte: CPBA (2015) e Brasil (2018b)

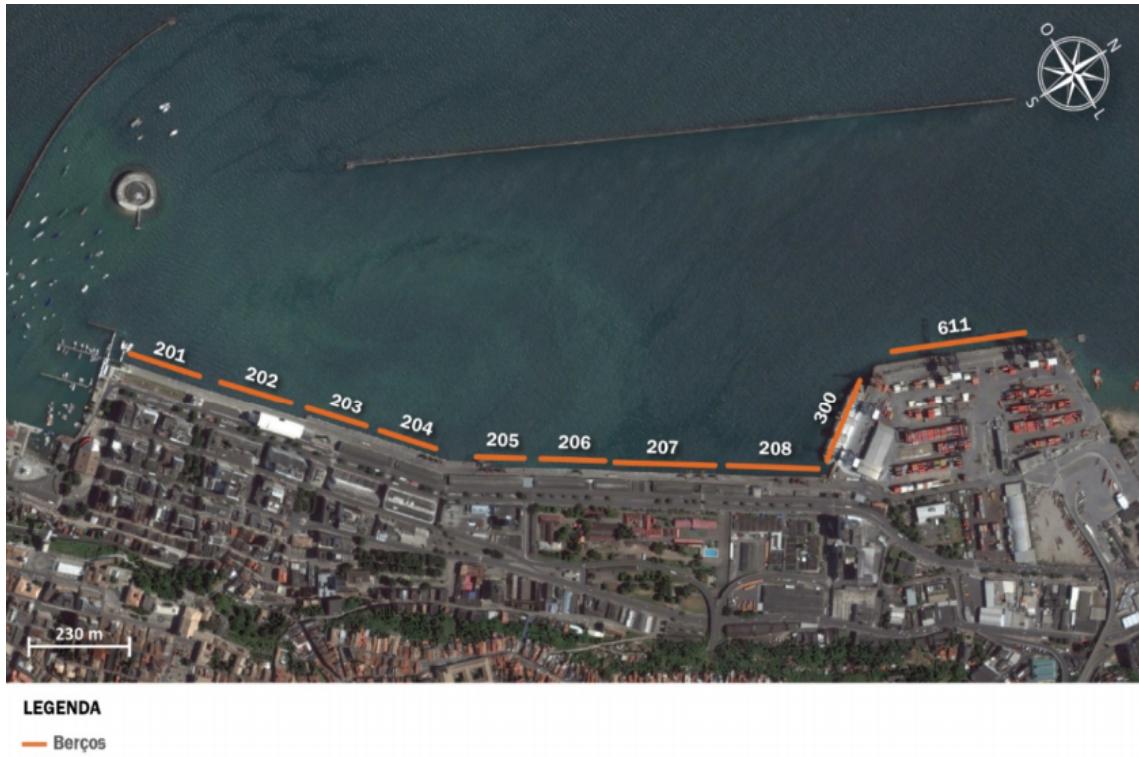


Figura 10 – Berços do Porto de Salvador

Fonte: Brasil (2018b)

Para o cálculo do calado máximo recomendado, utiliza-se a Equação 3.1 (CPBA, 2015):

$$CMR = (P + M) \times (1 - FS) \quad (3.1)$$

Onde:

- **P:** Profundidade reduzida ao nível de redução.
- **M:** Maré momentânea, obtida da tábua de marés.
- **FS:** Fator de segurança em função do material de fundo.

Profundidade é o valor real da distância vertical entre um determinado nível da água e o fundo do mar. No caso das Cartas Náuticas, este nível de água é denominado Nível de Redução (NR). Quando se acrescentam correções a sondagem (devido a fatores instrumentais, de posição do transdutor, atitude da embarcação e ambientais) a fim de se obter a profundidade local com o menor erro possível, denomina-se profundidade reduzida (RAMOS; KRUEGER, 2009).

Em Salvador, analisando em 2018, a maior variação de maré verificada foi de 2,6 em 10 de agosto. Com relação aos fatores de segurança, adota-se (CPBA, 2015):

- **Areia:** 0,050.
- **Lama macia:** 0,026.
- **Pedra:** 0,080.

As defensas instaladas no cais são do tipo pneu nos trechos "205/206" e "207/208"; do tipo tronco-cônicas nos trechos "201/202", "203/204" e "300"; "611" do tipo cônica. Existem hidrantes para abastecimento de água nos berços "201/202", "203/204", "205/206" e "207/208". Não há fornecimento de energia elétrica (CODEBA, 2014).

Com relação aos cabeços de amarração, segue a nomenclatura e características da disposição deles no cais através da Tabela 3.

Tabela 3 – Cabeços de amarração disponíveis no Porto de Salvador

Berços	Cabeços de amarração	Número de cabeços	Distância entre cabeços (m)
201/202	09 a 23	15	25
203/204	01 a 10	10	30
205/206	39 a 47	11	9 de 25 e 2 de 30
207/208	47 a 68	22	25
300	01 a 08	8	30
611	01 a 03	13	30

Fonte: CPBA (2015)

A Tabela 4 exibe os equipamentos de cais e os tipos de carga movimentada em cada um dos berços do Porto de Salvador.

Tabela 4 – Equipamentos de cais e natureza operada nos trechos de cais

Berços	Equipamentos de cais	Destinação operacional
201/202	Não Dispõe	Passageiros
203/204	4 guindastes (Cap. 3,2t)	Carga Geral
205/206	3 guindastes (Cap. 3,2t)	Carga Geral
207/208	6 guindastes (Cap. 5 de 3,2t e 1 de 6t)	Trigo, celulose e fertilizantes
300	3 portêineres (Panamax)	Contêineres e carga geral
611	3 portêineres (Super Post-Panamax)	Contêineres e carga geral

Fonte: CODEBA (2014) e Brasil (2018a)

Com relação à armazenagem, o uso das instalações é realizado mediante requisição por parte do dono da mercadoria à CODEBA, de acordo com as disponibilidades. A movimentação na recepção, eventual transporte interno, empilhamento, desempilhamento e expedição são encargos dos operadores portuários, contratados pelo dono da mercadoria ou consignatário (CODEBA, 2014).

A Tabela 5 mostra as instalações de armazenagens disponíveis, sua área, capacidade estática e destinação operacional.

Tabela 5 – Armazéns do Porto de Salvador

Instalação	Área (m <sup>2</sup> )	Capacidade (t)	Destinação Operacional
Arm. 3	2,0 mil	6,0 mil	Carga geral e celulose
Arm. 4	1,8 mil	5,0 mil	Carga geral e celulose
Arm. 5	3,0 mil	7,8 mil	Granel sólido
Arm. 6	2,0 mil	5,5 mil	Granel sólido
Arm. 7	1,4 mil	3,5 mil	Granel sólido
Arm. 8	1,6 mil	4,0 mil	Carga geral e celulose

Fonte: CODEBA (2014), Brasil (2018b) e Brasil (2018a)

Além dos armazéns, existem 3 pátios no Porto de Salvador destinados a armazenagem de cargas. O pátio do TECON, que possui uma área de 117.900 m, dos quais 110.800 m para armazenagem, com capacidade estática de 11.214 TEU. A área destinada à expansão do TECON também apresenta um pátio de 32.380 m, atualmente este espaço armazena cargas de projeto como pás eólicas e carros e futuramente também poderá operar contêiner quando a obra de expansão terminar (BRASIL, 2018a).

Outro pátio disponível pertence ao operador Intermarítima, com área de 15.800 m e capacidade estática de 1.889 TEUs. Por último, o pátio público apresenta uma área de 8.670 m com capacidade indefinida, visto que movimenta diferentes tipos de carga (BRASIL, 2018a).

Com relação ao arrendamento de áreas portuárias, existem 3 áreas arrendadas hoje no Porto de Salvador. A Wilson Sons obteve a prorrogação antecipada do mesmo até o ano de 2050, se comprometendo a construir um novo berço de contêineres adjacente ao atual (que será simulada no presente trabalho). A Secretaria Nacional de Portos (SNP) vinculada Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil (MTPA) já concedeu a autorização para sua construção (BRASIL, 2018a).

O contrato da Intermarítima já está expirado, mas a empresa continua operando sob liminar, tendo sido negociado um contrato de transição que ainda não foi aceito pela arrendatária. O Terminal Marítimo de Passageiros e Receptivo Turístico do Porto de Salvador foi arrendado em 24/5/2016 pelo consórcio CONTERMAS (Consórcio Novo Terminal Marítimo de Salvador), pelo período de 25 anos. O consórcio é formado pelas empresas Socicam Terminais Rodoviários e Representações e ABA Infraestrutura e Logística (BRASIL, 2018a).

### 3.2.1 Projetos e expansões

Esta seção é destinada a descrição do projeto de expansão do Cais Água para Meninos, correspondente ao lado direito do Berço 611 do TECON Salvador (ver Figura 10 na Página 19).

O projeto do novo TECON Salvador será realizado em 3 etapas. A primeira fase

consiste no prolongamento do Cais Água de Meninos (Berço 611), chegando a 800 metros de extensão (contabilizando os 2 berços), com previsão de conclusão até 2020. A Figura 11 exibe a primeira etapa do projeto<sup>4</sup>.

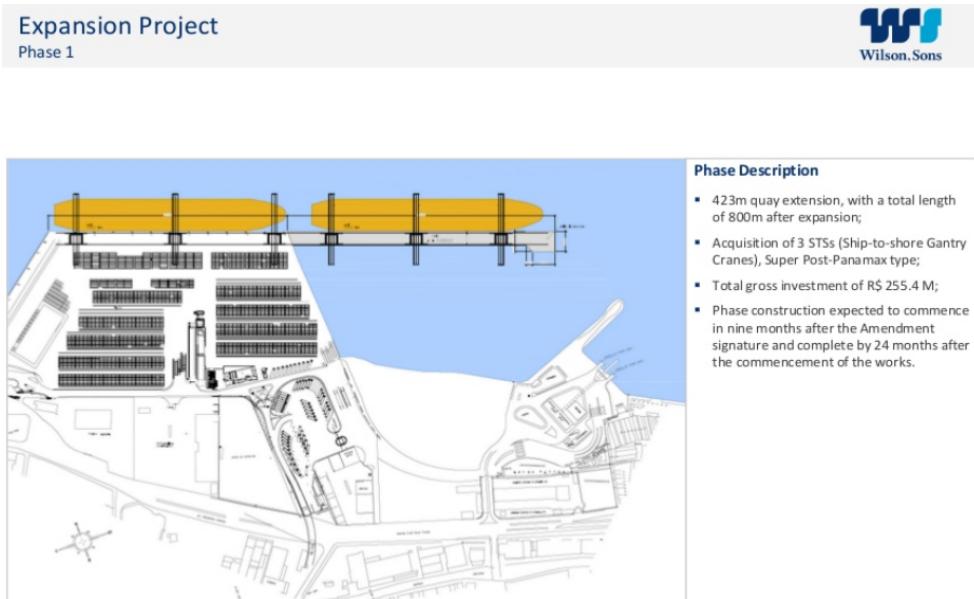


Figura 11 – 1<sup>a</sup> etapa da expansão do TECON Salvador

Fonte: <<https://pt.slideshare.net/WilsonSonsri/tecon-salvador-expansion/8>>. Acesso em: 23 de Junho de 2019.

Conforme exposto na Figura 11, haverá a expansão de 423 metros de cais e aquisição de 3 porteiros Super Post-Panamax, semelhantes aos utilizados no Berço 611. Essa expansão se deve principalmente à impossibilidade de operar navios Post-Panamax no Berço 300, devido ao comprimento das embarcações cada vez maiores, como mostrado na Figura 12.

Na segunda fase consiste na pavimentação da retroárea existente afim de torná-la um pátio. A terceira fase do projeto consiste na expansão do pátio realizado na etapa 2, porém em área a ser aterrada (BRASIL, 2018b).

Conforme mostra a Figura 12, ocorre uma tendência ao crescimento das dimensões das embarcações de contêineres. Indicando que não é possível a atracação de navios *New Panamax* no Berço 300.

A Figura 13 retrata de forma esquemática a configuração do terminal ao final da expansão realizada.

<sup>4</sup> <<https://pt.slideshare.net/WilsonSonsri/tecon-salvador-expansion/8>>. Acesso em: 23 de Junho de 2019.

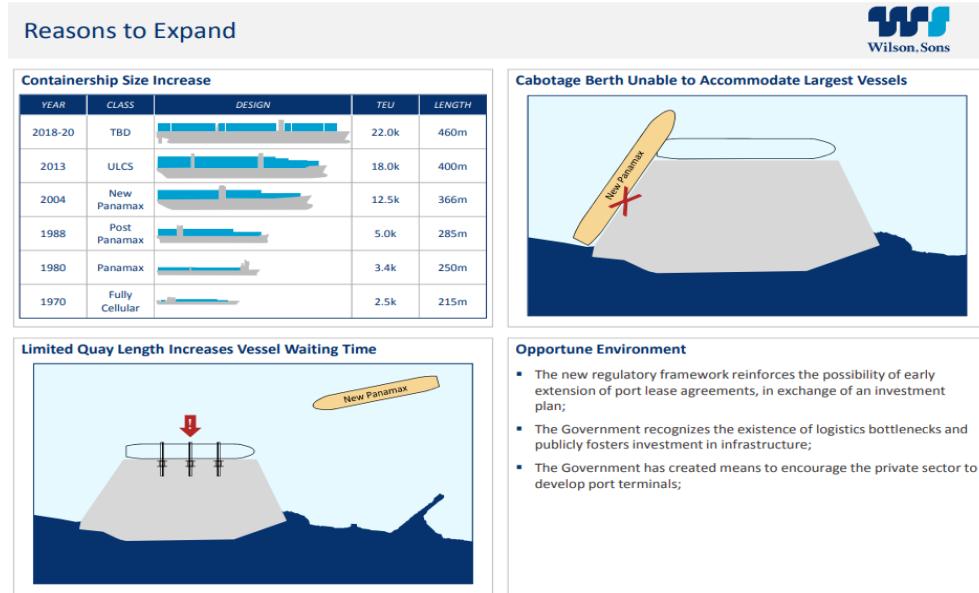


Figura 12 – Motivação para a expansão do TECON Salvador

Fonte: <<https://pt.slideshare.net/WilsonSonsri/tecon-salvador-expansion/8>>. Acesso em: 23 de Junho de 2019.



Figura 13 – Expansão do TECON Salvador

Fonte: Brasil (2018b)

### 3.3 Movimentação

Porto de Salvador caracteriza-se por ser um porto exportador, destacando-se na movimentação de contêineres, carga geral e granéis sólidos (trigo), além de ser um dos principais destinos de cruzeiros marítimos do país (CODEBA, 2014).

Destaca-se a movimentação de cargas conteinerizadas, operadas nos berços do TE-

CON Salvador, que de 2015 para 2018 cresceu 17,6%. O segundo produto mais movimentado no Porto de Salvador é o trigo, operado principalmente no Berço 208.

Em 2018, O Porto de Salvador foi o 8º porto brasileiro em movimentação de carga conteinerizada, com total de 4,25 milhões de toneladas (309 mil TEUS) (ANTAQ, 2018).

A celulose também obteve crescimento de 50,6% em relação a 2015, passando de 11 mil t movimentadas em 2015 para 195 mil t em 2018. As demais cargas flutuaram a movimentação entre o horizonte estudado. Destaca-se que outras cargas gerais movimentadas representavam 2,2% do total movimentado (em toneladas) em 2015 e reduziram para 0,17% em 2018.

A Figura 14 exibe a movimentação do Porto de Salvador nos últimos 4 anos.

