

Universidade Federal do Maranhão  
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas  
Curso de Ciência da Computação

**DAYSON NYWTON CORRÊA RODRIGUES DO NASCIMENTO**

PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE BERÇOS: COMPARANDO  
DIFERENTES POLÍTICAS ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO

São Luís  
2016

**DAYSON NYWTON CORRÊA RODRIGUES DO NASCIMENTO**

**PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE BERÇOS: COMPARANDO  
DIFERENTES POLÍTICAS ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO**

Monografia apresentada ao curso de Ciência da Computação da Universidade Federal do Maranhão, como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Bacharel em Ciência da Computação.

Orientador: Prof<sup>o</sup> Alexandre César Muniz de Oliveira

São Luís

2016

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).  
Núcleo Integrado de Bibliotecas/UFMA

Nascimento, Dayson Nywton Corrêa Rodrigues do.

Problema de Alocação de Berços: Comparando diferentes políticas através de simulação / Dayson Nywton Corrêa Rodrigues do Nascimento. - 2016.

51 f.

Orientador(a): Alexandre César Muniz de Oliveira.

Monografia (Graduação) - Curso de Ciência da Computação, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2016.

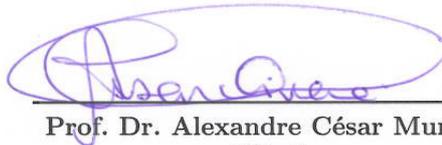
1. Pesquisa Operacional. 2. Problema de Alocação de Berços. 3. Simulação. I. Oliveira, Alexandre César Muniz de. II. Título.

Dayson Nywton Corrêa Rodrigues do Nascimento

## **Problema de Alocação de Berços: Comparando diferentes políticas através de simulação**

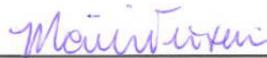
Monografia apresentada ao curso de Ciência da Computação da Universidade Federal do Maranhão, como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Bacharel em Ciência da Computação.

Trabalho aprovado. São Luís, 08 de agosto de 2016:



---

**Prof. Dr. Alexandre César Muniz de Oliveira**  
Orientador  
Universidade Federal do Maranhão



---

**Prof. Dr. Mário Antonio Meireles Teixeira**  
Universidade Federal do Maranhão



---

**Prof. Dr. Carlos de Salles Soares Neto**  
Universidade Federal do Maranhão



---

**Prof. Dr. Paulo Rogério de Almeida Ribeiro**  
Universidade Federal do Maranhão

São Luís  
2016

*Este trabalho é dedicado aos meus pais que  
foram meus suporte e alicerce durante toda a vida .*

# Agradecimentos

Agradeço aos meus pais pelo apoio incondicional nos bons e maus momentos, pelo amor, carinho e sustento todo esse tempo. Serei eternamente grato.

Agradeço a toda minha família pelo convívio duradouro, por todo apoio e por serem sempre presentes na minha vida.

Agradeço a todos os amigos: os de infância, do colégio, da Vale, do Ciências sem Fronteiras, da UEMA e da UFMA, em especial os do PET, do LACMOR e da turma 2010.1. Seria impossível listar todos vocês aqui sem esquecer um ou outro.

Agradeço ao meu orientador, Professor Alexandre Oliveira pelo acompanhamento desde o início do curso, sendo tutor no PET-Computação e orientador no LACMOR.

Agradeço todos os professores da UFMA pelo comprometimento e paciência durante toda essa minha jornada.

Agradeço a Vale, por todo conhecimento prático aplicado, pela experiência adquirida e pelo fornecimento dos dados utilizados neste trabalho.

Agradeço ao Programa de Educação Tutorial - PET - pela composição do programa, pelo amadurecimento conseguido nos dois anos de adesão e pelo ambiente proporcionado.

Por último, ao CNPq e ao Governo Federal pelo programa Ciências sem Fronteiras.

*“Só o acaso pode ser interpretado como uma mensagem.  
Aquilo que acontece por necessidade,  
aquilo que é esperado e que se repete todos os dias,  
não é senão uma coisa muda. Somente o acaso tem voz.”*  
*(Milan Kundera)*

# Resumo

O Problema de Alocação de Berços tem se tornado bastante conhecido entre trabalhos de Pesquisa Operacional. Definir tempo e posição de atracação (berço) de navios deve ser uma decisão que considere algumas variáveis específicas do problema (como tempo de carregamento e descarregamento, variação de estoque e de carga embarcada) para um resultado adequado às necessidades do Terminal Portuário. Fazendo uso do *Arena Software* para simulação, este trabalho descreve e analisa o comportamento de quatro políticas de atracação que se encaixem ao modelo criado a partir de dados obtidos da Vale, em São Luís. Diversos experimentos foram realizados para mostrar o quanto algumas técnicas tem maior impacto nos níveis de estoque do que outras.

**Palavras-chaves:** Problema de Alocação de Berços. Pesquisa Operacional. Simulação.

# Abstract

Berth Allocation Problem has become a very known topic among studies on Operations Research. Defining the time and position to berth should consider some specific variables of the problem (such as loading and unloading times, stock variation and loaded amount on vessels) for a result that may be suitable for the Port's needs. This work uses *Arena Simulation Software* to describe the behaviour of four policies that may better fit to the model obtained from real data, coming from Vale. Several experiments were run in order to show how techniques have more impact on stock levels than others.

**Key-words:** Berth Allocation Problem. Operations Research. Simulation.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Mapa de Portos no Brasil . . . . .	13
Figura 2 – Representação do Terminal estudado . . . . .	27
Figura 3 – Modelo - Funcionamento do porto . . . . .	28
Figura 4 – Modelo - Abastecimento do Estoque . . . . .	29
Figura 5 – Centro de Serviço Multisservidor . . . . .	29
Figura 6 – Representação em <i>Arena</i> da política FCFS . . . . .	30
Figura 7 – Gráfico do Tempo de Espera - Cenário 1 . . . . .	33
Figura 8 – Gráfico do Tempo de Espera - Cenário 2 . . . . .	33
Figura 9 – Gráfico do Tempo de Espera - Cenário 3 . . . . .	34
Figura 10 – Gráfico do Tempo de Espera - Cenário 4 . . . . .	34
Figura 11 – Gráfico do Tempo de Espera com os 4 cenários . . . . .	35
Figura 12 – Gráfico do Tempo de Atendimento - Cenário 1 . . . . .	36
Figura 13 – Gráfico do Tempo de Atendimento - Cenário 2 . . . . .	37
Figura 14 – Gráfico do Tempo de Atendimento - Cenário 3 . . . . .	37
Figura 15 – Gráfico do Tempo de Atendimento - Cenário 4 . . . . .	38
Figura 16 – Gráfico do Tempo de Atendimento com os 4 cenários . . . . .	38
Figura 17 – Gráfico da Variação Média de Estoque do Produto 1 - Cenário 1 . . . . .	40
Figura 18 – Gráfico da Variação Média de Estoque do Produto 1 - Cenário 2 . . . . .	40
Figura 19 – Gráfico da Variação Média de Estoque do Produto 1 - Cenário 3 . . . . .	40
Figura 20 – Gráfico da Variação Média de Estoque do Produto 1 - Cenário 4 . . . . .	41
Figura 21 – Gráfico da Variação de estoque do Produto 1 nos 4 cenários . . . . .	41
Figura 22 – Gráfico da Variação Média de Estoque do Produto 2 - Cenário 1 . . . . .	43
Figura 23 – Gráfico da Variação Média de Estoque do Produto 2 - Cenário 2 . . . . .	43
Figura 24 – Gráfico da Variação Média de Estoque do Produto 2 - Cenário 3 . . . . .	43
Figura 25 – Gráfico da Variação Média de Estoque do Produto 2 - Cenário 4 . . . . .	44
Figura 26 – Gráfico da Variação de estoque do Produto 2 nos 4 cenários . . . . .	44
Figura 27 – Gráfico da Variação Média de Estoque do Produto 3 - Cenário 1 . . . . .	46
Figura 28 – Gráfico da Variação Média de Estoque do Produto 3 - Cenário 2 . . . . .	46
Figura 29 – Gráfico da Variação Média de Estoque do Produto 3 - Cenário 3 . . . . .	46
Figura 30 – Gráfico da Variação Média de Estoque do Produto 3 - Cenário 4 . . . . .	47
Figura 31 – Gráfico da Variação de estoque do Produto 3 nos 4 cenários . . . . .	47