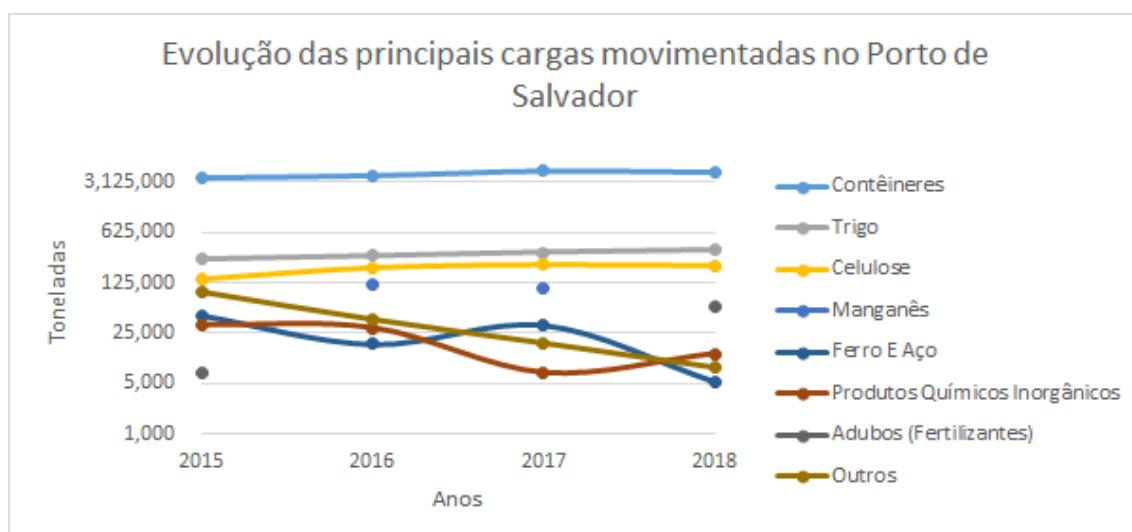


Figura 14 – Movimentação no Porto de Salvador nos últimos 4 anos

Fonte: ANTAQ (2018)

Percebe-se através da Figura 14 que os contêineres, o trigo e a celulose são as principais cargas movimentadas no Porto, com movimentações constantes e crescentes durante o período 2015 a 2018.

Para uma melhor noção da importância da movimentação de contêineres para o Porto de Salvador, a Figura 15 demonstra a representatividade de cada carga em relação ao total movimentado (t).

O transporte de manganês e os produtos químicos inorgânicos estão diretamente ligados ao polo petroquímico de Camaçari<sup>5</sup>, e portanto apresentam movimentações pontuais de cargas para fins específicos, com muita variação ao longo do tempo.

<sup>5</sup> <[http://www.codeba.com.br/eficiente/sites/portalcodeba/pt-br/site.php?secao=noticias\\_gerais&pub=4733](http://www.codeba.com.br/eficiente/sites/portalcodeba/pt-br/site.php?secao=noticias_gerais&pub=4733)>. Acesso em: 05 de Maio de 2019.

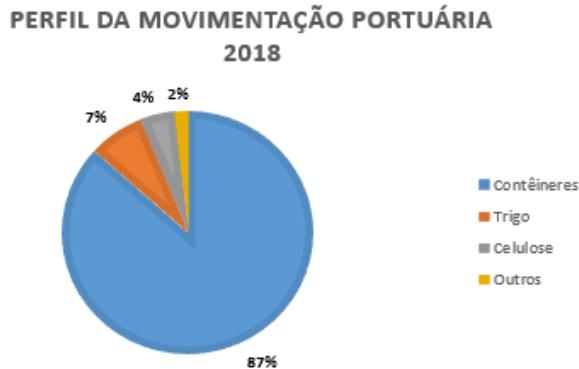


Figura 15 – Perfil de movimentação de carga no Porto de Salvador (2018)

Fonte: ANTAQ (2018)

## 3.4 Operações

Esta seção se destina a caracterizar as operações do translado de cargas no Porto de Salvador.

Não é permitido o cruzamento de navios devido a movimentação *squat*<sup>6</sup> (diminuição do espaço entre a quilha e o fundo do mar, rio ou canal, causado pelo movimento da embarcação). Isso significa que cada canal de acesso (Norte ou Sul) só pode conter um navio de cada vez. (CPBA, 2015)

Também é concedida atracação imediata à sua chegada ao Porto aos navios de turismo ou passageiros, obedecendo escala pré-determinada e comunicada à Autoridade Portuária. Na falta de cais livre para atracação imediata dos navios de passageiros ou turismo, deverá ser determinada a desatracação de um cargueiro pertencente ao mesmo armador (CODEBA, 2014).

No Porto de Salvador, o Cais de Ligação (Berço 300) e o Cais de Água de Meninos (Berço 611) são considerados preferenciais para atracação de navios "full-containers", cujas movimentações serão efetuadas através do TECON, observando as condições estabelecidas para utilização de janela de atracação própria (CODEBA, 2014).

Destaca-se que a operação a contrabordo<sup>7</sup> também pode ser realizada desde que haja o requerimento do armador sob total responsabilidade dos seus comandantes (CODEBA, 2014).

Após o término da operação portuária, ou, caso haja, após serviços previamente autorizados, deverá iniciar-se o processo de desatracação (CODEBA, 2014).

<sup>6</sup> <<https://www.pinoymaritime.com/the-easiest-way-of-understanding-ship-squat-effect/>>. Acesso em: 09 de Junho de 2019.

<sup>7</sup> Operação que consiste em embarcação atracar no costado de outra, estando ou não atracada no cais ou, ainda, fundeada ao largo. Fonte: <<https://portogente.com.br/portopedia/76253-contrabordo>>. Acesso em: 23 de Junho de 2019.

A CODEBA (2014) também afirma:

"Dentro de cada classe (preferenciais, exclusivas, prioritárias ou não prioritárias), as atracações serão autorizadas conforme a ordem cronológica de chegada dos navios à linha que delimita a entrada da Baía de Todos os Santos, para os portos de Salvador e Aratu, caracterizando-se quando o navio acessa a área de fundeio, salvo quando o comprimento da vaga disponível e/ou profundidade do “berço” não forem compatíveis com o comprimento e/ou calado do navio a atracar, caso em que a ordem de atracação será alterada."

### 3.4.1 Destinação operacional

Esta subseção destina-se a mapear o fluxo das principais cargas movimentadas nos últimos 4 anos, exibidas na Seção 3.3.

Para um melhor entendimento da destinação operacional a Tabela 6 mostra o percentual de carga destinada a cada um dos atracadouros do Porto de Salvador.

Tabela 6 – Destinação operacional do Porto de Salvador de 2015 a 2018

Cargas	203/204	205/206	207	208	300	611	Total
<b>Adubos (Fertilizantes)</b>	100%	0%	0%	0%	0%	0%	<b>100%</b>
<b>Contêineres</b>	0%	0%	0%	0%	8%	92%	<b>100%</b>
<b>Ferro E Aço</b>	70%	5%	14%	3%	8%	0%	<b>100%</b>
<b>Manganês</b>	0%	0%	0%	0%	100%	0%	<b>100%</b>
<b>Celulose</b>	81%	16%	3%	0%	0%	0%	<b>100%</b>
<b>Produtos Químicos Inorgânicos</b>	0%	0%	0%	0%	100%	0%	<b>100%</b>
<b>Trigo</b>	2%	6%	11%	81%	0%	0%	<b>100%</b>
<b>Outros</b>	49%	18%	11%	1%	21%	0%	<b>100%</b>
<b>Total Geral</b>	<b>5%</b>	<b>1%</b>	<b>1%</b>	<b>5%</b>	<b>9%</b>	<b>79%</b>	<b>100%</b>

Fonte: ANTAQ (2018)

A Tabela 6 demonstra que, no Terminal TECON Salvador, Berços 300 e 611, foram movimentados contêineres, ferro e aço, manganês e produtos químicos inorgânicos.

### 3.4.2 Aspectos operacionais do TECON Salvador

As subseções seguintes tem como objetivo apresentar os indicadores operacionais que servirão de métricas para a construção do modelo de simulação. Para o cálculo de tais indicadores, foi utilizada a base de dados exportada do Anuário Estatístico (ANTAQ, 2018).

### 3.4.2.1 Contêineres

A atracação dos contêineres ocorre nos Berços 300 e 611, próximos ao arrendamento Wilson Sons. Para a operação são utilizados 3 portêineres, tanto no Berço 300 quanto no Berço 611. Do pátio de armazenagem, a carga é colocada nos caminhões por meio de aparelhos *reach stacker* ou *Rubber Tyred Gantry* (RTG) que a transportam até o cais, onde é embarcada através de portêineres. O desembarque da carga ocorre de maneira análoga em sentido inverso.

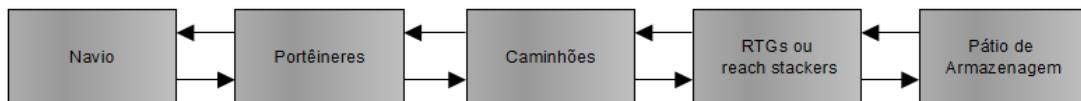


Figura 16 – Fluxo operacional dos contêineres no TECON Salvador

Fonte: Brasil (2018b)

No caso estudado (TECON de Salvador), a Wilson Sons é a agência marítima<sup>8</sup> que faz a ligação entre os armadores e afretadores na prestação de serviços relacionados a transporte e armazenamento de cargas no Porto de Salvador. Para isso, detém o arrendamento da área com o contrato prorrogado até 2050.

O TECON por vezes também movimenta contêineres para a Intermarítima Terminais. Nesse caso, os caminhões partem da do Pátio do TECON ou diretamente do cais para o Pátio da Intermarítima.

Os indicadores operacionais para a movimentação de contêineres no Berço 611 são abordados na Tabela 7. Nela são exibidos os valores máximo e mínimo registrados, a média da amostra, e o quartil inferior ('Q. 25 %') e superior ('Q. 75 %').

Tabela 7 – Indicadores operacionais dos contêineres no Berço 611

Indicador	Mínimo	Q. 25%	Média	Q. 75%	Máximo
Lote médio (un)	25	246	409	536	1451
Produtividade (un/h)	6,7	39,0	47,2	55,5	225,6
Tempo inoperante pré-operacional (h)	0,0	0,6	1,2	1,4	24,8
Tempo inoperante pós-operacional (h)	0,0	1,3	2,2	2,2	25,4
Tempo operacional (h)	0,9	1,3	12,1	55,5	173,1

Fonte: ANTAQ (2018)

<sup>8</sup> É a empresa que representa o armador em determinado país, estado, cidade ou porto, fazendo a ligação entre este e o usuário do navio. Fonte: <<http://turbocargobrasil.com.br/diferencias-entre-armador-nvocc-e-agencia-maritima/>>. Acesso em: 21 de Junho de 2019.

Já os indicadores operacionais da movimentação de contêineres no Berço 300 são exibidos na Tabela 8.

Tabela 8 – Indicadores operacionais dos contêineres no Berço 300

Indicador	Mínimo	Q. 25%	Média	Q. 75%	Máximo
Lote médio (un)	29	261	372	487	945
Produtividade (un/h)	6,3	22,4	30,4	34,7	148,0
Tempo inoperante pré-operacional (h)	0,0	0,6	1,3	2,5	19,8
Tempo inoperante pós-operacional (h)	0,1	1,3	2,3	2,0	33,0
Tempo operacional (h)	1,4	8,6	12,2	17,2	51,2

Fonte: ANTAQ (2018)

### 3.4.2.2 Outras Cargas Gerais

Considera-se outras cargas gerais os lingotes de ferro e aço, máquinas, aparelhos eletrônicos, reatores entre outros. Essas cargas, por se tratarem de cargas muito variáveis tiveram somente seu tempo de estadia no berço, ou seja o tempo de atracação, cujos valor mínimo, máximo, médio, e quartis superior e inferior são mostrados na Tabela 9.

Tabela 9 – Tempo médio de atracação de outras cargas no Berço 300

Indicador	Mínimo	Q. 25%	Média	Q. 75%	Máximo
Tempo médio de atracação (h)	4,5	12,6	18,1	30,3	369,8

Fonte: ANTAQ (2018)

Para a operação dessas cargas são utilizadas empiladeiras para a movimentação na retroárea, caminhões como meio de transporte entre o cais e os armazéns e guindaste sobre rodas para a operação de carga e descarga da embarcação (BRASIL, 2018b).

### 3.4.3 Desempenho de cais do TECON Salvador

Esta subseção destina-se a descrever as métricas de desempenho portuário observadas no Tecon Salvador para o ano de 2018. Para o Berço 611, observou-se os seguintes parâmetros:

- **AWS:** 9,3 h.
- **Ocupação ( $\rho$ ):** 61,8 %.
- **Outflow:** 450 navios.

Considerando o Berço 300, obtém-se:

- **AWT - Contêineres:** 5,5 h.
- **AWT - Outras cargas. gerais:** 3,4 h .
- **Ocupação ( $\rho$ ):** 10 %.
- **Outflow:** 32 navios.

Devido à prioridade de atracação verificada para contêineres, calculou-se o tempo de espera para as embarcações conforme a carga movimentada.

Observa-se no entanto que, mesmo com prioridade de atracação, os contêineres apresentaram tempo de espera superior às cargas gerais. Esse resultado se deve ao fato da baixa demanda que se destina ao Berço 300. Se essa demanda aumentar, a prioridade para as atracações de contêineres prevalecerá na fila, e os tempos de espera para as embarcações de carga geral serão superiores aos de contêineres.

Tais índices foram calculados através da Base de dados do Anuário Estatístico da ANTAQ para o ano de 2018 (ANTAQ, 2018).



## 4 Modelo de simulação

O mapeamento de processos é uma ferramenta que permite documentar os eventos em todos os elementos que compõem um processo, através de diversas técnicas que podem ser aplicadas individualmente ou em conjunto (SANTANA, 2003).

O fluxograma exposto na Figura 17 exibe de forma esquemática o processo das operações portuárias simulado.

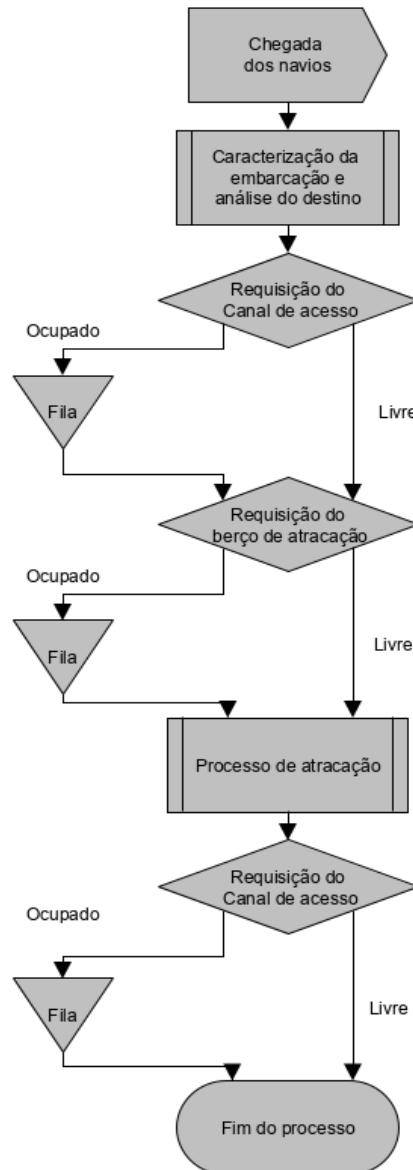


Figura 17 – Mapeamento dos processos envolvidos na operação portuária

Fonte: Elaborado pelo autor

Para a elaboração do modelo, a chegada das embarcações deve obedecer às características de chegada das embarcações no Porto de Salvador. Para isso, foi utilizado o Software Easyfit para checagem de distribuição dos dados de tempos entre chegadas sucessivas. Além disso, a escolha das características da embarcação (carga, lote, produtividade, tempos inoperantes) também deve satisfazer as distribuições de probabilidades de valores vistos em prática.

A Tabela 10 mostra a porcentagem das embarcações que movimentaram contêineres, outras cargas gerais e outras cargas durante o período de 2015 a 2018.

Tabela 10 – Representatividade das embarcações por tipo de carga (2015 a 2018)

Cargas que acessam porto	Número de embarcações	Representatividade
Outras Cargas	162	7,6%
Outras Cargas Gerais movimentadas no Berço 300	77	3,6%
Contêineres movimentados no Berço 300	190	8,9%
Contêineres movimentados no Berço 611	1.702	79,9%
<b>Total</b>	<b>2.131</b>	<b>100,0%</b>

Fonte: ANTAQ (2018)

Uma vez que as embarcações são geradas, ocorre a requisição para navegação no canal de acesso e requisição para atracar no berço de destino. A Figura 18 exibe os guichês a serem requisitados pelas embarcações no modelo de simulação.