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Histórico do uso da simulação computacional . . . . .	21
Tabela 2 – Otimização para Simulação: Pacotes de Software Comerciais . . . . .	23
Tabela 3 – Análise de Variância (ANOVA) entre médias do tempo de espera . . . . .	32
Tabela 4 – Análise de Variância (ANOVA) entre médias do tempo de atendimento . . . . .	36
Tabela 5 – Análise de Variância (ANOVA) entre as médias de variação do Estoque - Produto 1 . . . . .	39
Tabela 6 – Análise de Variância (ANOVA) entre as médias de variação do Estoque - Produto 2 . . . . .	42
Tabela 7 – Análise de Variância (ANOVA) entre as médias de variação do Estoque - Produto 3 . . . . .	45

# Sumário

	<b>Introdução</b>	<b>13</b>
<b>1</b>	<b>PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE BERÇOS</b>	<b>16</b>
1.1	Classificação do Problema	16
1.2	Variações do Problema	17
1.3	Revisão de Literatura	18
<b>2</b>	<b>SIMULAÇÃO</b>	<b>20</b>
2.1	Definição	23
2.2	Classificação	24
2.3	Vantagens e desvantagens	24
2.3.1	Vantagens	25
2.3.2	Desvantagens	26
<b>3</b>	<b>MODELOS PROPOSTOS</b>	<b>27</b>
3.1	Características do Porto Estudado	27
3.2	Modelo de Simulação	28
3.3	Cenários Simulados	29
3.3.1	FCFS	29
3.3.2	Fila de Prioridade	30
3.3.2.1	Volume Embarcado	30
3.3.2.2	Days On Hand	30
3.3.2.2.1	Consumo de Estoque	31
3.3.2.2.2	Produção de Estoque	31
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>32</b>
4.1	Tempo de Espera	32
4.2	Tempo de Atendimento	35
4.3	Nível de Estoque	38
4.3.1	Produto 1	39
4.3.2	Produto 2	42
4.3.3	Produto 3	45
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>48</b>
5.1	Trabalhos Futuros	48

<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>50</b>
--------------------	-----------

# Introdução

O transporte marítimo é de grande importância para a economia global. Por representar a maior parte de volume e de valor comercializados no mundo, segundo a ONU (2013), a intensa movimentação de navios acarreta em maior número de operações de embarque e desembarque de cargas. Portanto, é esperado que esse fato contribua para altas taxas de entrada de embarcações e de utilização dos recursos nos portos, inclusive gerando filas.

As formas de transporte de produtos através das embarcações marítimas são bastante diversificadas de maneira que atenda às buscas do mercado. Sendo assim, são classificadas de acordo com o tipo de carga em: carga geral, tanque, porta-contêineres, graneleiro, gaseiro, químico, ro-ro (*Roll On-Roll Off*) e ore-oil (ABRETI, 2016).

Figura 1 – Mapa de Portos no Brasil



Fonte: (ANP, 2000)

Similarmente, portos tentam adequar-se a forma como devem atender a toda a demanda. Dessa forma, eles são classificados de três maneiras: quanto à localização, quanto à infraestrutura e quanto à atividade desempenhada. Suas localizações podem ser: costeira ou litorânea - em contato direto com o mar -, lacustre - localizados em contato com lagoas - e hidroviários - localizados em rios. A infraestrutura, por sua vez, pode ser dividida em: comercial, industrial, turística, pesqueira e multifuncional. Por último,

as atividades desempenhadas podem ser: atividades humana e burocrática ou atividade comercial (DEGRASSI, 2001).

No Brasil, país de dimensões continentais, um vasto portfólio de serviços portuários é provido por terminais portuários e portos de várias categorias. Por fazerem parte da infraestrutura, ajudam no escoamento da produção no interior do país, a exemplo dos Portos hidroviários de Manaus e Porto Alegre. Portos lacustres, como os Portos de Pelotas e de Guaíba, também fazem parte das bases de organização da economia brasileira. Por fim, os portos marítimos são os mais encontrados no país, como os Portos de Santos, do Rio de Janeiro e do Itaqui, em São Luís (BRASIL, 2016). A Figura 1 representa alguns portos distribuídos até o ano 2000 no interior do Brasil e ao longo da costa e dão uma dimensão de sua importância para a economia do país.

A grande variedade de serviços oferecidos pela combinação de tipos de portos e navios corroboram com a importância do transporte marítimo. Ademais, o aumento do comércio entre as nações tem instigado maior competitividade entre os serviços portuários implicando em necessidade de diminuição de custos, diminuição de quantidade de navios em fila e aumento eficiente do número de clientes atendidos.

Posto isso, alguns estudos buscaram contribuir com análises e respostas para problemas operacionais. Um dos mais encontrados na literatura é o Problema de Alocação de Berços - BAP (do inglês, *Berth Allocation Problem*) -, que consiste em definir onde (em que berço) e quando cada navio deverá atracar de forma que, em geral, o tempo de atendimento médio de navios seja mínimo (BARROS, 2010).

Diversos estudos discutem as variações do PAB de acordo com a realidade do terminal em questão, seja para contêineres, seja para granel em busca de uma solução que tragam ganhos reais para a administração portuária. Em alguns casos, porém, estas soluções propostas envolvem técnicas de simulação que reproduzem dados de um sistema real de forma que vários modelos possam ser analisados sem que haja custo adicional de mudança operacional durante o levantamento.

Este trabalho tem como objetivo apresentar o PAB em um modelo de simulação discreta para o caso de um porto de exportação de produtos em forma de granel, baseado no Terminal de Ponta da Madeira, pertencente a Vale S.A., que está para tornar-se, em 2018, o maior porto do mundo (VALE, 2016). De maneira mais específica, algumas políticas simples de atracação de navios são comparadas estatisticamente utilizando resultados obtidos por meio de simulação discreta.

O trabalho está dividido em dois capítulos teóricos e dois práticos que abordam a metodologia e o resultado. No Capítulo 1, o BAP é abordado de modo mais detalhado, descrevendo classificações e variações do problema que ajudam a elaborar os modelos descritos. No Capítulo 2, similarmente, o conceito de simulação é descrito, após o histórico

traçado, vantagens e desvantagens, como forma de fundamentar o uso da simulação. O modelo proposto, como o trabalho foi estabelecido e as regras de simulação e experimentos são descritos no [Capítulo 3](#). Para, então, haver apresentação dos resultados em [Capítulo 4](#), seguido da Conclusão.

# 1 Problema de Alocação de Berços

A alta demanda por utilização do transporte marítimo tem gerado fluxo intenso de embarcações para os serviços portuários (BARBOSA, 2014). Com isso, é natural que haja crescimento das filas de espera por serviço nos portos. Acrescenta-se este fator à gestão e ao planejamento do cronograma de operações e surge o clássico problema de operação e administração de portos: o Problema de Alocação de Berços - BAP (do inglês, *Berth Allocation Problem*), .

O BAP consiste em definir em que berço e a que momento cada navio deve atracar, minimizando custos (tempo de serviço, tempo de espera em fila ou multa por tempo total despendido por navio) para o porto. Este tipo de decisão deve levar em conta um horizonte de planejamentos que leve em consideração as variáveis envolvidas no sistema, como nível de estoque, tempo médio de serviço, tempo de espera, taxa de processamento por berço, entre outros (BARROS, 2010).

A administração portuária em geral busca otimizar o uso dos recursos (mão de obra, berços, guindastes, equipamentos, com objetivo de reduzir gastos (BARBOSA, 2014). Portanto, deve sempre buscar a possibilidade de posicionar embarcações nos cais com produtos a serem transportados, diminuindo movimentação de guindastes e equipamentos e ainda minimizando os tempos médios de serviço e de espera na fila. O que abre portas para outras variações do BAP.

## 1.1 Classificação do Problema

Os cenários encontrados em diferentes portos possuem características próprias que podem se repetir em outros e servir de ajuda para soluções similares. Por essa razão, o BAP possui algumas subdivisões em função do espaço do terminal, do tipo de chegada de navios e o horizonte de planejamento.

Barbosa (2014) explica que alguns portos da Europa e China possuem apenas um cais extenso e contínuo onde vários navios podem atracar ao mesmo tempo no local apropriado de acordo com as características do berço. Nesse caso, as embarcações dividem o espaço ao longo do cais em posições arbitrárias e o BAP é dito contínuo - CBAP; em casos de divisão discreta do espaço, cada embarcação ocupa um berço por vez, assim, o BAP também é dito discreto - DBAP; por último, alguns portos possuem as duas formas de ocupação, onde alguns berços podem comportar uma embarcação apenas ou duas embarcações menores, originando o BAP híbrido - HBAP (BIERWIRTH; MEISEL, 2010).

Outros tipos de características originam novas categorias de classificação. Sendo

assim, o BAP é dividido de acordo com restrições de tempo de chegadas de navios, de acordo com Bierwirth e Meisel (2010), em:

- a) Dinâmico: os tempos de chegada dos navios são fixos, portanto, não podem atracar antes do tempo de chegada esperado;
- b) Estático: não há tempo definido de chegada ou os tempos de chegada adicionam poucas restrições aos tempos de atracação;

Barbosa (2014, Seção 2) apresenta duas outras classificações que podem categorizar o problema:

- a) Quanto à chegada dos navios que pode ser determinística - em função de horários conhecidos de chegada - ou estocástica - há incerteza sobre o momento de chegada;
- b) Quanto ao tempo de atendimento das embarcações: pode ser fixo (determinado pela administração) ou variável.

## 1.2 Variações do Problema

É possível encontrar na literatura casos em que o BAP varia de acordo com o tipo de carga transportada pelo terminal. As maneiras mais comuns são de terminais de transporte de matéria-prima em forma de granel e de produtos, em geral, movimentados em contêineres. Alguns trabalhos apresentados a seguir buscam por soluções para esses portos, Arango et al. (2011), por exemplo, trata o problema para o Porto de Sevilha, na Espanha, que movimenta contêineres; Barros et al. (2011), por sua vez, busca soluções para o complexo portuário de São Luís, Maranhão, que movimenta produtos em forma de granel.

Locais que transportam e movimentam contêineres tendem a ser mais complexos por envolver outro tipo de problema, o Problema de Alocação de Guindastes (*Quay Crane Allocation Problem* - QCAP). Em portos desse tipo, a administração portuária deve integrar as soluções encontradas pelo BAP e pelo QCAP, dando origem ao B&CAP (*Berth and Crane Allocation Problem*) (BARBOSA, 2014). Além disso, é possível encontrar na literatura uma outra variação do BAP, o Problema Tático de Alocação de Berços (*Tactical Berth Allocation Problem* - TBAP), que se diferencia por levar em consideração meses de planejamento na duração do horizonte de eventos, comum para esse tipo de terminal (BARBOSA, 2014).

As estações portuárias que transportam produtos em forma de granel, por sua vez, tornam-se menos complexos a medida que não é necessário movimentação de guindastes. No entanto, questões de restrição de estoque e variação de maré podem acrescentar dificuldade ao problema. Mais uma variação é apresentada em Barros et al. (2011), o BAPTBS

(*Berth Allocation Problem in Tidal Bulk ports with Stock level conditions*), para portos que exportam matérias-primas em forma de granel e possuem controle e restrições de estoque por conta do grande volume movimentado e da manutenção do consumo contínuo (BARROS et al., 2011).

### 1.3 Revisão de Literatura

Diversos trabalhos discorrem sobre o BAP como tema central de seus levantamentos. As principais diferenças encontradas entre eles, em geral, giram em torno da metodologia aplicada e das peculiaridades de cada porto.

Em Barros et al. (2011), por exemplo, o problema estudado leva em conta o complexo portuário de São Luís, Maranhão, que tem como principal função exportar matéria-prima em forma de granel. Nesse caso, os terminais sofrem com uma particularidade: a variação de marés, que apenas permitem movimentação para atracar em maré cheia - BAPTBS. O conjunto destes problemas é, então, resolvido através um modelo matemático de Programação Linear, utilizando um *solver* comercial, e através de uma heurística, em busca de um resultado ótimo, ideal para instâncias muito grandes que tomariam muito tempo na resolução exata.

Similarmente, Barbosa (2014) analisa diferentes cenários para o Porto da Vale, que também exporta matéria-prima em forma granel, em Vitória, Espírito Santo. Os modelos formulados nessa circunstância foram adaptados a partir de outros trabalhos que utilizaram o BAP associado ao QCAP. Dois modelos matemáticos e duas heurísticas foram construídas como meio de solucionar o problema. A comparação entre os resultados obtidos levou em conta os valores médios de função-objetivo obtidos para cada uma das soluções propostas.