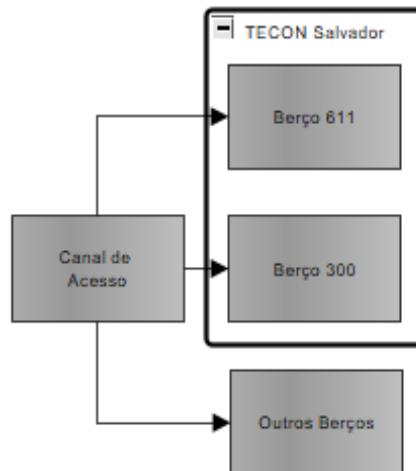


Figura 18 – Guichês presentes no modelo

Fonte: Elaborado pelo autor

Caso o canal de acesso e o berço de destino estejam livres, a embarcação navega até o berço de destino, manobra, atraca, opera, requisita novamente o canal de acesso e sai.

Nesse sentido, são contabilizados *delays* em cada um dos processos executados pela embarcação, e exibidos pela Figura 19

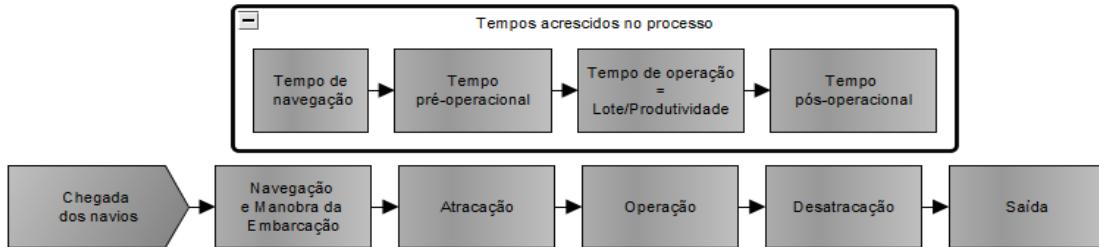


Figura 19 – Tempos acrescentados em cada parte do processo de simulação

Fonte: Elaborado pelo autor

Para consideração do tempo de navegação, foi adotado o valor de 1,5 h adotado conforme Brasil (2018b), com uma variação uniforme de 15% ou para cima ou para baixo, arbitrado pelo autor.

Para a caracterização dos tempos de atracação dos contêineres, foram analisados os lotes, as produtividades registradas e também os tempos inoperantes. Dessa maneira o tempo de atracação é dado conforme a Equação 2.1.

No caso das outras cargas gerais movimentadas no Berço 300, devido à grande variabilidade de características físicas intrínsecas às cargas (densidade, dificuldade de alocação no navio, equipamentos para operação), analisa-se somente o tempo de atracação diretamente.

Faz-se esta distinção porque, para os contêineres, poderiam ser simulados outros aspectos além da extensão do Cais do Berço 6, como a adição de mais um portêiner para movimentação e adição de mais ternos<sup>1</sup> (incremento da produtividade média). O presente estudo se atem apenas na extensão do Berço 611.

Os produtos químicos inorgânicos e manganês (granéis sólidos) não tiveram seus registros analisados para caracterização do tempo de atracação, uma vez que não apresentam movimentações constantes ao longo do período analisado (2015-2018). Essa simplificação é válida devido ao baixo número de atracções (em 2018, por exemplo, de 32 registros no Berço 300, foram registrados 2 atracções de produtos químicos e nenhuma de manganês).

As demais cargas que acessam o Porto de Salvador, destinadas aos berços fora do TECON Salvador, apresentam características homogêneas de movimentação. No entanto, houve a análise somente dos tempo de atracação pois deseja-se saber somente os momentos

<sup>1</sup> Equipes de trabalho a bordo. Normalmente, em cada porão em que haja movimentação de mercadorias há um terno de trabalhadores escalado. Fonte: <<http://www.ogmoitajai.com.br/portal/info/indice.asp>>. Acesso em: 23 de Junho de 2019.

de requisição do canal de acesso por parte de embarcações que movimentam este tipo de carga.

Com a consideração desses parâmetros e suas respectivas variabilidades, simula-se a interação entre eles, através do *script* de simulação exibido no Anexo B. As métricas de desempenho, obtidas através do processo de simulação são então comparadas as métricas atuais de desempenho, referenciadas na Seção 3.4.3.

## 4.1 Simplificações do modelo

A CODEBA (2014) prevê prioridade de atracação imediata para navios de cruzeiro que chegam ao Porto. Para simplificação de modelo, desconsiderou-se as atracações de cruzeiro na requisição do canal de acesso. Essa consideração não impactará profundamente no modelo uma vez que as atracações de navios de cruzeiro ocorrem somente durante a temporada (Dezembro a Fevereiro). Em 2017, foram 49 atracações (BRASIL, 2018b).

Como a base de dados do Anuário Estatístico (ANTAQ, 2018) não apresenta os tempos de parada de operações, seja por questões climáticas ou técnicas, consideram-se que estes fatores foram considerados de maneira indireta através da produtividade ou dos tempos inoperantes.

Outra parte do processo de construção do modelo simplificada foi a tomada de decisão para qual Berço o porta-contêineres se destina. Esse processo de tomada de decisão envolve análise do calado da embarcação com a profundidade momentânea. Como a ANTAQ (2018) não apresenta identificadores das embarcações que atracaram, como "NREmbarcação" ou o número de registro na Organização Marítima Internacional (IMO)<sup>2</sup>, não foi possível implementar a destinação por análise de calado da embarcação que chega ao Porto.

Neste caso, foi adotado como simplificação que o percentual de navios de contêineres que se destinam ao Berço 611 e 300 se manteriam os mesmos. Na média ao longo dos 4 últimos anos, ou seja, se 79% da frota destina-se ao Berço 611 e , esse *share* permanecerá aproximadamente fixo.

O tempo entre chegadas sucessivas dos navios geralmente obedece às janelas de atracações e não são completamente aleatórias, uma vez que obedecem as programações das linhas de navegação com baixas variações inerentes ao transporte. Como cerca de 80% dos navios obedece essa característica, adotou-se por simplificação que as análises dos tempos entre chegadas sucessivas obedeceria, de maneira indireta, a chegada dos navios com janelas de atracação.

---

<sup>2</sup> Na ultima atualização do anuário estatístico da ANTAQ já foi disponibilizado o "NR IMO", o que possibilitaria o processo.

Destaca-se que para o completo entendimento do desempenho de cais de um Porto, necessita-se da compreensão de indicadores operacionais e financeiros, de modo a compreender a relação e a influencia entre eles (OLBA et al., 2015). O presente trabalho aborda tratará apenas dos aspectos operacionais.

Para a compreensão total das operações do terminal, podem ser implementadas ainda a análise de armazenagem de carga e o seu translado para os modais rodoviário ou ferroviário. Para o presente estudo vamos focar apenas na simulação das operações de cais, as quais geralmente se caracterizam como gargalos operacionais do sistema (TRISKA, 2015).



# 5 Resultados

Este capítulo objetiva mostrar e analisar os resultados do modelo de simulação desenvolvido para o presente trabalho.

Foram considerados dois cenários para simulação, do cenário atual do TECON Salvador, e contendo a expansão do Berço 611, descrita na Seção 3.2.1. As simulações ocorrem num cenário temporal de um ano.

Dessa forma, foi simulado o cenário atual para verificação da semelhança do modelo com a realidade. Depois, para obter o comportamento do sistema, ou seja, quais são as métricas de desempenho se a demanda de navios for alterada, adicionamos um índice de reajuste no tempo entre chegadas sucessivas. Aumentando esse índice, aumentam-se os tempos entre chegadas e reduz-se o *outflow*. Para simplificação, considera-se que o perfil de destino das embarcações continue o mesmo. Depois, repete-se o processo para o cenário com expansão.

## 5.1 Cenário atual

Para caracterização do cenário atual, foram realizadas 20 simulações para análise das métricas de desempenho. A Tabela 11 mostra as métricas de operação obtidas para o Berço 611.

Tabela 11 – Exemplo dos 5 primeiros registros de simulações anuais - Berço 611

#	Lote médio (uns/navio)	Produtividade média (uns/h)	Tempo médio inoperante (h)	Outflow (navios/ano)	Tempo médio de espera (AWT)(h)	$\rho$
0	404,1	48,2	3,3	404	7,4	58%
1	405,6	46,6	3,2	409	8,3	61%
2	408,9	47,5	3,3	419	9,1	62%
3	395,4	46,9	3,3	415	8,1	61%
4	421,6	47,9	3,2	430	15,7	66%

Elaborado pelo autor

A Figura 20 mostra o regime de filas no decorrer de um ano de simulação no Berço 611.

A média das métricas de desempenho das 20 simulações resultaram em:

- *Outflow*: 414 navios/ano.
- *AWT*: 8,8 h .
- **Ocupação ( $\rho$ )**: 61 %.



Figura 20 – Regime de filas em um ano de simulação no Berço 611

Elaborado pelo autor

Comparando a média dos registros simulados com os reais, o *outflow* apresentou índice 8% de variação em relação ao número real (450 navios). O tempo médio de espera (*AWT*) obteve erro relativo de 5% e o índice de ocupação variação de 2%. A Tabela 12 mostra os resultados.

Tabela 12 – Comparaçao das métricas de desempenho reais e simuladas - Berço 611

Métrica de desempenho	Real	Simulado	Erro
<i>Outflow</i>	450	414	8%
<i>AWT</i>	9,3	8,8	5%
$\rho$	62%	61%	2%

Elaborado pelo autor

Como todos os índices apresentaram variações menores do que 10%, e considerando que as métricas de construção permaneceram idênticas, considera-se que o sistema simulado está balizado com o sistema real. Analisando as métricas do Berço 300.

Tabela 13 – Exemplo dos 5 primeiros registros de simulações anuais - Berço 300

#	Lote médio (uns/navio)	Produtividade média (uns/h)	Tempo médio inoperante (h)	Outflow (navios/ano)	Tempo médio de espera - Cont. ( <i>AWT</i> )(h)	Tempo médio de espera - Outros ( <i>AWT</i> )(h)	$\rho$
0	396,0	28,7	4,3	44	3,5	8,7	13%
1	348,0	29,0	4,4	54	4,1	1,5	16%
2	381,7	30,4	4,1	62	4,7	3,8	17%
3	377,3	29,0	4,0	60	4,6	2,2	19%
4	383,5	29,3	4,0	64	6,3	13,4	20%

Elaborado pelo autor

A Figura 24 mostra o regime de filas no decorrer de um ano de simulação no Berço 300.

A média das métricas de desempenho das 20 simulações resultaram em:

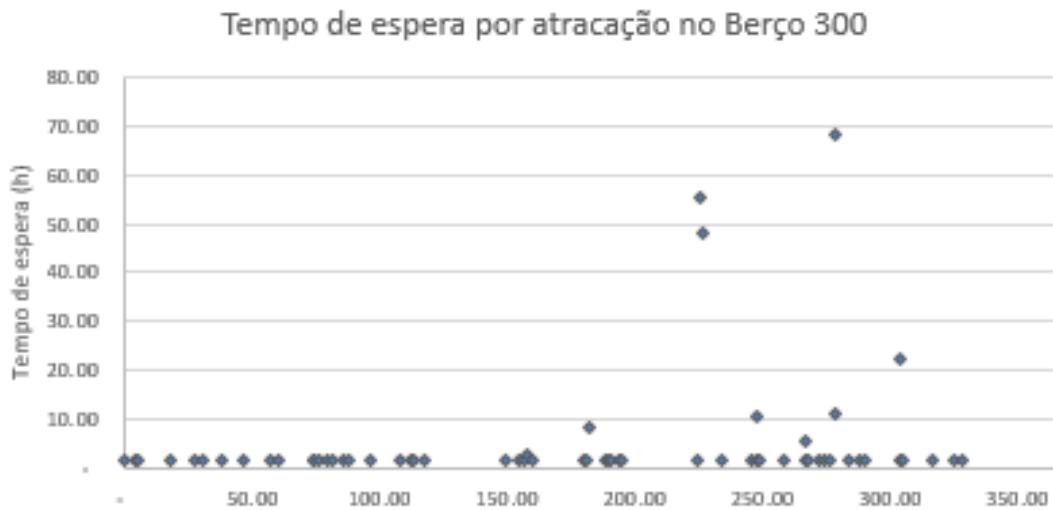


Figura 21 – Regime de filas em um ano de simulação no Berço 300

Elaborado pelo autor

- ***Outflow:*** 54 navios/ano.
- ***AWT - Contêineres:*** 4,2 h .
- ***AWT - Outras cargas gerais:*** 5 h.
- **Ocupação ( $\rho$ ):** 16 %.

Comparando a média dos registros simulados com os reais, o *outflow* apresentou índice 8% de variação em relação ao número real (450 navios). O tempo médio de espera (*AWT*) obteve erro relativo de 5% e o índice de ocupação variação de 2%. A Tabela 14 mostra os resultados.

Tabela 14 – Comparação das métricas de desempenho reais e simuladas - Berço 300

Métrica de desempenho	Real	Simulado	Erro
<b>Outflow</b>	32	54,0	69%
<b>AWT - Contêineres</b>	5,5	4,2	24%
<b>AWT - Outras cargas</b>	3,4	5,0	46%
$\rho$	10%	16%	55%

Elaborado pelo autor

Apesar de serem observados erros na faixa de 50% para os índices, isso não necessariamente retrata um sistema desajustado. O modelo de simulação levou em consideração os indicadores operacionais no período de 2015 a 2018 (Ver Seção ??), porém, em 2018 (Ano dos dados comparados) houve uma queda no número de navios que destinou-se ao Berço 300, de 47 registros em 2017 para 32 em 2018. A Tabela 31 mostra os valores simulados comparados ao ano de 2017.

Tabela 15 – Comparação das métricas de desempenho reais e simuladas em 2017 - Berço 300

Métrica de desempenho	Real (2017)	Simulado	Erro
<b>Outflow</b>	47	54,0	15%
<b>AWT - Contêineres</b>	7,0	4,2	40%
<b>AWT - Outras cargas</b>	10	5,0	50%
$\rho$	24%	16%	33%

Elaborado pelo autor

Ao comparar os valores simulados com os resultados de 2017 (Tabela 15) e 2018 (Tabela 14), percebe-se que a simulação esta dentro da faixa de valores reais.

## 5.2 Comportamento do sistema atual

Para uma melhor percepção da alteração dos resultados para diferentes demandas, foram mantidos os indicadores operacionais (que resultam nos tempos de atracação) e variou-se o *outflow* através da multiplicação do tempo entre chegadas sucessivas por um índice de reajuste.

O objetivo é caracterizar o comportamento do sistema através da variação do número de acessos, conforme gráfico de exemplo retirado de Olba et al. (2015) referenciado na Seção 2.1.2.

A Figura 22 demonstra o comportamento do termo (WT/ST) simulado para variações do *outflow*.

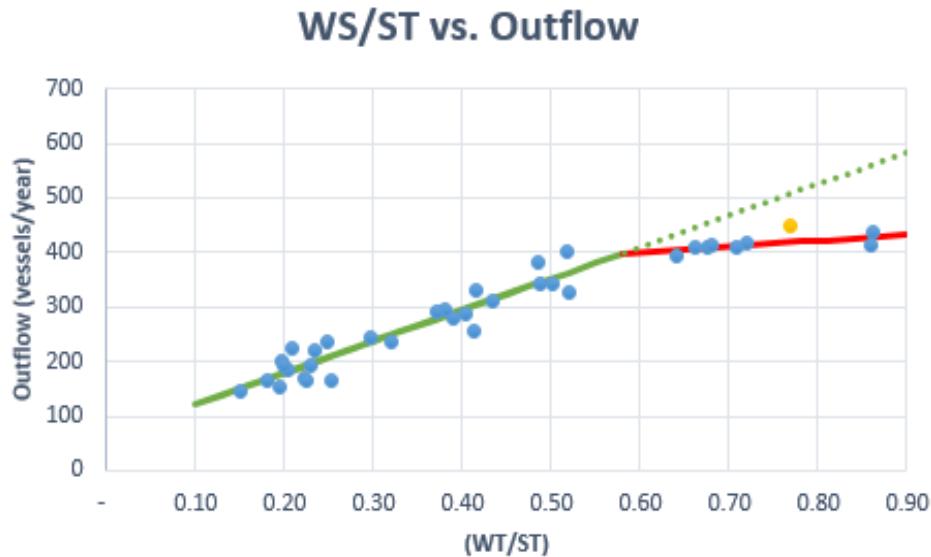


Figura 22 – Comportamento do sistema simulado para variações de demanda

Elaborado pelo autor

A Figura 22 demonstra em azul os valores de desempenho simulados, em verde, a melhor reta para o estado descongestionado (em pontilhado sua projeção) e em vermelho a reta para os pontos no estado congestionado. O sistema real pode ser visualizado no ponto em amarelo.