No caso do Porto de Sevilha, Arango et al. (2011) fizeram uma análise ampla sobre o funcionamento do porto, englobando toda a cadeia de transporte em volta (chegada, carregamento e descarregamento de caminhões e navios), sugerindo ao final uma nova solução operacional. Nesse porto, é necessário planejamento para a mudança de pátio dos guindastes disponíveis para movimentação de contêineres e também para alocar as embarcações de acordo com o estoque por berço. Foram construídos dois modelos de simulação utilizando *Arena Simulation Software*, retratando a situação atual e uma nova, propondo, assim, uma heurística que faça o controle da entrada de navios de forma a minimizar o tempo total de serviço de cada navio. Para comparar os resultados, foram levados em consideração o tempo de espera por berço e o tempo de serviço por berço.

Por sua vez, Wanke (2011) faz uma análise sobre a composição de um pequeno terminal de embarque de contêineres no Rio de Janeiro. Foram, então, construídos e simulados cenários com diferentes políticas que decidiriam em qual berço cada navio

atracaria. O desempenho das técnicas de atracação é medido pelo tempo médio de espera em fila e pelo *demurrage* (multa por tempo de sobre-estadia) cobrado pelas embarcações, de forma a diminuir os valores de multas pagas pela administração do porto. Os resultados dos múltiplos cenários são obtidos a partir da simulação utilizando *Arena Simulation Software* e, então, comparados utilizando ANOVA - método estatístico de comparação.

## 2 Simulação

Empresas e organizações de grande porte estão progressivamente alcançando diferentes países e diversificando produtos em geral para que se mantenham competitivas. A complexidade e o impacto de suas decisões são, assim, ainda maiores. Sistemas de apoio a decisão tem se tornado cada vez mais necessários para diminuir eventuais riscos que possam ocorrer. Em virtude disso, essas empresas tem recorrido a métodos mais técnicos e científicos para que tomem deliberações complexas.

Graças a evolução computacional, novas ferramentas e áreas de estudo tem surgido para suprir essa necessidade. Atualmente, é possível modelar e construir sistemas computacionais que estejam bastante próximos da realidade a fim de que sejam analisados detalhadamente e possam servir de fundamento para decisões que possam exigir mudanças operacionais (FU, 2002).

Simulação é a reprodução de um sistema ou processo real em função do tempo (BANKS, 1998). Por facilitar a observação de variáveis em sistemas reais complexos, ajudar a entender e definir estratégias para performance melhorada, o desenvolvimento de softwares de simulação discreta é considerado como uma das melhores interfaces entre Pesquisa Operacional e a própria Ciência da Computação (FU, 2002).

O conceito e a utilização dessa área de estudo computacional surgiram juntamente com a entrada dos primeiros computadores populares no mercado, por volta da década de 60, sendo que as primeiras formas de emprego da simulação foram na área militar para distribuição de suprimentos nas batalhas e na alocação de recursos (TORGA, 2007). Seu histórico de evolução mostra a dimensão de sua importância para a Pesquisa Operacional.

Na Tabela 1, é possível observar os passos dados até após os anos 90. No início dos anos 50 e 60, por exemplo, a utilização de computadores e das linguagens de programação (de propósito geral) eram restritos a militares e universitários, o que dificultava e inibia o uso da simulação. Após anos de crescimento do número de recursos computacionais, fazer uso da simulação tornou-se mais descomplicado por haverem linguagens específicas, pacotes de simulação, dispondo de recursos mais amigáveis para os usuários.

O uso dessas linguagens de programação tem facilitado o acesso e a criação de modelos de estudo de sistemas ao longo dessas décadas. Porém, diversas outras ferramentas gráficas - *Arena Software Simulation*, *Flexsim Software*, *Simio Software*, entre outros - foram criadas para facilitar ainda mais o desenvolvimento de novos modelos, atender uma demanda com interesses em estudar sistemas complexos, atender novos processos operacionais ou até mesmo verificar soluções analíticas para problemas inicialmente incompreensíveis (FU, 2002).

Tabela 1 – Histórico do uso da simulação computacional

Décadas	Ferramenta	Características do estudo da simulação	Exemplos
50 e 60	Linguagens de propósito geral	Aplicações em grandes corporações; Grupos de desenvolvimento de modelos com 6 a 12 pessoas; Geram programas a serem executados em grandes computadores.	FORTRAN, PASCAL E C.
70 e início dos anos 80	Linguagens de simulação	Utilização em uma maior número de corporações; Desenvolvimento e uso de pacotes de linguagens; Surtem linguagens de simulação baseadas em System Dynamics; Comandos projetados para tratar lógica de filas e demais fenômenos comuns; Mais amigáveis, mas ainda requerem programador especializado.	SIMSCRIPT, GPSS, GASP IV, DYNAMO, SIMAN E SLAM
80 e início dos anos 90	Linguagens de simulação	Introdução do PC e da animação; Presença de guias, menus e caixas de diálogos; Simulação realizada antes do início da produção; Facilidade de uso; Menos flexível que as linguagens de propósito geral e de simulação; Projetados para permitir modelagem rápida; Dispõe de elementos específicos para representar filas, transportadores, etc.; Restringem-se a sistemas de certos tipos.	Simfactory e Xcell

Após 90	Pacotes flexíveis de programas de simulação	Melhor animação e facilidade de uso; Fácil integração com outras linguagens de programação; Usada na fase de projeto; Grande uso em serviços; Uso para controle de sistemas reais; Grande integração com outros pacotes (base de dados e processadores de texto); Integram a flexibilidade das linguagens de simulação, com a facilidade de uso dos pacotes de simulação; Aprimoramento dos simuladores, o que permite modelagem rápida	Witness, Extend, Tellta, Pro-model for Windows
---------	---	--	--

Fonte: (TORGA, 2007)

Por conta de elementos gráficos que podem trazer maior entendimento visual dos processos simulados esses pacotes de simulação tem se tornado bastante popular. Portfólio de elementos prontos com interfaces e menus que geram maior transparência e facilidade de uso tem atraído muitos novos usuários (FU, 2002). Além disso, Shannon (1998) destaca outras vantagens como:

- a) Menor número de tarefas com programação;
- b) Aprendizado na prática;
- c) Maior flexibilidade para mudança dos modelos;
- d) Menos erros de programação;
- e) Geração automática de estatísticas;

Por fim, esses pacotes têm sido porta de entrada para a Otimização para Simulação. Com elementos prontos, é possível, então, preocupar-se apenas com a lógica do modelo do sistema e concentrar esforços para otimização. Quase sempre agregados aos softwares de simulação, existem módulos que são utilizados para estimar e otimizar parâmetros estatísticos apontados pelo usuário (FU, 2002). A Tabela 2 traduzida e adaptada de Fu (2002) aborda essa questão, mostrando alguns exemplos de plataformas comerciais que possuem suporte para módulos de otimização de parâmetros.