A análise do gráfico permite inferir que, se o *outflow* aumenta, ocorre uma maior probabilidade de ocorrência de fila fazendo os tempos de espera (WT) aumentarem. Assim, a reta de regressão dos dados de WT/ST se inclina para a horizontal.

A Figura 23 permite analisar a relação entre o tempo médio de espera a medida que o *outflow* aumenta.

Destaca-se aqui a relação da Figura 23 com a Figura 3 (a). Uma vez que os tempos de espera ganham um formato exponencial, os custos relativos a espera da embarcação também obedecem a este padrão.

A alteração do estado congestionado para o estado crítico ocorre com *outflow* em cerca de 400 navios demandados para berço, demonstrando que o sistema está operando já no estado congestionado, e com tempo de espera superior as 6 horas. Esse resultado explica a busca por investimentos no terminal.

Considerando a capacidade como o ponto de intersecção sob a relação WT/ST igual 0,57, e considerando tempo médio de serviço de 12,5 h:

$$WT_{cap} = 0,57 * 12,5 = 7h \quad (5.1)$$

Esse resultado encontra-se próximo ao considerado para o cálculo de capacidade

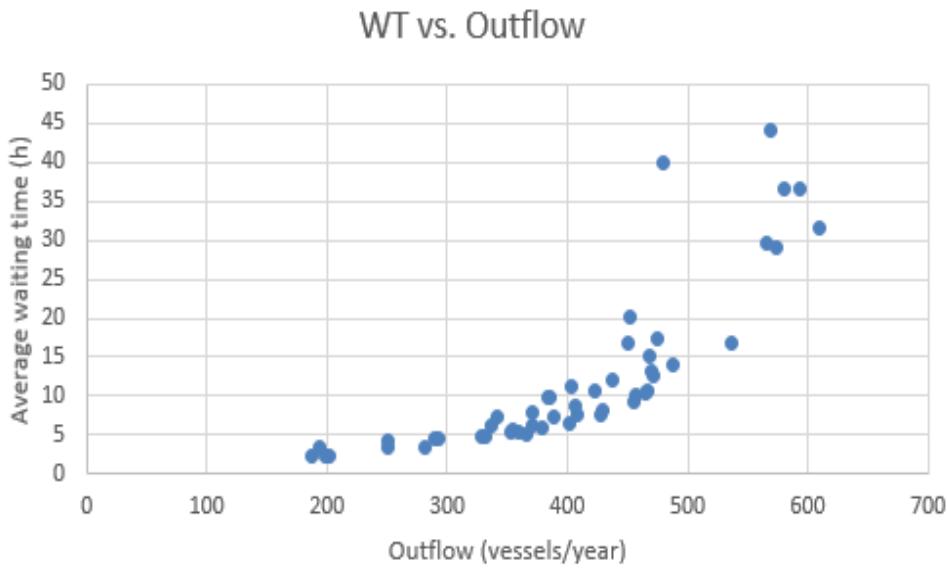


Figura 23 – Aumento do tempo de espera em relação ao aumento do *outflow*  
Elaborado pelo autor

realizado no Plano Mestre de Salvador (BRASIL, 2018b), e de acordo com Brasil (2018c), com tempo adimissível de espera próximo a 6 horas.

Para a cálculo da capacidade de movimentação, multiplica-se o  $outflow_{cap}$ , número de navios da transição dos estados normal para congestionado, pelo lote médio (LM) observado nas movimentações, conforme a Equação 2.2. Para a conversão da movimentação de uns para TEUs, no utilizou-se o fator médio de 1,57 TEUs/un verificado para o TECON Salvador em 2018:

$$Cap = outflow_{cap} * LM \quad (5.2)$$

$$Cap = 400 * 409 * 1.57 = 256.852 TEUs/ano \quad (5.3)$$

### 5.3 Cenário de expansão de infraestrutura

Aqui apresenta-se os resultados da simulação contendo a expansão referenciada na Seção 3.2.1. Para a caracterização da expansão, considera-se que o novo Berço do terminal irá operar sob as mesmas condições do Berço 611. Para a caracterização dos resultados, foram realizadas 20 simulações. A Tabela 16 exibe o resultado das primeiras 5 simulações.

Tabela 16 – Exemplo dos 5 primeiros registros de simulações anuais com expansão - Berço 611

#	Lote médio (uns/navio)	Produtividade média (uns/h)	Tempo médio inoperante (h)	Outflow (navios/ano)	Tempo médio de Espera (h)	$\rho$
0	398,40	47,81	3,18	388	1,73	27,0%
1	419,71	45,80	3,23	459	1,95	35,2%
2	402,26	48,35	3,21	513	1,83	36,2%
3	414,10	48,03	3,17	532	1,98	38,6%
4	403,98	47,67	3,18	482	2,00	35,2%

Elaborado pelo autor

A Figura 24 mostra o regime de filas no decorrer de um ano de simulação no Berço 611 com a expansão.

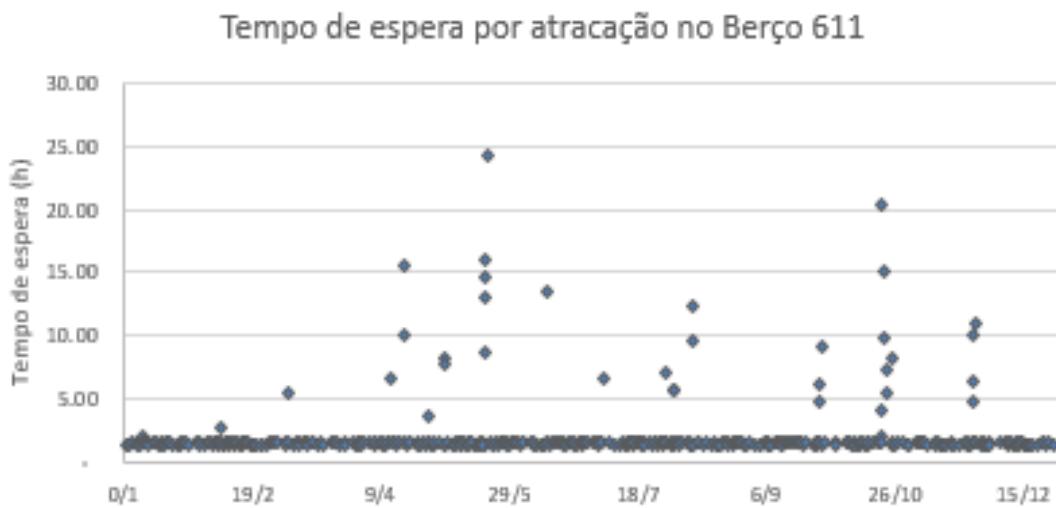


Figura 24 – Regime de filas em um ano de simulação no Berço 300

Elaborado pelo autor

A média das métricas de desempenho para 20 simulações:

- *Outflow*: 420 navios/ano.
- *AWT*: 1,9 h.
- *Ocupação ( $\rho$ )*: 31 %.

Constata-se através da simulação que a operacionalização do novo berço, se operado sob mesma demanda de navios, diminuirá em cerca de 80% do tempo médio de espera, de 8,8 horas para 1,75 horas.

## 5.4 Comportamento do sistema com expansão

Conforme feito para o cenário atual, foram geradas simulações alterando o tempo entre chegadas sucessivas das embarcações para caracterizar o comportamento do novo

sistema. A Figura 25 demonstra o comportamento da relação WT/ST pela demanda de navios (*outflow*).

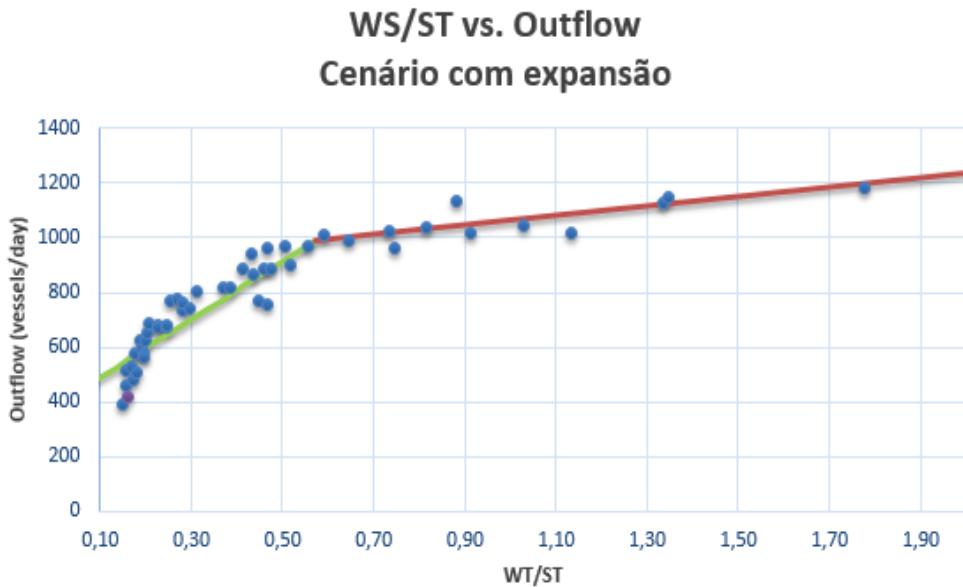


Figura 25 – Comportamento do sistema com expansão simulado para variações de demanda

Elaborado pelo autor

A Figura 25 demonstra em azul os valores de desempenho simulados, em verde, a melhor reta para o estado descongestionado e em vermelho a melhor reta para os pontos no estado congestionado. O cenário de demanda atual com expansão está pintado em roxo.

Destaca-se que, assim como no cenário atual, o encontro dos estados congestionado e normal se dá com uma relação WT/ST próxima de 0,57, o que resulta num tempo de espera admissível 7 horas, conforme a Equação 5.1

Para uma outra visualização da relação entre o tempo médio de espera e o *outflow*, demonstra-se a Figura 26.

Para a cálculo da capacidade de movimentação, multiplica-se o  $outflow_{cap}$ , número de navios da transição dos estados normal para congestionado, pelo lote médio (LM) observado nas movimentações. Para a conversão da movimentação de uns para TEUs, no utilizou-se o fator médio de 1,57 TEUs/uns verificado para o TECON Salvador em 2018:

$$Cap = 847 * 409 * 1,57 = 544.234 TEUs/ano \quad (5.4)$$

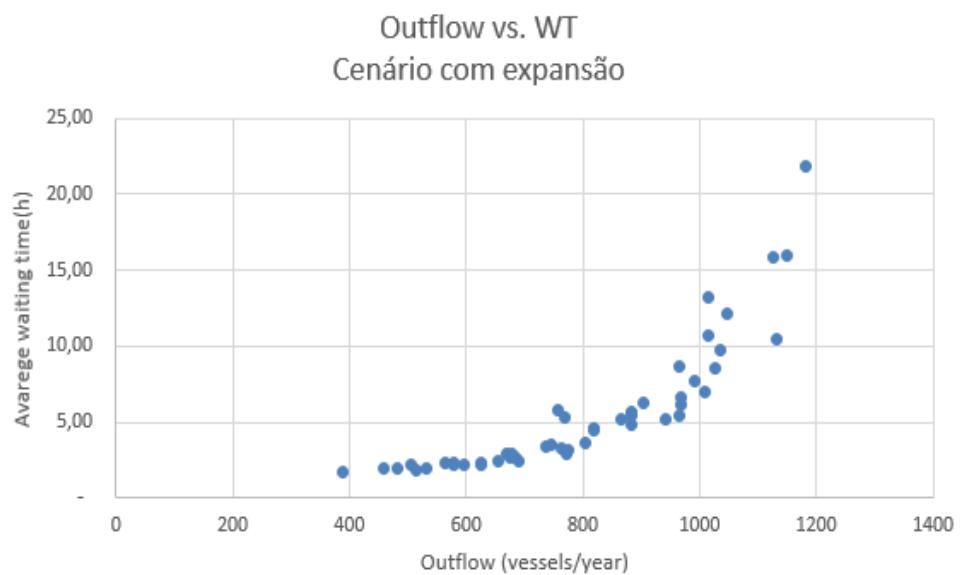


Figura 26 – Aumento do tempo de espera em relação ao aumento do *outflow* - Cenário com expansão

Elaborado pelo autor



# 6 Conclusões

Por conseguinte, analisando o supracitado, conclui-se que o modelo de simulação realizado para presente estudo resultou em métricas de desempenho semelhantes ao modelo real, indicando que as métricas de construção e o modelo em si estão condizentes com a realidade operacional do Porto.

Sendo assim, verifica-se que o TECON de Salvador está operando um pouco acima da capacidade ótima de movimentação. Tal fato explica a necessidade de expansão, uma vez que a frota futura tende para navios maiores (Post-Panamax) os quais não atracam no Berço 300.

Considerando o ponto ótimo de movimentação, obtido através de análise do comportamento do sistema, calcula-se que a capacidade de movimentação atual do Berço 611 é de aproximadamente 256 mil TEUS.

A operacionalização de mais um berço nos moldes do Berço 611 trará um incremento de capacidade de 290 mil TEUS/ano, totalizando capacidade de 544 mil TEUs/ano ao final da expansão de cais.

Sendo assim, após a conclusão das obras, sob as mesmas condições de demanda, o tempo médio de espera será reduzido em cerca de 80%.

Adiciona-se ainda, como possível melhoramento para o presente trabalho uma possível implementação dos indicadores financeiros para a verificação dos custos globais analisando-se a demanda que acessa ao Porto.

Outra possível implementação seria avaliar o processo de armazenagem de cargas e a saída das cargas do Porto via modo rodoviário ou, quando houver, ferroviário. Esse incremento na análise também pode ser feito por implementação do *script* mostrado no Anexo B e disponível em: <https://github.com/leoramosbq/DES>.

Além disso, uma outra possível melhoria para o *script* seria a generalização de entrada de dados, assim o *script* poderia evoluir para um programa específico para análise de indicadores portuários.

Foi um prazer inenarrável produzir este documento.



# Referências

- Agerschou, H. *Planning and Design of Ports and Marine Terminals*. Chichester, Inglaterra: John Wiley & Sons, 1983. Citado 3 vezes nas páginas 7, 9 e 10.
- Alfredini, P. *Obras e gestão de portos e obras e costas*. São Paulo, SP, Brasil: Blucher, 2009. Citado na página 1.
- ANTAQ, A. N. de T. A. *Anuário Estatístico*. 2018. Disponível em: <<http://web.antaq.gov.br/Anuario/>>. Acesso em: 2019-03-15. Citado 21 vezes nas páginas 12, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 32, 34, III, IV, V, VI, VII, VIII, IX, X, XI, XII, XIII e XIV.
- Banks, J. *Handbook of simulation: principles, methodology, advances, applications, and practice*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1998. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 13.
- Brasil, E. de Planejamento e L. S. *Plano Nacional de Logística*. Brasília - DF: [s.n.], 2015. Disponível em: <<https://www.epl.gov.br/transporte-inter-regional-de-carga-no-brasil-panorama-2015#>>. Acesso em: 2019-04-11. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 2.
- Brasil, M. dos Transportes Portos e A. C. S. *Plano de desenvolvimento e zoneamento de Salvador&Aratu-Candeias*. Salvador - BA: Planave S.A., 2018. Disponível em: <[http://www.codeba.com.br/eficiente/repositorio/PDZ/pdz\\_completo\\_2018.pdf](http://www.codeba.com.br/eficiente/repositorio/PDZ/pdz_completo_2018.pdf)>. Acesso em: 2019-04-11. Citado 3 vezes nas páginas 16, 20 e 21.
- Brasil, M. dos Transportes Portos e A. C. S. *Plano mestre do Complexo Portuário de Aratu&Salvador*. Florianópolis - SC: LabTrans/UFSC, 2018. Disponível em: <[http://infraestrutura.gov.br/images/SNP/planejamento\\_portuario/planos\\_mestres/PM\\_REL\\_Metodologia\\_08.01.2018.pdf](http://infraestrutura.gov.br/images/SNP/planejamento_portuario/planos_mestres/PM_REL_Metodologia_08.01.2018.pdf)>. Acesso em: 2019-04-11. Citado 12 vezes nas páginas 15, 17, 18, 19, 21, 22, 23, 27, 28, 33, 34 e 42.
- Brasil, M. dos Transportes Portos e A. C. S. *Relatório de metodologia do Plano Mestre*. Florianópolis - SC: LabTrans/UFSC, 2018. Disponível em: <[http://infraestrutura.gov.br/images/SNP/planejamento\\_portuario/planos\\_mestres/PM\\_REL\\_Metodologia\\_08.01.2018.pdf](http://infraestrutura.gov.br/images/SNP/planejamento_portuario/planos_mestres/PM_REL_Metodologia_08.01.2018.pdf)>. Acesso em: 2019-04-11. Citado 3 vezes nas páginas 11, 12 e 42.
- CODEBA, C. das Docas do Estado da B. *Regulamento de exploração dos Portos da CODEBA*. Salvador - BA: [s.n.], 2014. Disponível em: <<http://www.codeba.com.br/eficiente/repositorio/Codeba/4233.pdf>>. Acesso em: 2019-04-11. Citado 6 vezes nas páginas 20, 21, 23, 25, 26 e 34.
- CPBA, C. dos Portos da B. *Normas e Procedimentos da Marinha dos Portos - BA*. [S.l.], 2015. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/cpba/?q=file/npcp-bapdf>>. Acesso em: 2019-04-15. Citado 4 vezes nas páginas 18, 19, 20 e 25.
- Fan, H. S.; Cao, J.-M. Sea space capacity and operation strategy analysis system. *Transportation Planning and Technology*, Taylor & Francis, v. 24, n. 1, p. 49–63, 2000. Citado na página 9.

Frigeri, J. A.; Biachi, M.; Backes, R. G. Um estudo sobre o uso das técnicas de simulação no processo de elaboração e execução dos planejamentos estratégicos e operacionais. 01 2018. Citado 2 vezes nas páginas [3](#) e [12](#).

Geroliminis, N.; Daganzo, C. F. Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: Some experimental findings. *Transportation Research Part B: Methodological*, Elsevier, v. 42, n. 9, p. 759–770, 2008. Citado na página [10](#).

Groenveld, R. *Service Systems in Ports and Inland Waterways*. Delft, Holanda: [s.n.], 1993. Citado 3 vezes nas páginas [8](#), [9](#) e [10](#).

Knoop, V.; Hoogendoorn, S.; Lint, J. V. Routing strategies based on macroscopic fundamental diagram. *Transportation Research Record*, SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, v. 2315, n. 1, p. 1–10, 2012. Citado 2 vezes nas páginas [10](#) e [11](#).

Ligteringen, H. *Planning and funcional design*. Delft, Holanda: TU Delft, 1999. Citado 5 vezes nas páginas [1](#), [2](#), [3](#), [9](#) e [10](#).

Ligteringen, H.; Velsink, H. *Ports and terminals*. [S.l.]: VSSD Delft, Netherlands, 2012. Citado na página [9](#).

Nogueira, F. *Simulação a Eventos Discretos*. [S.l.], 2009. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/epd042/files/2009/02/Simulacao1.pdf>>. Acesso em: 2019-04-11. Citado 2 vezes nas páginas [12](#) e [13](#).

Olba, X. B. et al. *Estimating Port Network Traffic Capacity*. *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin*, v. 42, n. 1, p. 45–53, 2015. Citado 7 vezes nas páginas [2](#), [9](#), [10](#), [11](#), [12](#), [35](#) e [40](#).

Oliveira, D. *Revolução 4.0 nos portos*. 2018. Disponível em: <<https://www.portosenavios.com.br/noticias/portos-e-logistica/revolucao-4-0-nos-portos>>. Citado na página [3](#).

PIANC, W. A. for W. T. I. *Masterplans for the development of existing ports*. [S.l.], 2014. Citado na página [7](#).

Ramos, A. M.; Krueger, C. P. Aplicações de reduções batimétricas gps em levantamentos hidrográficos. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 15, n. 4, p. 615–635, 2009. Citado na página [19](#).

Santana, L. Fluxograma como ferramenta de mapeamento de processos no controle de qualidade de uma indústria de confecção. *Bahia Análise & Dados-Salvador*, v. 13, n. 2, p. 225–238, 2003. Citado na página [31](#).

SANTOS, A. d. et al. Precipitação na cidade de salvador: variabilidade temporal e classificação em quantis. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 31, n. 4, 2016. Citado na página [17](#).

Stahlbock, R.; Voß, S. Operations research at container terminals: a literature update. *OR spectrum*, Springer, v. 30, n. 1, p. 1–52, 2008. Citado na página [3](#).

Teixeira, C. A. N. et al. A cabotagem no brasil. 2018. Disponível em: <<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/conhecimento/noticias/noticia/cabotagem>>. Acesso em: 2019-06-18. Citado na página [1](#).

Triska, Y. Cálculo de capacidade de movimentação de cais portuário: aplicação para terminal de graneis sólidos. 2015. Citado na página [35](#).

UNCTAD, U. N. C. on T. *Trade and development report.* [S.l.], 1985. Citado 2 vezes nas páginas [7](#) e [8](#).

## Anexos



# ANEXO A – Análise de distribuições para construção do modelo

Esta seção se destina ao estudo da variabilidade do tempo médio entre chegadas sucessivas e dos indicadores operacionais das cargas movimentadas. Para o ajuste dos dados as distribuições, auxílio do programa EasyFit, que ajustar os nossos termos em uma ampla gama de distribuições.

## Tempo entre chegadas sucessivas

O tempo entre chegadas sucessivas no Porto de Salvador obteve as seguintes características de distribuição de dados exibidos na Figura 27.

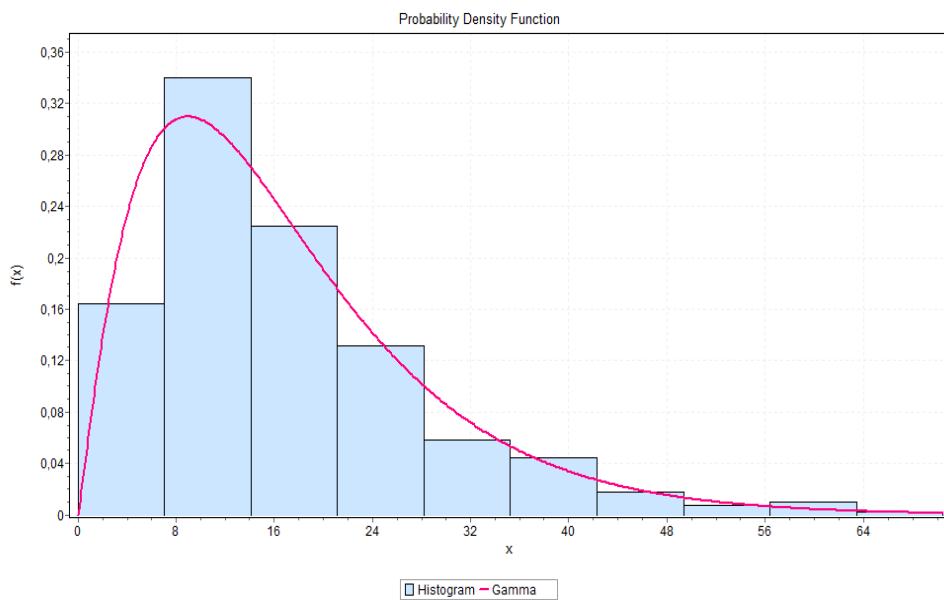


Figura 27 – Distribuição dos registros de tempo entre chegadas de navios (2015-2018).

Fonte: ANTAQ (2018).

Para a simulação, foi adotado a distribuição Gamma, com parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  exibidos na Figura 28 para a geração das embarcações.

Para o nível de significância de  $\alpha$  5%, o teste do chi-quadrado não descartou a aderência da distribuição dos lotes com relação a distribuição Gamma.

## Contêineres movimentados no Berço 611

Nesta seção serão analisadas as distribuições de lotes, produtividades e tempos inoperantes registrados na ANTAQ (2018) para os contêineres movimentados no Berço

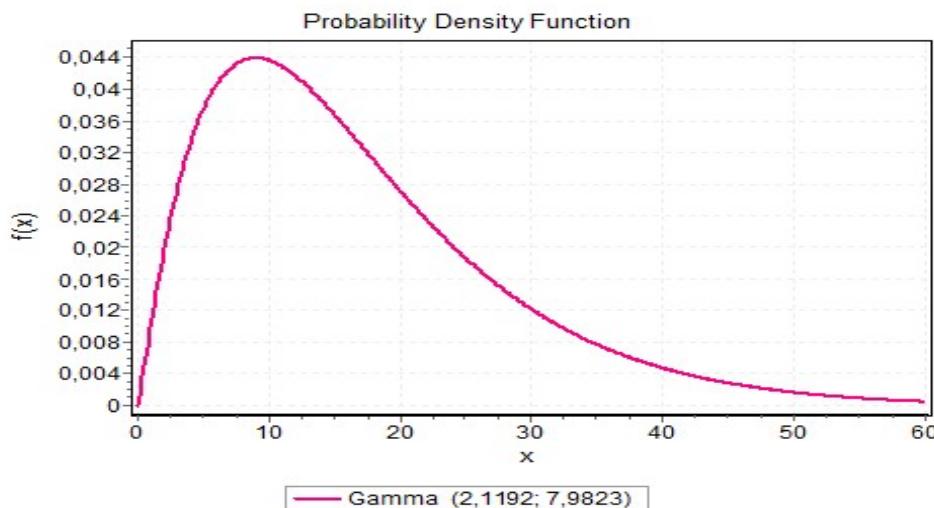


Figura 28 – Análise de distribuição dos registros de tempo entre chegadas sucessivas (2015-2018).

Fonte: ANTAQ (2018). Elaboração: EasyFit.

611.

### Lotes

O lote movimentado nas operações do Berço 611 variou de 25 a 1451 unidades movimentadas. Porém, 87.2 % da amostra encontra-se entre 183 e 817 uns conforme mostra a Figura 29.

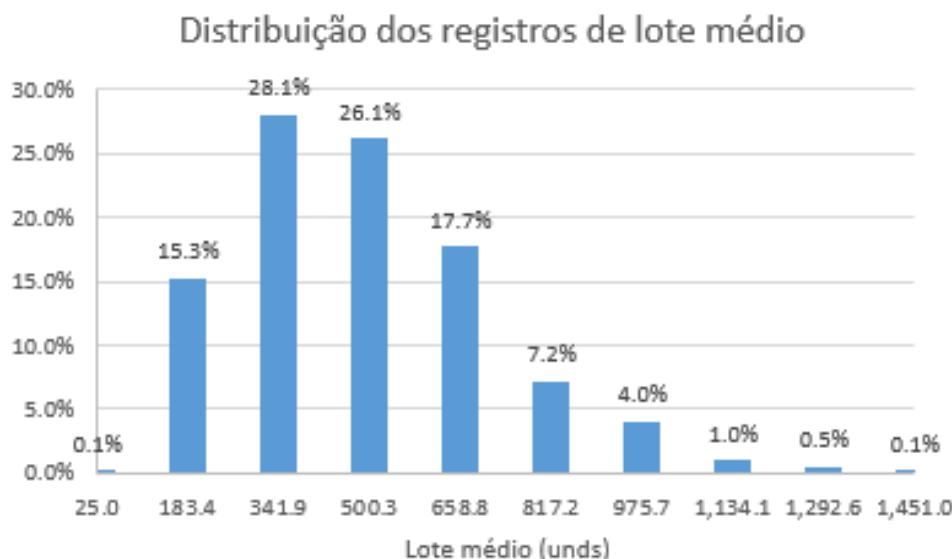


Figura 29 – Distribuição dos registros de lotes movimentados no Berço 611 (2015-2018).

Fonte: ANTAQ (2018).

Para a simulação dos dados foi adotado a distribuição Gamma, com parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  exibidos na Figura 30.

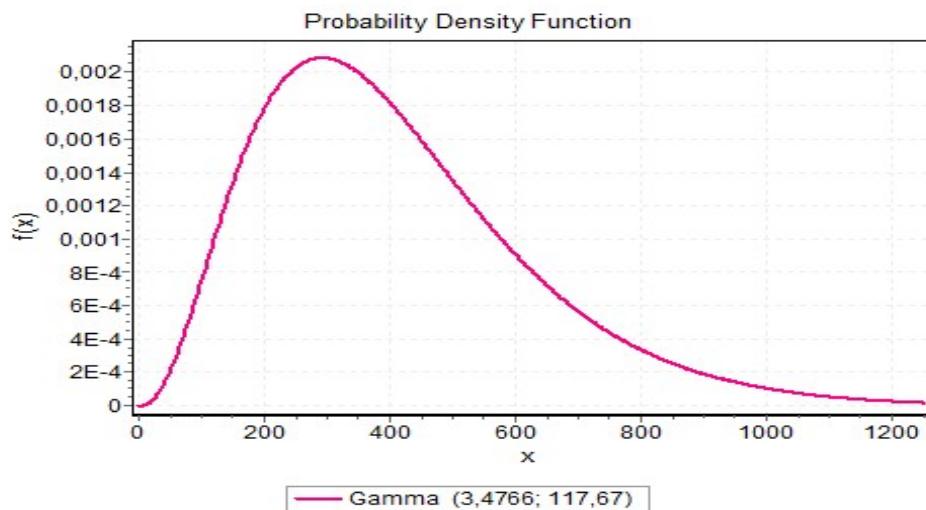


Figura 30 – Análise de distribuição dos registros de lotes no Berço 611 (2015-2018).

Fonte: ANTAQ (2018). Elaboração: EasyFit.

Para o nível de significância de  $\alpha$  5%, o teste do chi-quadrado não descartou a aderência da distribuição dos lotes com relação a distribuição Gamma.

### Produtividade

A produtividade operacional das operações do Berço 611 variou de 7 a 225 uns/h. Entretanto, 99.7 % da amostra encontra-se entre 10 e 100 uns/h e 89% entre 30 e 70 uns/h conforme mostra a 31.

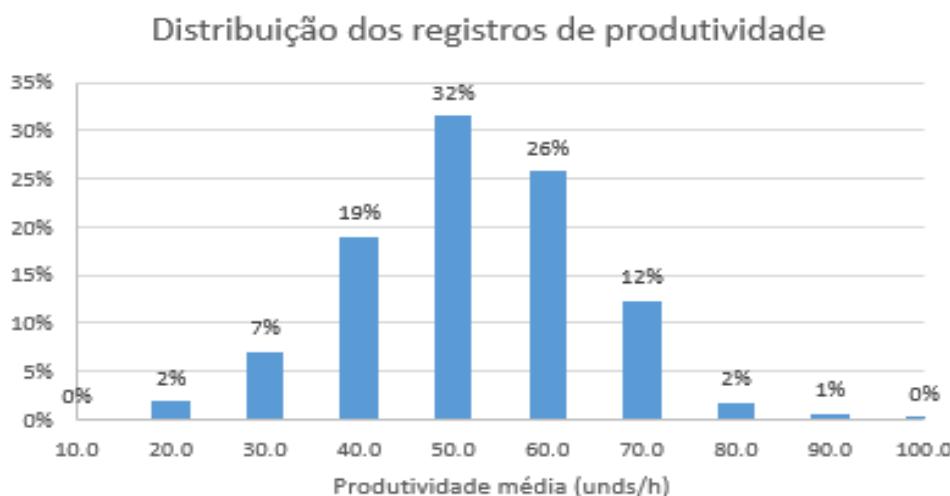


Figura 31 – Distribuição dos registros de produtividades no Berço 611 (2015-2018).

Fonte: ANTAQ (2018).