Tabela 2 – Otimização para Simulação: Pacotes de Software Comerciais

Plataforma de Simulação	Fornecedor (URL)	Estratégias Primárias de Busca
AutoMod	AutoSimulations, Inc. (www.autosim.com)	Algoritmos genéticos e evolutivos
Arena, Crystal Ball, et al.	Optimization Technologies, Inc. (www.opttek.com)	Busca dispersa e busca tabu, redes neurais
SIMUL8	Visual Thinking International Ltd. (www.simul8.com)	Redes neurais
ProModel	PROMODEL Corp. (www.promodel.com)	Algoritmos genéticos e evolutivos
WITNESS	Lanner Group, Inc. (www.lanner.com/corporate)	Simulated annealing, busca tabu

Fonte: Adaptado de (FU, 2002)

## 2.1 Definição

O conceito que envolve a simulação é disseminado em diversas formas, no entanto, convergem a um ponto único de entendimento: reproduzir um sistema real computacionalmente. Banks (1998), por exemplo, é um dos autores mais citados na literatura sobre simulação e a define como “a imitação de um sistema ou de um processo do mundo real em virtude do tempo”.

De certa forma similar, Shannon (1998) descreve simulação como “o processo de planejar um modelo de um sistema real e conduzir experimentos com este modelo com objetivo de entender o sistema e/ou avaliar diversas estratégias para a operação do sistema”. Para essa definição, modelo é considerado a representação de um grupo de objetos ou ideias; enquanto sistema significa um grupo de elementos que interagem como maneira de alcançar algum propósito (SHANNON, 1998). Banks (1998) acrescenta ainda a definição de evento como “uma ocorrência que altera o estado do sistema”.

A simulação em si envolve todo o processo de cálculo e geração dados artificiais que “alimentam” o modelo gerado para que possam, enfim, ser observados e levar a conclusões sobre as operações do sistema real representado (BANKS, 1998). O comportamento de elementos baseados em informações estocásticas tendem a ser o principal objeto de observação no modelo em circunstância de sua própria natureza (FU, 2002).

Sendo assim, simular torna-se indispensável como recurso de apoio a decisões que envolvam encontrar soluções de problemas do mundo real. Em sistemas em que haja dificuldade de alteração ou manipulação (por ser caro ou que represente perda de produção, por exemplo), reproduzi-los computacionalmente permite estudá-los em várias situações, além de dar embasamento para comportamentos futuros em efeitos que podem ser produzido (SHANNON, 1998; BANKS, 1998).

## 2.2 Classificação

Modelos e sistemas de simulação são bastante peculiares em razão dos propósitos para que foram construídos. Portanto, podem ser classificados de acordo com as características que possuem. Law e Kelton (2000), Harrell et al. (2011) estabelecem três dimensões de classificação dos modelos de simulação: estático ou dinâmico, determinístico ou estocástico e contínuo ou discreto.

Primeiramente, os sistemas estáticos são descritos como uma representação de um sistema em um determinado momento (assemelha-se a uma foto tirada) em que não há eventos acontecendo em função do tempo. Os sistemas dinâmicos são o oposto. Representam eventos que acontecem no decorrer tempo e mantêm-se ativos (LAW; KELTON, 2000).

O segundo tipo de classificação ocorre quanto a aleatoriedade das variáveis do sistema. Casos de modelos de simulação que não estão sujeitos a casualidade probabilística são classificados como determinísticos. Outros casos que possuem pelo menos um componente probabilístico são ditos estocásticos (LAW; KELTON, 2000). Sendo assim, seu conjunto de entradas leva a um resultado esperado, mas impreciso nas saídas.

Finalmente, é possível classificar modelos de simulação em discretos ou contínuos. MIYAGI (2004) atenta ao fato de essa classificação seguir as mesmas definições de sistemas discretos e contínuos. São classificados como discretos, os sistemas em que os estados das variáveis são prontamente alterados em diferentes momentos, como um sistema cliente-servidor em que o processo segue conforme a chegada de clientes. Os contínuos, por sua vez, possuem mudança constante do estado das variáveis em relação ao tempo (LAW; KELTON, 2000), assim como em sistemas de simulação de temperatura ou de reações químicas. A escolha pelo modelo deve levar em conta as características do sistema simulado e qual o objetivo a ser seguido (MIYAGI, 2004).

## 2.3 Vantagens e desvantagens

O intuito de cortar gastos para experimentos operacionais em sistemas de larga escala tem sido uma das principais justificativas para uso da simulação (LAW; KELTON, 2000). Mais, a simulação é uma poderosa ferramenta de apoio a grandes decisões estratégicas

por tornar possível o estudo, a análise e avaliação de situações que poderiam não ser resolvidas sem ela (SHANNON, 1998). Contudo, exige experiência e treinamento, podendo tomar bastante tempo de aprendizado (BANKS, 1998).

Uma boa vantagem é que modelos reproduzidos computacionalmente em plataformas de simulação tendem a ser mais bem compreendidos. TORGA (2007)) enumera que a simulação deve ser utilizada quando:

- a) Não há modelagem matemática completa para o problema;
- b) Não há método analítico para resolução do modelo matemático;
- c) Resultados por simulação são mais fáceis de serem obtidos;
- d) Não há habilidade técnica para resolução do método matemático;
- e) É necessário observar o desenvolvimento do processo por completo;
- f) São necessários detalhes específicos do sistema;
- g) Há obstáculos ou não é possível a experimentação na situação real.

Harrell et al. (2011) acrescenta que é apropriado simular quando for verdadeiro que:

- a) Uma decisão operacional (lógica ou quantitativa) está sendo tomada;
- b) O processo analisado está bem definido e é repetitivo;
- c) Atividades e eventos são interdependentes e variáveis;
- d) O impacto do custo da decisão é maior que o custo de simular;
- e) O custo de fazer experimentos com o sistema atual é maior que o de simular;

### 2.3.1 Vantagens

As vantagens de simular podem ser confundidas com as vantagens de uso de plataformas de simulação, por serem bastante próximas. Para simular, Banks (1998), Shannon (1998) apresentam várias vantagens similares:

- a) Escolher corretamente: simular permite fazer diversos experimentos sem gastos adicionais de recursos;
- b) Flexibilidade do tempo: é possível examinar os modelos minuciosamente aumentando ou diminuindo as taxas de velocidade de reprodução dos fenômenos estudados;
- c) Entender o porquê de fenômenos: reconstruir cenários e analisar minuciosamente o momento de ocorrência de fenômenos;
- d) Explorar possibilidades, realizar experimentos e modificar sistemas;

- e) Diagnosticar problemas causados pelas interações de variáveis em cenários reais complexos;
- f) Identificar restrições e gargalos;
- g) Desenvolver entendimento sobre as operações do sistema;
- h) Visualizar o desenho dos processos: as animações dos softwares de simulação permitem visualizar melhor o processo ou a organização funcionando;
- i) Preparar para mudanças;
- j) Investir sabiamente: simular custa em torno de 1% do orçamento do projeto;
- k) Treinar a equipe: os modelos de simulação podem ser excelentes ferramentas quando construídos para esse propósito;
- l) Especificar requisitos do sistema.