Para a simulação dos dados foi adotado a distribuição Gamma, com parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  exibidos na Figura 32.

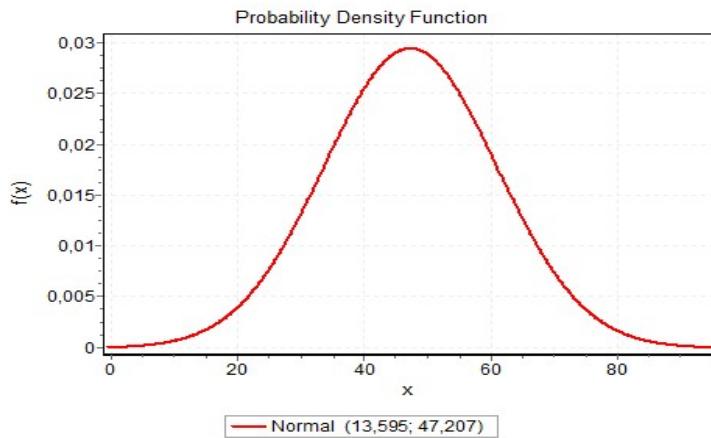


Figura 32 – Análise de distribuição dos registros de produtividades no Berço 611 (2015-2018).

Fonte: ANTAQ (2018). Elaboração: EasyFit.

Para o nível de significância de  $\alpha 5\%$ , o teste de Kolmogorov-Smirnov não descartou a aderência da distribuição dos lotes com relação a distribuição Normal com os parâmetros mostrados na Figura 32.

### Tempos inoperantes

O tempo inoperante pré-operacional das operações do Berço 611 variou de 0<sup>1</sup> a 25h. Entretanto, 88% da amostra está entre 0.3 h e 2 h. A Figura 33 demonstra o comportamento do parâmetro.

Para a simulação dos dados foi adotado a distribuição *LogNormal*, com parâmetros  $\sigma$  e  $\mu$  exibidos na Figura 34.

Para o nível de significância de  $\alpha 1\%$ , o teste do Kolmogorov-Smirnov não descartou a aderência da distribuição dos tempos inoperantes pré-operacionais com relação a distribuição *LogNormal* com os parâmetros mostrados na Figura 34.

No caso do tempo médio inoperante pós-operacionais, os valores foram mais elevados, como mostra a Figura 35.

Para a simulação dos dados foi adotado a distribuição *LogNormal*, com parâmetros  $\sigma$  e  $\mu$  exibidos na Figura 36.

A análise da distribuição do tempo médio pós-operacional não obteve correlação em nenhum dos testes realizados. Contudo, o indicador foi parametrizado com a melhor curva de distribuição disposta, no caso a *LogNormal*.

<sup>1</sup> Apesar da impossibilidade de zero horas para a operação, atracar e no mesmo instante começar a operar, haviam registros na base de atracações que não foram depurados

### Distribuição dos registros do tempo inoperante pré operação

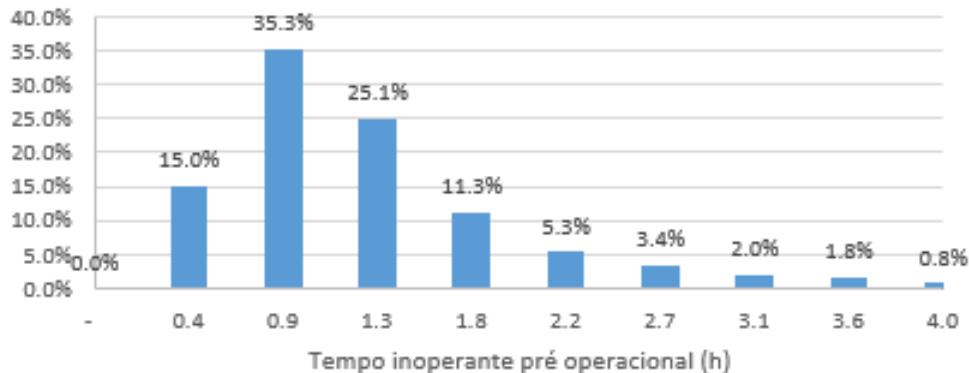


Figura 33 – Distribuição dos registros de tempos pré-operacionais no Berço 611 (2015-2018).

Fonte: ANTAQ (2018).

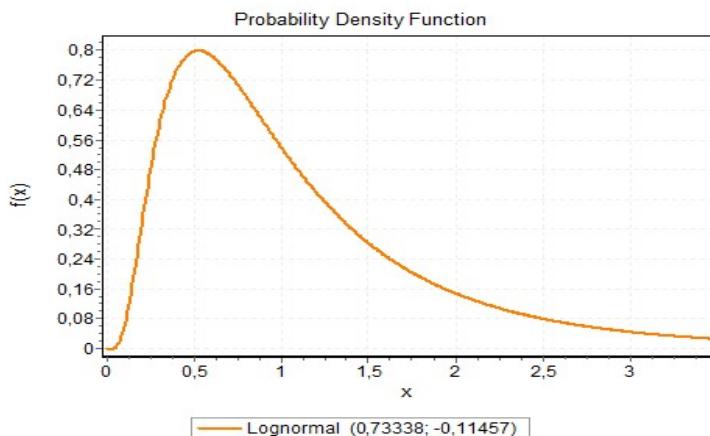


Figura 34 – Análise de distribuição dos registros de tempos pré-operacionais no Berço 611 (2015-2018).

Fonte: ANTAQ (2018). Elaboração: EasyFit.

### Contêineres movimentados no Berço 300

#### Lote médio

O lote movimentado nas operações do Berço 300 variou de 29 a 945 unidades movimentadas. Porém, 85 % da amostra encontra-se entre 100 e 800 uns conforme mostra a Figura 37.

Para a simulação dos dados foi adotado a distribuição normal, com parâmetros  $\sigma$  e  $\mu$  exibidos na Figura 38.

Para o nível de significância de  $\alpha$  20%, nenhum dos 3 testes realizados pelo EasyFit (Anderson-Darling, Kolmogorov-Smirnov e Chi-Quadrado) rejeitou o modelo de distribuição

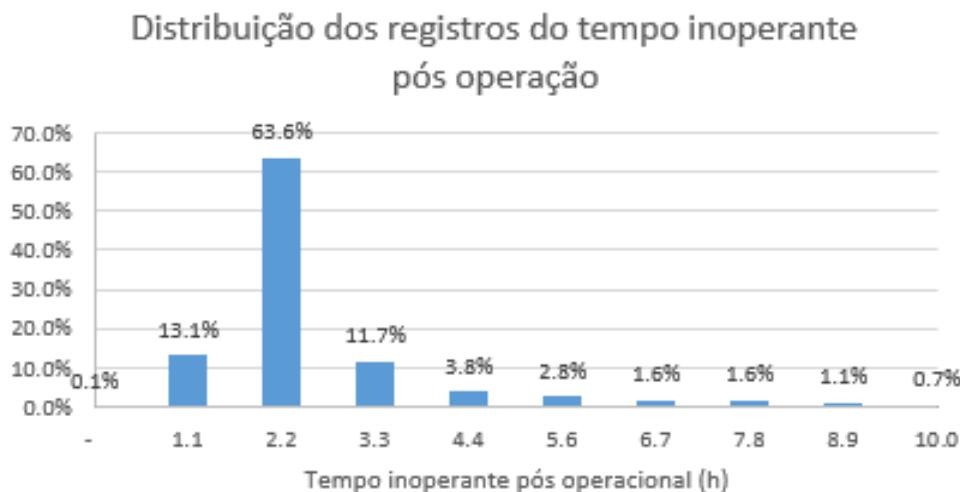


Figura 35 – Distribuição dos registros de tempos pós-operacionais no Berço 611 (2015-2018).

Fonte: ANTAQ (2018).

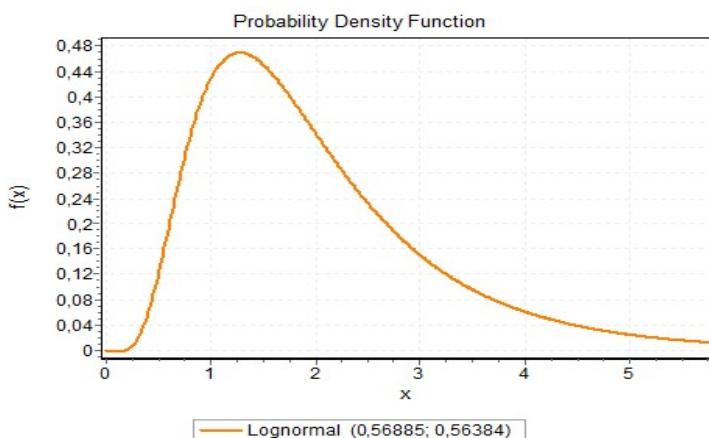


Figura 36 – Análise de distribuição dos registros de tempos pós-operacionais no Berço 611 (2015-2018).

Fonte: ANTAQ (2018). Elaboração: EasyFit.

dos dados.

### Produtividade média

A produtividade operacional das operações do Berço 300 variou de 6 a 147 uns/h. Entretanto, 90.3 % da amostra encontra-se entre 10 e 70 uns/h conforme exibido na Figura 39.

Para a simulação dos dados foi adotado a distribuição Weibull, com parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  exibidos na Figura 40.

Para o nível de significância de  $\alpha$  10%, o teste do Kolmogorov-Smirnov não descartou a aderência da distribuição dos lotes com relação a distribuição Weibull com os parâmetros

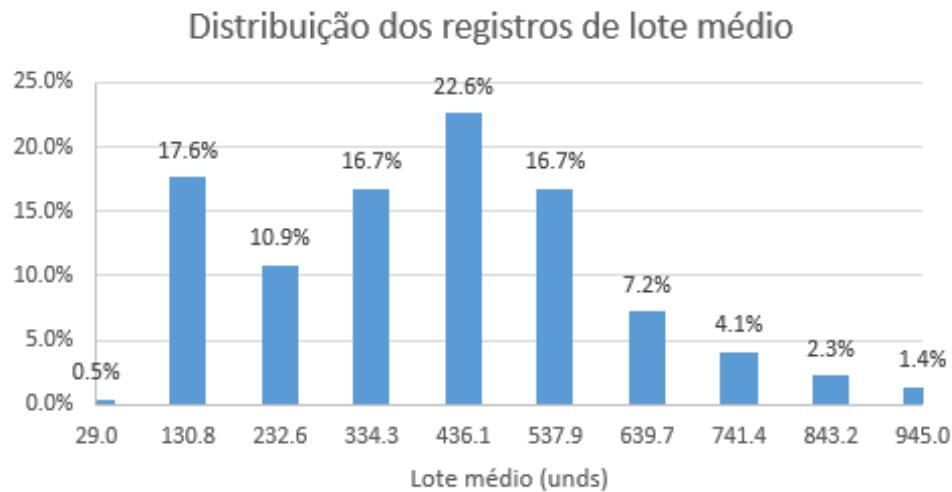


Figura 37 – Distribuição dos registros de lotes movimentados no Berço 300 (2015-2018).

Fonte: ANTAQ (2018).

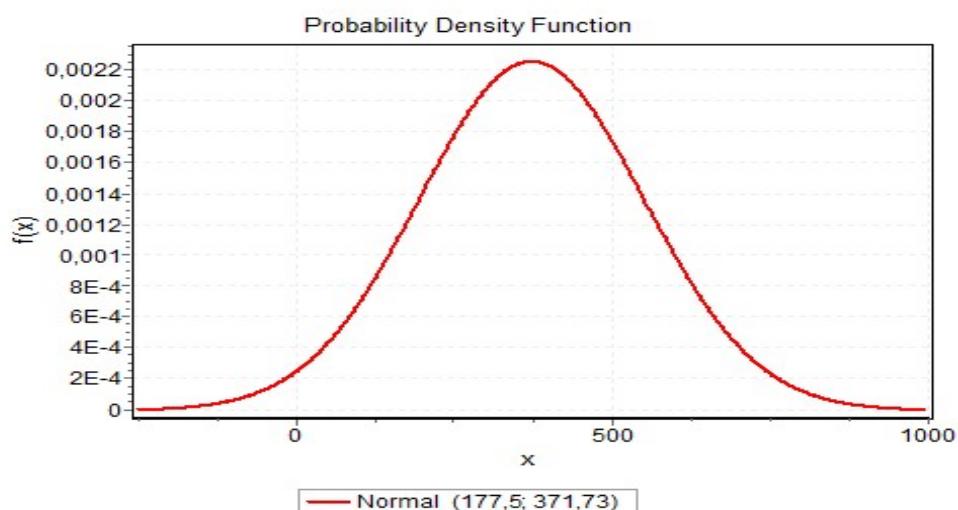


Figura 38 – Análise de distribuição dos registros de lotes no Berço 300 (2015-2018).

Fonte: ANTAQ (2018). Elaboração: EasyFit.

mostrados na Figura 40.

### Tempos inoperantes

Os tempos inoperantes pré-operacionais das operações do Berço 300 variaram de <sup>2</sup> 0 a 20h. Entretanto, 92% da amostra está entre 0.2 h e 9 h. A Figura 41 demonstra o comportamento da métrica de construção.

Para a simulação dos dados foi adotado a distribuição *LogNormal*, com parâmetros  $\sigma$  e  $\mu$  exibidos na Figura 42.

<sup>2</sup> Apesar da impossibilidade de zero horas para a operação, atracar e no mesmo instante começar a operar, haviam registros na base de atracções que não foram depurados

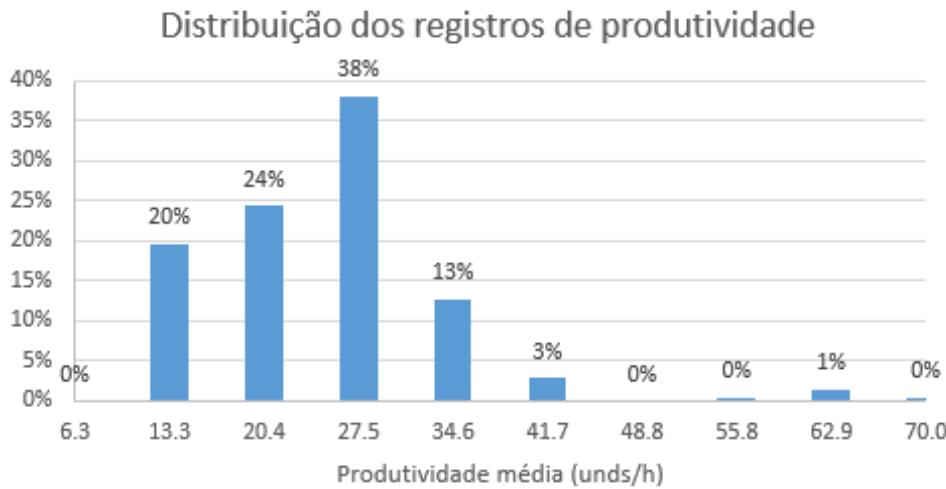


Figura 39 – Distribuição dos registros de produtividades no Berço 300 (2015-2018).

Fonte: ANTAQ (2018).

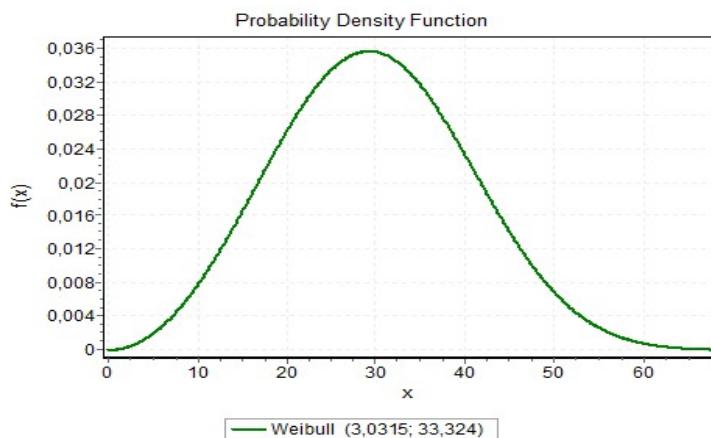


Figura 40 – Análise de distribuição dos registros de produtividades no Berço 300 (2015-2018).

Fonte: ANTAQ (2018). Elaboração: EasyFit.

Para o nível de significância de  $\alpha$  20%, os testes de Kolmogorov-Smirnov e chi-quadrado não descartaram a aderência da distribuição dos tempos com relação a distribuição *LogNormal* com os parâmetros mostrados na Figura 42.

No caso do tempo médio inoperante pós-operacionais, os valores foram mais elevados, como mostra a Figura 43.

Para a simulação dos dados foi adotado a distribuição *LogNormal*, com parâmetros  $\sigma$  e  $\mu$  exibidos na Figura 44.

A análise da distribuição do tempo médio pós-operacional não obteve correlação em nenhum dos testes realizados. Contudo foi parametrizado com a melhor das curvas de distribuição dos dados apresentadas.

### Distribuição dos registros de tempo inoperante pré operacional

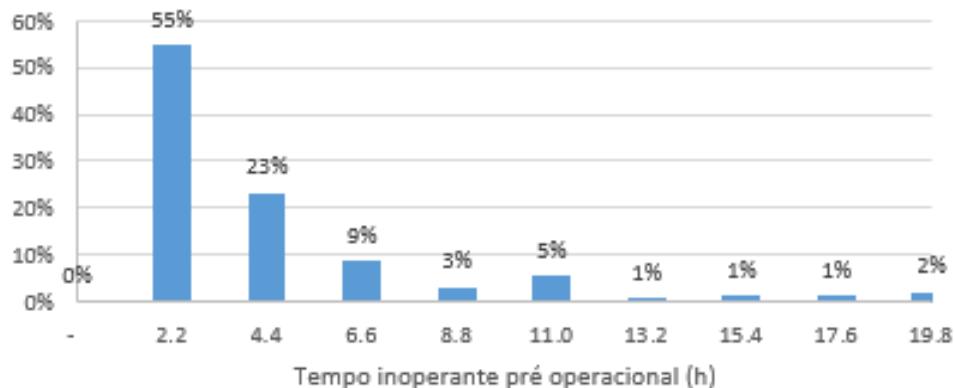


Figura 41 – Distribuição dos registros de tempos pré-operacionais no Berço 300 (2015-2018).

Fonte: ANTAQ (2018).

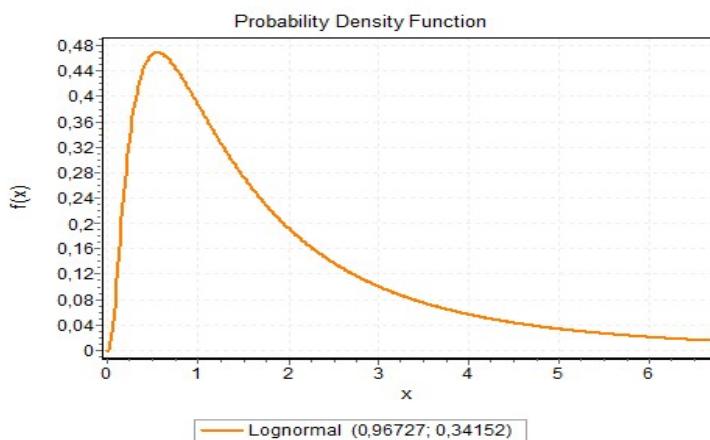


Figura 42 – Análise de distribuição dos registros de tempos pré-operacionais no Berço 300 (2015-2018).

Fonte: ANTAQ (2018). Elaboração: EasyFit.

### Outras cargas gerais movimentadas no Berço 300

#### Tempo médio de atracação

As outras cargas gerais que foram movimentadas no Berço 300 têm uma grande variabilidade de características que interferem de maneiras diferentes nos indicadores operacionais.

Dessa forma, buscou-se apenas aproximar o tempo de permanência das embarcações no cais por meio do estudo de variabilidade do tempo de atracação. Os tempos de atracação das cargas variaram de 4.5 até 370 horas. Porém 90% da amostra está entre 10 e 70 horas.

Para a simulação dos dados foi adotado a distribuição Gamma, com parâmetros  $\alpha$

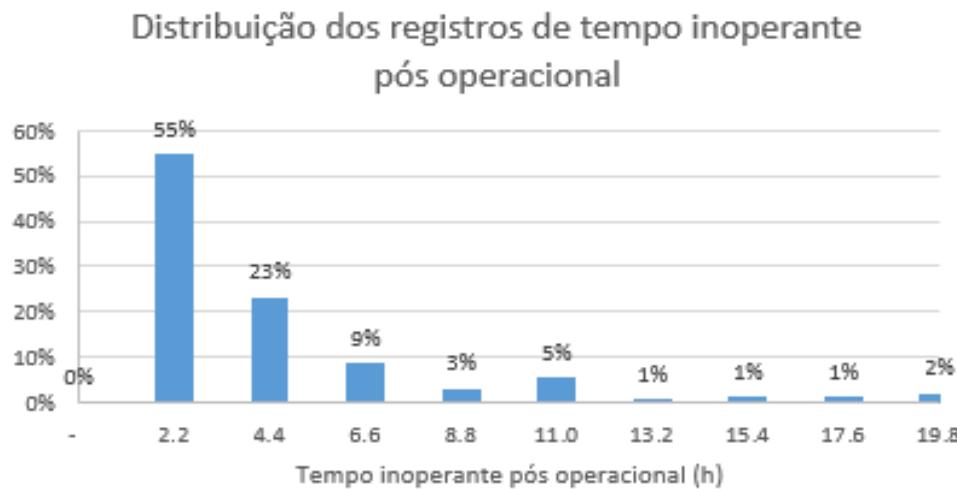


Figura 43 – Distribuição dos registros de tempos pós-operacionais no Berço 300 (2015-2018).

Fonte: ANTAQ (2018).

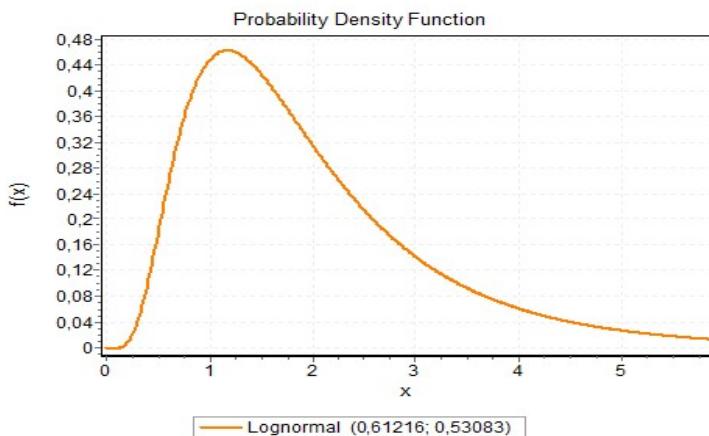


Figura 44 – Análise de distribuição dos registros de tempos pós-operacionais no Berço 300 (2015-2018).

Fonte: ANTAQ (2018). Elaboração: EasyFit.

e  $\beta$  exibidos na Figura 46:

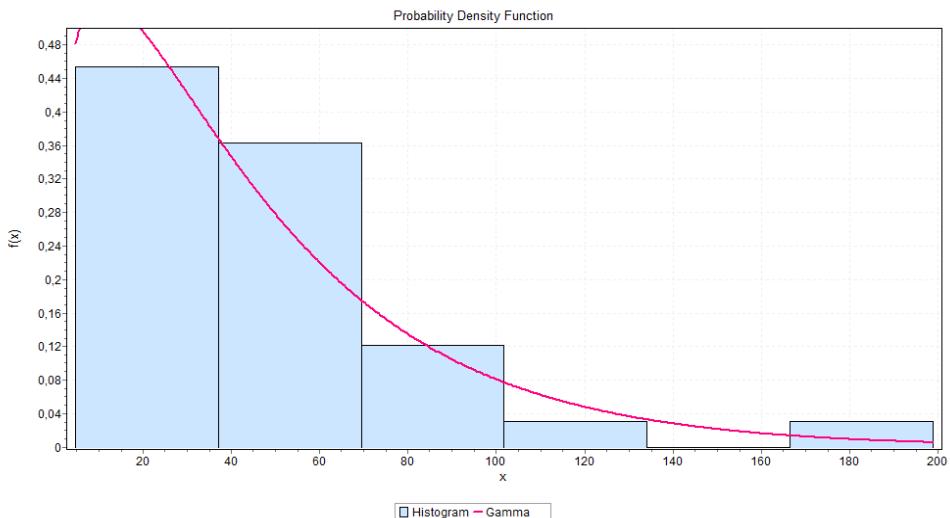


Figura 45 – Distribuição dos registros de tempos de atracação no Berço 300 (2015-2018).

Fonte: ANTAQ (2018).

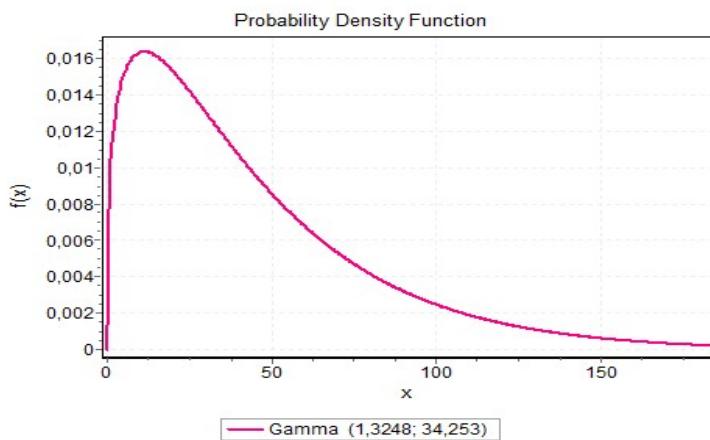


Figura 46 – Análise de distribuição dos registros de tempos de atracação (2015-2018).

Fonte: ANTAQ (2018). Elaboração: EasyFit.

A análise da distribuição dos tempos de atracação obteve aderência para um nível de significância  $\alpha$  de 20% em todos os testes realizados.

Outras cargas movimentadas no Porto.

Tempo médio de atracação

Aqui foram analisados os tempos de permanência no cais das embarcações de trigo, celulose, ferro e aço e demais cargas as quais requisitam outros berços do Porto de Salvador.

Devido ao fato dessas mercadorias solicitarem apenas o canal de acesso no modelo de simulação, ou seja, não se destinam ao TECON Salvador (objeto da análise de simulação), há simplificação para considerar apenas o tempo de atracação diretamente.

A Figura 47 demonstra a distribuição de probabilidade dos tempos de atracação nos demais berços do Porto de Salvador.

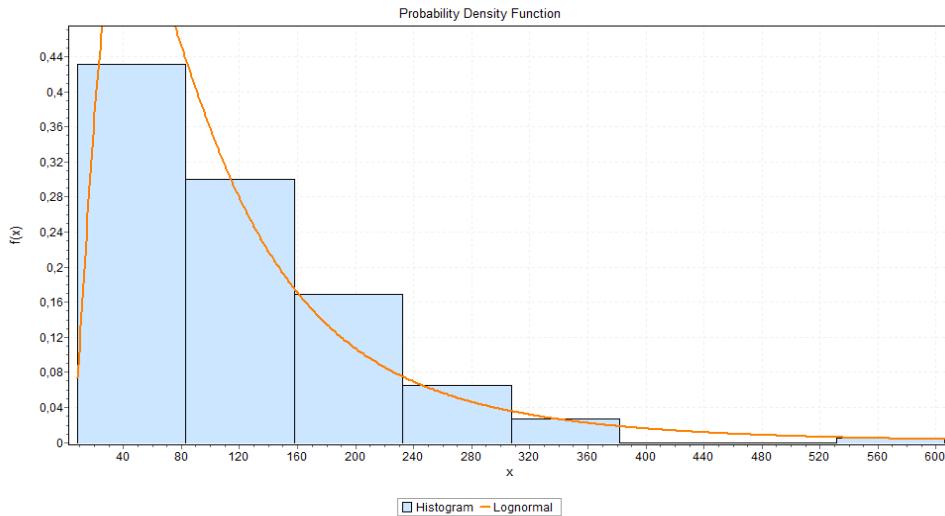


Figura 47 – Distribuição dos registros de tempos de atracação nos demais berços do Porto de Salvador (2015-2018).

Fonte: ANTAQ (2018).

É possível inferir através da Figura 47 que a maior parte dos resultados concentra-se entre 10 e 160 horas.

Para a simulação dos dados foi adotado a distribuição *LogNormal*, com parâmetros  $\sigma$  e  $\mu$  exibidos na Figura 48.

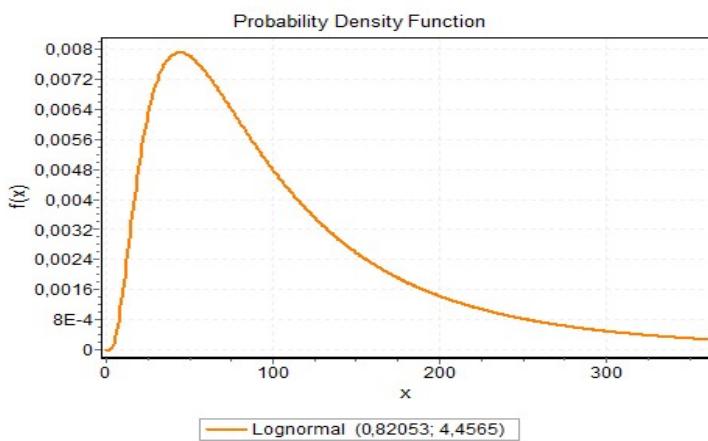


Figura 48 – Análise de distribuição dos registros de tempos de atracação nos demais berços do Porto de Salvador (2015-2018).

Fonte: ANTAQ (2018). Elaboração: EasyFit.

A análise da distribuição dos tempos de atracação obteve aderência para um nível de significância  $\alpha$  de 10% nos testes de Anderson-Darling e Kolmogorov-Smirnov.