### 2.3.2 Desvantagens

Por outro lado, existem desvantagens que podem contribuir para que não haja escolha por simular. Da mesma maneira, [Shannon \(1998\)](#) descreve algumas desvantagens que incluem:

- a) As modelagens de simulação requerem treinamento especializado e experiência;
- b) Buscar dados de entrada confiáveis pode consumir bastante energia e os resultados obtidos podem ser altamente questionáveis;
- c) Os modelos de simulação não resultam em soluções e devem apenas ser analisados e não tomados como "resposta final".
- d) [Banks \(1998\)](#) ratifica as desvantagens anteriores e ainda complementa: os resultados da simulação são de difícil interpretação, por algumas observações poderem ser resultados de inter-relações no sistema ou de aleatoriedade;

## 3 Modelos Propostos

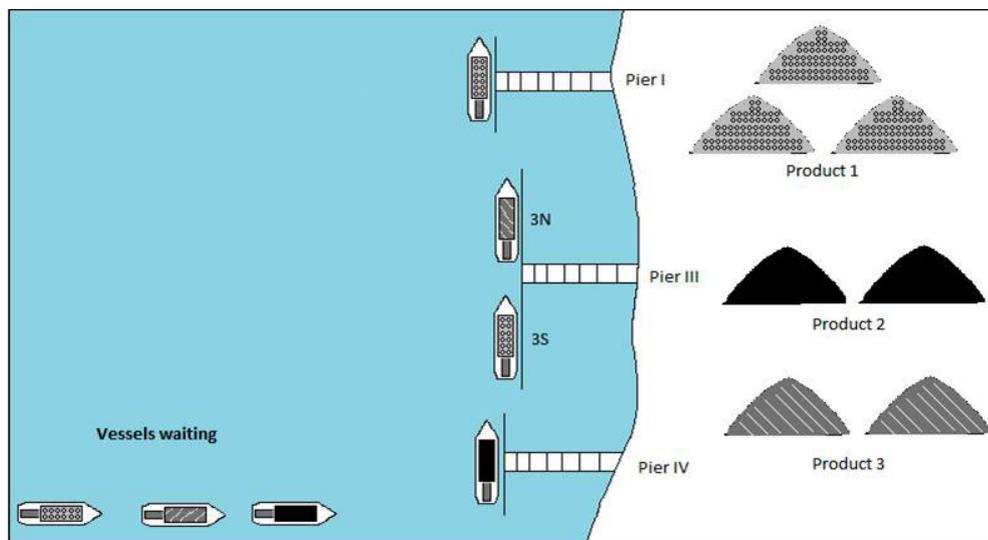
Os modelos propostos levam em consideração cenários com diferentes políticas de atracação, baseado em dados reais do Terminal de Ponta da Madeira, da Vale S.A., em São Luís, Maranhão (VALE, 2014). A princípio, não busca-se construir o modelo do porto completo, mas fenômenos genéricos que - sob certas circunstâncias - podem ocorrer num porto de mesmo porte, com causas e consequências previsíveis.

### 3.1 Características do Porto Estudado

O terminal é composto por três píeres, identificados como: I, III e IV, os píeres I e IV possuem um berço para atracação cada, o píer III possui dois berços - 3N e 3S. Os berços são capazes de embarcar qualquer tipo de matéria-prima, que se concentram em pátios de estocagem. A Figura 2 representa como os berços e pátios estariam hipoteticamente dispostos ao longo do cais.

Cada navio é capaz de embarcar apenas um tipo de produto. O que não ocorre no caso real. Sendo assim, os tipos de produtos exportados foram adaptados a partir das informações obtidas. As distribuições de abastecimento do estoque e de chegada de navios de matérias-primas foram proporcionalmente modificadas a fim de equilibrar o sistema. Os dados não são divulgados neste trabalho por representarem informações restritas à empresa.

Figura 2 – Representação do Terminal estudado



O produto 1 é a matéria-prima mais exportada pois representa o produto principal da empresa. É, portanto, o produto que ocupa maior espaço nos estoques. Os produtos 2 e

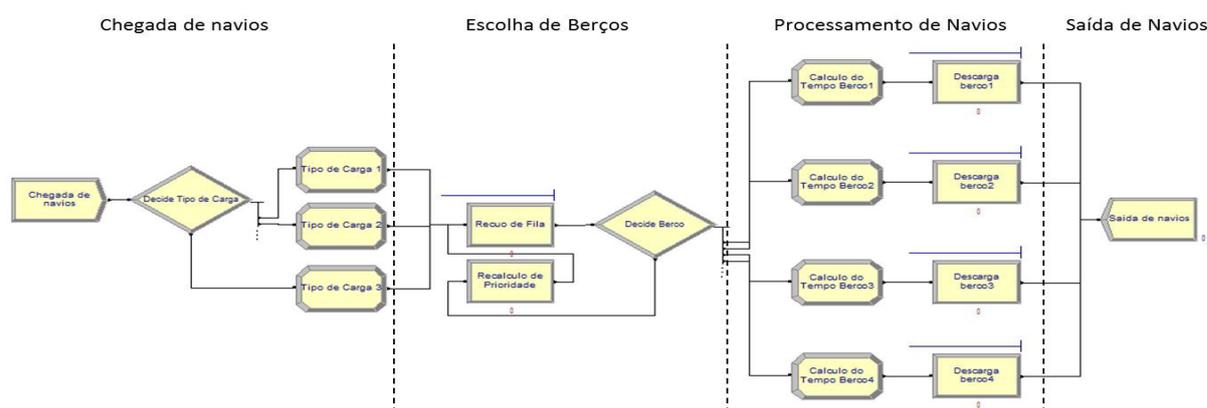
3 estão bem próximos entre si em questão de quantidade embarcada, com pouca vantagem para o produto 2, e seus embarques são cerca de 10 vezes menores que o produto 1.

Os quatro berços também possuem diferenças nas taxas de volume embarcado por hora. Os berços 1 e 4 possuem taxa média de processamento similares e são representadas por Distribuições Normais; enquanto os berços 3N e 3S são mais lentos e possuem Distribuição de Probabilidade Beta.

## 3.2 Modelo de Simulação

O modelo de simulação de operação do porto foi criado conforme as informações levantadas neste trabalho. Além disso, o modelo foi replicado conforme a política de atracação a ser utilizada: *First Come, First Served* - FCFS, e duas com Filas de Prioridade: Maior volume embarcado e *Days On Hand* (DOH). A Figura 3 demonstra em um dos modelos como está feita a subdivisão do terminal.

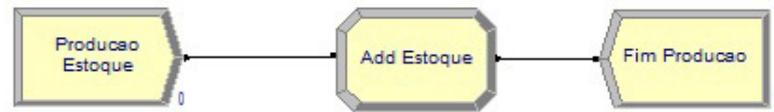
Figura 3 – Modelo - Funcionamento do porto



O funcionamento foi dividido em quatro partes: Chegada de Navios, Escolha de Berços, Processamento da Carga e Saída de Navios. A Chegada de Navios compreende a entrada da embarcação no sistema e assinalar tipo e quantidade a ser embarcada. A etapa de Escolha de Berços aplica a política de atracação e encaminha o navio para o recurso escolhido. O Processamento da carga utiliza o recurso e carrega o navio durante o tempo necessário de acordo com processamento do berço e volume total. Por último, a Saída de Navios, em que as embarcações deixam o sistema e variáveis de sistema são lidas.