## ANEXO B – Script de simulação

# Simulação de eventos discretos

July 16, 2019

## 1 Script de Simulação para operações portuárias

O modelo desenvolvido para simulação das operações portuárias foi escrito em Python utilizando as bibliotecas:

```
In [1]: # --- IMPORTAÇÃO DAS BIBLIOTECAS UTILIZADAS --- #
import simpy
import random
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
```

Primeiro define-se os guichês, os quais serão responsáveis pela formação da fila na área de fundeio.

```
In [2]: # Define o número de guichês
num_berths_300 = 1;
num_berths_611 = 1;
num_channel = 2;
```

```
In [3]: # Definindo os guichês que serão acessados de acordo com o tipo da carga

class channel(object):
    def __init__(self, env, num_channel):
        self.env = env
        self.way = simpy.Resource(env, num_channel)

    def Navigation(self):
        yield self.env.timeout(random.randint(76,104))

class berth_300(object):
    def __init__(self, env, num_berths):
        self.env = env
        self.berth = simpy.PriorityResource(env, capacity=num_berths)

class berth_611(object):
    def __init__(self, env, num_berths):
        self.env = env
```

```

        self.berth = simpy.Resource(env, num_berths)
# ---

A classe Navios ('ship') vai conter as características de movimentação

In [4]: # Definindo parâmetros intrínsecos a movimentação
# (1.name;2.cargo;3.weight;4.productivity;5.measurement)

class Ship(object):
    def __init__(self, name, cargo):
        self.name = name
        self.cargo = cargo
        if cargo == 'contêiner':
            self.productivity = random.gauss(47.207,13.595)/60
            self.weight = random.gammavariate(3.4766, 117.67)
            self.measurement = 'und'
            self.pre = random.lognormvariate(-0.11457, 0.73338)*60
            self.pos = random.lognormvariate(0.56384, 0.56885)*60
        elif cargo == 'contêiner-300':
            self.productivity = random.weibullvariate(33.324,3.0315)/60
            self.weight = random.gauss(371.73,177.5)
            self.measurement = 'und'
            self.pre = random.lognormvariate(0.53083, 0.61616)*60
            self.pos = random.lognormvariate(0.34152, 0.96727)*60
        elif cargo == 'outras cargas-300':
            self.atracacao = random.gammavariate(1.3248, 34.253)*60
            self.weight = 1
            self.measurement = 't'
        else:
            self.atracacao = random.lognormvariate(4.4565, 0.82053)*60
            self.weight = 1
            self.measurement = 't'
# ---

```

Essas variações foram implementadas conforme o estudo dos indicadores abordados na Seção 4  
Iniciando as listas para adição dos dados

```
In [5]: # Exportação das métricas de desempenho
metricas611 = []
metricas300 = []
```

Iniciando o índice de reajuste de demanda, para verificação do comportamento do sistema

```
In [6]: # Setup de alteração do reajuste de demanda
reaj = 1
sim = 1
```

Para relembrarmos o processo após a geração da classe Navios:

1. Geração das embarcações conforme a variação do tempo entre chegadas sucessivas
2. Definição da destinação navio conforme sua carga
3. Requisição dos guichês

#### 1.Berço

##### 1.Canal de acesso

4. Simulação do processo de atracação
5. Requisição do canal de acesso para sair
6. Processo finalizado

In [44]: # Definindo o processo do navio

```
def main(env, name, cargo, cn, b300, b611, db):
    # ---

    chegada = env.now

    # Requisição do canal

    with cn.way.request() as req:
        yield req                                # Fila no canal
        yield env.timeout(random.randrange(80,100)) # Tempo de navegação

    # Definição das variáveis da classe navio

    ship = Ship(name, cargo)

    # Definindo requisição dos berços e todo processo de operação
    # a depender do tipo de mercadoria

    if cargo == 'contêiner':
        with b611.berth.request() as r1:
            yield r1                                # Fila para atracar
            atracacao = env.now
            yield env.timeout(ship.pre)              # Pré inoperante
            inicio_operacao = env.now
            yield env.timeout((ship.weight//ship.productivity)) # Ope
            fim_operacao = env.now
            yield env.timeout(ship.pos)              # Pós inoperante
            desatracacao = env.now
            berth='611'
    elif cargo == 'contêiner-300':
```

```

        with b300.berth.request(priority=0) as r2:
            yield r2                                # Fila para atracar
            atracacao = env.now
            yield env.timeout(ship.pre)             # Pré inoperante
            inicio_operacao = env.now
            yield env.timeout((ship.weight//ship.productivity)) # Ope
            fim_operacao = env.now
            yield env.timeout(ship.pos)              # Pós inoperante
            desatracacao = env.now
            berth='300'

    elif cargo == 'outras cargas-300':
        with b300.berth.request(priority=1) as r2:
            yield r2
            atracacao = env.now
            inicio_operacao = env.now
            fim_operacao = env.now
            yield env.timeout(ship.atracacao)
            desatracacao = env.now
            berth='300'

    else:
        atracacao = env.now
        inicio_operacao = env.now
        fim_operacao = env.now
        yield env.timeout(ship.atracacao)
        desatracacao = env.now
        berth='only request channel'

    with cn.way.request() as r3:
        yield r3 # Requisição do canal e adiciona espera ao Tempo Pos Inoperante
        saida = env.now

        db.append([name, cargo, berth, ship.weight, float(chegada),
                   float(atracacao),float(inicio_operacao),float(fim_operacao),
                   float(desatracacao),float(saida)])
```

# ---

# Definindo o processo de destinação

```

def setup(env,num_berths_300,num_berths_611,num_channel,db):
    # Iniciando contagem dos navios
    i=0

    # Criando canal e berços
    cn = channel(env,num_channel)
    b300 = berth_300(env,num_berths_300)
    b611 = berth_611(env,num_berths_611)
```

```

# Criando os navios a cada ~t minutos
while True:
    # Inicia os tempos entre chegadas sucessivas
    alpha = 2.1192#1.9384
    beta = 472.94 #8.8291
    var = (random.gammavariate(alpha, beta))*reaj

    #Começa com chamada dos navios
    yield env.timeout(var)

    # Nomeia o navio
    name = 'Navio %i' %i

    # Primeira coisa a se fazer é definir a carga
    cargo_choice = random.randrange(0,100)

    if (cargo_choice < 79): # 79% de contêineres para Berço 611
        cargo = 'contêiner'
    elif (79 <= cargo_choice < 87):
        cargo = 'contêiner-300' #8% de chance de contêiner - Berço 300
        prio = 0
    elif (87 <= cargo_choice < 97):
        cargo = 'outras cargas' # 11% de só acessarem o canal
    else:
        cargo = 'outras cargas-300' #2% de outras cargas - Berço 300
        prio = 1

    # Chama o processo principal
    env.process(main(env, name, cargo,cn,b300,b611,db))

    # Atualiza o contador
    i += 1
    ----

# ÍNÍCIO DO SETUP PARA SIMULAÇÃO

# Aqui iniciaremos os inputs para dar inicio a geração aleatoria
# dos dados segundo as distribuições estudadas
# Para a simulação do cenário atual, identificamos os Berços do
# Tecon Salvador com apenas um guichê cada um e o Canal de Acesso
# com 2 vias.

dataBase = [];

#---

# Cria um ambiente e processa a simulação
#print('Simulação TECON %i'%g)

```

```

env = simpy.Environment()
env.process(setup(env,num_berths_300,num_berths_611,num_channel,dataBase))

# EXECUTA PARA x anos
n_ano=1
env.run(until=n_ano*364*24*60)

# ---
# ANÁLISE DE DADOS
# A seguir é realizado a analise dos dados gerados através da simulação

# Com a base de dados criada podemos calcular
# o tempo médio de espera das embarcações

df = pd.DataFrame(np.matrix(dataBase), columns=['nome', 'carga', 'berco',
'peso', 'chegada','atracacao','inicio_operacao',
', 'fim_operacao', 'desatracaocao','saida'])

# Convertendo os valores dos dados incluidos para 'float'
convert_dict={'peso':float,'chegada':float,'chegada':float,
'atracacao':float,'inicio_operacao':float,'fim_operacao':float,
'desatracaocao':float,'saida':float}
df = df.astype(convert_dict)

#Adição dos indicadores da simulação transformando pra hora

df['tempo_de_espera']=(df['atracacao']-df['chegada'])/60
df['pre_operacional']=(df['inicio_operacao']-df['atracacao'])/60
df['operacional']=(df['fim_operacao']-df['inicio_operacao'])/60
df['pos_operacional']=(df['desatracaocao']-df['fim_operacao'])/60
df['pos_operacional_s']=(df['saida']-df['fim_operacao'])/60
df['atracacao']=(df['desatracaocao']-df['atracacao'])/60
df['produtividade']=(df['peso']/df['operacional']) # Operacional

#Para a análise de dados, analisa-se o Berço 611, gargalo do sistema
#Filtrando Berço 611

b611=df[df['carga'] == 'contêiner']

te_c_611 = b611[['tempo_de_espera']]
pre_c_611 = b611[['pre_operacional']]
ope_c_611 = b611[['operacional']]
pos_c_611 = b611[['pos_operacional']]
atrac_c_611 = b611[['atracacao']]
lote_c_611 = b611[['peso']]
prod_c_611 = b611[['produtividade']]

#Filtrando Contêineres Berço 300

```

```
b300=df[df['carga'] == 'contêiner-300']

te_c_300 = b300[['tempo_de_espera']]
pre_c_300 = b300[['pre_operacional']]
ope_c_300 = b300[['operacional']]
pos_c_300 = b300[['pos_operacional']]
atrac_c_300 = b300[['atracação']]
lote_c_300 = b300[['peso']]
prod_c_300 = b300[['produtividade']]
```

*#Filtrando Contêineres Outras cargas 300*

```
b2300=df[df['carga'] == 'outras cargas-300']

te_c_2300 = b2300[['tempo_de_espera']]
pre_c_2300 = b2300[['pre_operacional']]
ope_c_2300 = b2300[['operacional']]
pos_c_2300 = b2300[['pos_operacional']]
atrac_c_2300 = b2300[['atracação']]
lote_c_2300 = b2300[['peso']]
prod_c_2300 = b2300[['produtividade']]
```

*#Métricas de construção*

*#Berço 611*

```
lmC611 = lote_c_611.mean()
inopreC611 = pre_c_611.mean().values
inoposC611 = pos_c_611.mean().values
prodC611 = prod_c_611.mean()
inop611=inopreC611+inoposC611
```

*#Berço 300 - CTNER*

```
lmC300 = lote_c_300.mean()
inopreC300 = pre_c_300.mean().values
inoposC300 = pos_c_300.mean().values
prodC300 = prod_c_300.mean()
inop300=inopreC300+inoposC300
```

*#Berço 300 - Outras cargas*

```
tma2300 = atrac_c_2300.mean()
```

*# Métricas de desempenho*

*#Berço 611*

```

#Tempo médio de espera e Outflow
tme611 = te_c_611.mean()
out611 = te_c_611.count()

#Indice de ocupação do cais
tempo_ocupado611 = atrac_c_611.sum().values
tempo_disponivel611=num_berths_611*n_ano*364*24
p611 = (tempo_ocupado611/tempo_disponivel611)

#Berço 300

#Tempo médio de espera e Outflow
tme300 = te_c_300.mean()
tme2300 = te_c_2300.mean()
out300 = te_c_300.count()
out2300 = te_c_2300.count()
out3300 = out2300.values + out300.values

#Indice de ocupação do cais
tempo_ocupado300 = atrac_c_300.sum().values
tempo_ocupado2300 = atrac_c_2300.sum().values
tempo_ocupado3300 = tempo_ocupado2300 + tempo_ocupado300

tempo_disponivel300=num_berths_300*n_ano*364*24

p300 = (tempo_ocupado300/tempo_disponivel300)
p2300 = (tempo_ocupado2300/tempo_disponivel300)
p3300 = (tempo_ocupado3300/tempo_disponivel300)

print('--- Simulação %s Concluída com Sucesso ---' % sim)

print('\nMétricas de construcao: \n')

print('Berço 611: \n')

print('Contêineres: \n')

print('Lote médio: %f unds/navio' % lmC611)
print('Produtividade média: %f und/h' % prodmC611)
print('Tempo inoperante médio pré operacional: %f horas' % inopreC611)
print('Tempo inoperante médio pós operacional: %f horas' % inoposC611)

print('\nBerço 300: \n')

print('Contêineres: \n')

print('Lote médio: %f unds/navio' % lmC300)

```

```

print('Produtividade média: %f und/h' % prodmC300)
print('Tempo inoperante médio pré operacional: %f horas' % inopreC300)
print('Tempo inoperante médio pós operacional: %f horas' % inoposC300)

print('\nOutras cargas gerais: \n')

print('Tempo de atracação: %f h' % tma2300)

print('\nMétricas de desempenho: \n')

print('Berço 611: \n')

print('Outflow: %i navios' % out611)
print('Tempo médio de espera: %f horas' % tme611)
print('Índice de ocupação (rô): %f \n' % p611)

print('Berço 300: \n')

print('Outflow: %i navios' % out3300)
print('Tempo médio de espera (Contêineres): %f horas' % tme300)
print('Tempo médio de espera (Outras Cargas): %f horas' % tme2300)
print('Índice de ocupação (rô): %f \n' % p3300)

metricas611.append([reaj,sim,float(lmC611.values),float(prodmC611.values),
float(inop611),float(out611.values),float(tme611.values),float(p611)])
metricas300.append([reaj,sim,float(lmC300.values),float(prodmC300.values),
float(inop300),float(out3300),float(tme300.values),float(p3300),
float(tme2300.values)])
sim += 1

```

--- Simulação 20 Concluída com Sucesso ---

Métricas de construção:

Berço 611:

Contêineres:

Lote médio: 416.938701 unds/navio  
 Produtividade média: 46.811371 und/h  
 Tempo inoperante médio pré operacional: 1.189266 horas  
 Tempo inoperante médio pós operacional: 2.100522 horas

Berço 300:

Contêineres:

Lote médio: 413.479490 unds/navio

Produtividade média: 33.272295 und/h  
Tempo inoperante médio pré operacional: 2.094507 horas  
Tempo inoperante médio pós operacional: 2.667159 horas

Outras cargas gerais:

Tempo de atracação: 50.846926 h

Métricas de desempenho:

Berço 611:

Outflow: 417 navios  
Tempo médio de espera: 12.938964 horas  
Índice de ocupação (rô): 0.632338

Berço 300:

Outflow: 46 navios  
Tempo médio de espera (Contêineres): 4.531456 horas  
Tempo médio de espera (Outras Cargas): 1.522917 horas  
Índice de ocupação (rô): 0.135198

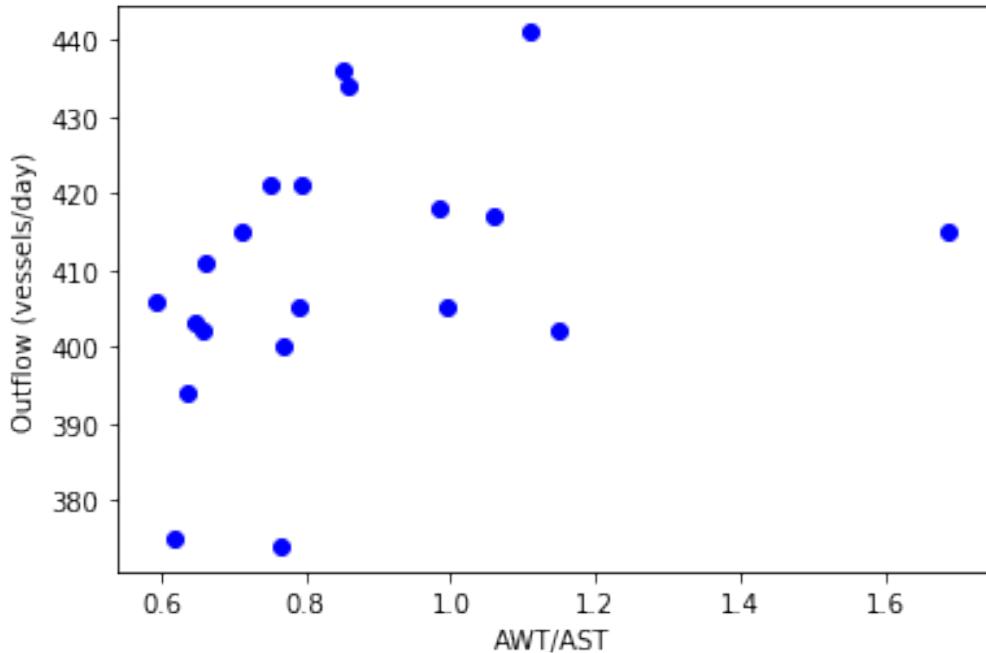
```
In [45]: #611
m611 = pd.DataFrame(metricas611,columns=['Variação_TCS', 'N_sim', 'Lote_medio',
'Produtividade', 'T_Inoperante', 'Outflow', 'AWT', 'p'])

m611['AST']=((m611['Lote_medio']/m611['Produtividade'])+m611['T_Inoperante'])
m611['WT/ST']=(m611['AWT']/m611['AST'])

with pd.ExcelWriter('metricas_611.xlsx') as writer: # doctest: +SKIP
    m611.to_excel(writer)

    plt.plot(m611['WT/ST'],m611['Outflow'],'bo')
    plt.xlabel('AWT/AST')
    plt.ylabel('Outflow (vessels/day)')
    plt.title('Desempenho Berço 611 \n AWT/AST vs. Outflow (vessels/day)\n')
    plt.show()
```

Desempenho Berço 611  
AWT/AST vs. Outflow (vessels/day)



In [46]: #300

```
m300 = pd.DataFrame(metricas300,columns=['Variação_TCS', 'N_sim', 'Lote_medio',
'Produtividade', 'T_Inoperante', 'Outflow', 'AWT_C', 'p','AWT_O'])

m300['AST']=((m300['Lote_medio']-m300['Produtividade'])+m300['T_Inoperante'])
m300['WT/ST']=(m300['AWT_C']/m300['AST'])

with pd.ExcelWriter('metricas_300.xlsx') as writer2: # doctest: +SKIP
    m300.to_excel(writer2)

plt.plot(m300['WT/ST'],m300['Outflow'],'bo')
plt.xlabel('AWT/AST')
plt.ylabel('Outflow (vessels/day)')
plt.title('Desempenho Berço 300 \n AWT/AST vs. Outflow (vessels/day)\n')
plt.show()
```

Desempenho Berço 300  
AWT/AST vs. Outflow (vessels/day)