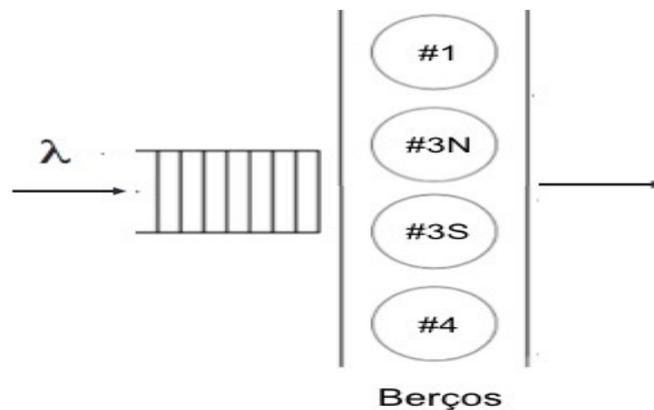
Paralelamente à execução das atividades de embarque, são executadas atividades de abastecimento dos estoques de matérias-primas. Esse modelo abstrai a operação logística de chegada dos produtos e representa apenas a taxa de chegada e de abastecimento dos estoques. A Figura 4 mostra como essas atividades estão refletidas no *Arena*.

Figura 4 – Modelo - Abastecimento do Estoque



Nesse sistema de chegada, alocação de berços e saída de navios há apenas uma fila de espera por atendimento e quatro berços para atender. Sendo assim, o sistema pode ser representado como um modelo Cliente-Servidor de Teoria das Filas, em um centro de serviço multisservidor, conforme representado na [Figura 5](#).

Figura 5 – Centro de Serviço Multisservidor



### 3.3 Cenários Simulados

Os diferentes cenários reproduzem as políticas de atracação propostas para que, ao fim, sejam comparadas em relação ao tempo médio de atendimento e ao tempo de espera em fila. Com essas políticas simples, é pretendido que hajam circunstâncias diferentes para avaliação de ultrapassagem de navios e qual seria o comportamento de estoque para cada uma delas.

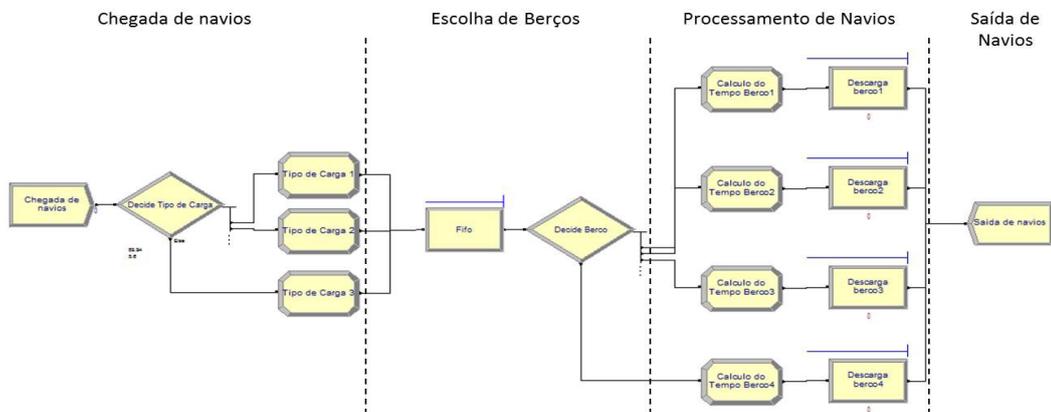
#### 3.3.1 FCFS

A primeira política de atracação apresentada é o FCFS, que aloca os navios nos berços de acordo com a ordem de chegada ao Terminal. Portanto, as requisições feitas pelas embarcações não sofrem nenhum tipo de alteração de preferência.

Para esse cenário, não há possibilidade de ultrapassagens até a alocação do navio ao berço. No entanto, por conta de volume embarcado, alguns navios podem deixar o sistema antes de outros.

O modelo de simulação construído para esse cenário difere dos demais por conta de não haver atribuição de valores de prioridade. A [Figura 6](#) apresenta essa representação no software *Arena*.

Figura 6 – Representação em *Arena* da política FCFS



### 3.3.2 Fila de Prioridade

Para as políticas em que há mudança na ordem de chegada dos navios, foram criadas filas de prioridade que atribuam valores que deem preferência de acordo com as características das embarcações ou com outras variáveis que façam parte do sistema. Vale ressaltar que a chegada de novas embarcações para o sistema implicam em recálculo do valor de prioridade para todas os navios já em fila.

#### 3.3.2.1 Volume Embarcado

A prioridade dada para “Volume Embarcado” é o primeiro critério de atracação a ser levado em consideração. Para essa técnica, navios que possuem maior capacidade de embarque de matéria-prima possuem maior priorização no acesso aos recursos do porto.

Com isso, pretende-se que haja ultrapassagem de navios para que haja aumento da vazão média e diminuição das quantidades de estoque sem haver distinção do tipo de produto exportado. A [Equação 3.1](#) demonstra como a prioridade é calculada para esse cenário.

$$Prioridade = \frac{1}{QtdEmbarcada} \quad (3.1)$$

#### 3.3.2.2 Days On Hand

O *Days On Hand* - DOH - é um procedimento contábil para controle sobre o giro de estoque ([HAMAD et al., 2011](#)). O termo é utilizado para definir a razão entre estoque total e tempo médio de consumo de inventário, resultando em dias restantes de estoque.

Para esse cenário simulado, dois cálculos de prioridade baseados no DOH foram propostos: com Consumo de Estoque e com Produção de Estoque.

#### 3.3.2.2.1 Consumo de Estoque

Primeiramente, o consumo médio diário é calculado a partir do volume embarcado e, então, a prioridade é dada pelo inverso do número de dias restantes, como indicado na [Equação 3.2](#). Assim, será possível dar maior vazão aos itens menos consumidos e com maior volume em estoque.

$$Prioridade = \frac{ConsumoM\u00e9dioDiario}{QtdEmEstoque} \quad (3.2)$$

#### 3.3.2.2.2 Produção de Estoque

Para o segundo caso, as prioridades dadas aos navios leva em consideração a quantidade produzida (em vez do consumo) que chega aos estoques e a quantidade de volume embarcado. A razão formulada está representada pela [Equação 3.3](#). Dessa forma, pretende-se priorizar o aumento na saída de navios com produtos que mais se acumulam nos estoques.

$$Prioridade = \frac{1}{QtdEmbarcada * Produ\u00e7\u00e3o} \quad (3.3)$$

## 4 Resultados

Os resultados obtidos neste trabalho refletem a composição de modelos compostos por todos os cenários do [Capítulo 3](#). As simulações projetam 60 dias de chegada de navios ao sistema, seguindo os dados reais obtidos a partir da mesma quantidade de dias de operação na Vale, e são replicadas por 30 vezes para cada política.

O método ANOVA é um procedimento estatístico de análise de variância para comparar tratamentos e atestar a real diferença entre as várias médias verificadas ([MONTGOMERY, 2008](#)). As comparações feitas entre os cenários utilizam este procedimento seguidos de análise posterior *Tukey HSD* e levam em consideração as variáveis: tempo de atendimento, tempo de espera e os níveis de estoque dos três produtos.

### 4.1 Tempo de Espera

O tempo de espera refere-se ao tempo de cada embarcação aguardando para ser atendida pelo sistema. Essa variável é a primeira a ser comparada por estar relacionada ao impacto gerado por multas de sobretempo nos portos e terminais. A [Tabela 3](#) contém os resultados dessa análise contendo os quatro cenário. Os valores de p-valor (p-adj) menores ou iguais a 0,05 indicam que as médias comparadas são estatisticamente diferentes ([MONTGOMERY, 2008](#)).

Tabela 3 – Análise de Variância (ANOVA) entre médias do tempo de espera

Cenários	Diferença	Menor	Maior	p-adj
2-1	7.460699e-14	-1.1359879	1.1359879	1.0000000
3-1	5.720637e-01	-0.5617594	1.7058867	0.5652489
4-1	9.059420e-14	-1.1359879	1.1359879	1.0000000
3-2	5.720637e-01	-0.5617594	1.7058867	0.5652489
4-2	1.598721e-14	-1.1359879	1.1359879	1.0000000
4-3	-5.720637e-01	-1.7058867	0.5617594	0.5652489

As políticas de Consumo de Estoque, Produção de Estoque, FCFS e Volume Embarcado estão representados respectivamente pelos cenários 1, 2, 3, e 4 indicados na

tabela. Além disso, a [Tabela 3](#) indica que os tempos de espera são estatisticamente similares para todas as políticas.

O gráfico da [Figura 7](#) demonstra a variação do Tempo de Espera ao longo das 30 replicações em torno de uma média de espera de 8.60 horas.

Figura 7 – Gráfico do Tempo de Espera - Cenário 1



Para o cenário 2 (prioridade a Produção de Estoque) o gráfico da [Figura 8](#) possui a mesma representação do primeiro, com média de espera de 8,66 horas. O cenário 3 (FCFS) possui média de 9 horas de espera, representado na [Figura 9](#). Por último, o cenário 4 (Volume Embarcado) gerou filas com média de espera de 8,58 horas, conforme indicado na [Figura 10](#).

Figura 8 – Gráfico do Tempo de Espera - Cenário 2



Figura 9 – Gráfico do Tempo de Espera - Cenário 3

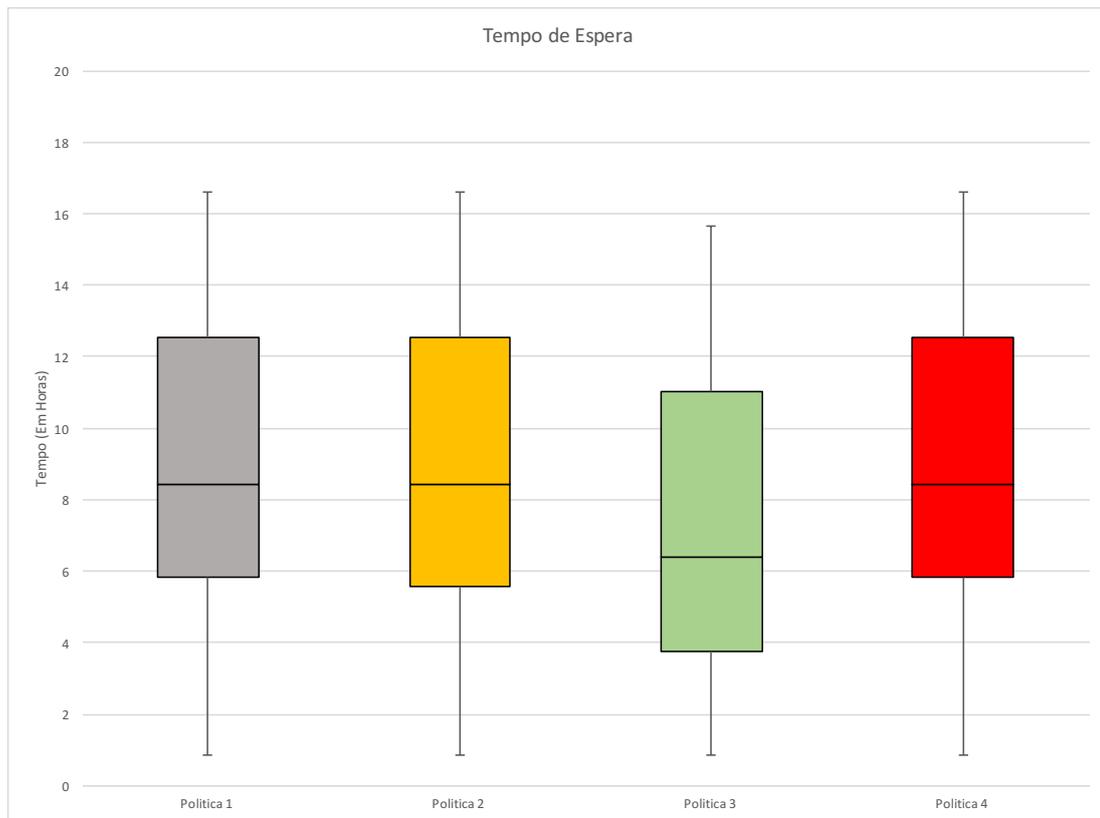


Figura 10 – Gráfico do Tempo de Espera - Cenário 4



Na [Figura 11](#) as médias entre as réplicas estão representadas para cada um dos cenários acima. No entanto, a diferença observada não é conclusiva em razão de seus valores estarem inclusos nas variâncias obtidas a partir dos tempos resultantes de cada réplica, ratificado pelo teste ANOVA mostrado na [Tabela 3](#).

Figura 11 – Gráfico do Tempo de Espera com os 4 cenários



A variável de contagem do tempo de espera é importante ao sistema como forma de contabilizar média de atrasos até o atendimento, que podem gerar multas à administração portuária. Dentre os cenários, há destaque para a política *First Come, First Served*, com maior média entre os testados, 9 horas de espera, apenas cerca de 5% a mais que a técnica de prioridade ao Volume Embarcado (menor tempo de inatividade entre todas). No entanto, apesar dos valores, a análise de variância mostrada na [Tabela 3](#) indica igualdade estatística entre os quatro cenários. Não há, portanto, política com tempo de espera realmente melhor entre as testadas.

## 4.2 Tempo de Atendimento

O Tempo de Atendimento é entendido como o tempo que a embarcação passa no sistema, excluindo a espera. O tempo médio de serviço pode indicar o quanto cada política influencia no desempenho das atividades do porto.

A [Tabela 4](#) mostra a análise de variância para essa variável e indica que não há variação estatística (não há p-valor menor que 0,05) que comprove diferença real entre os tempos de atendimento de cada cenário.

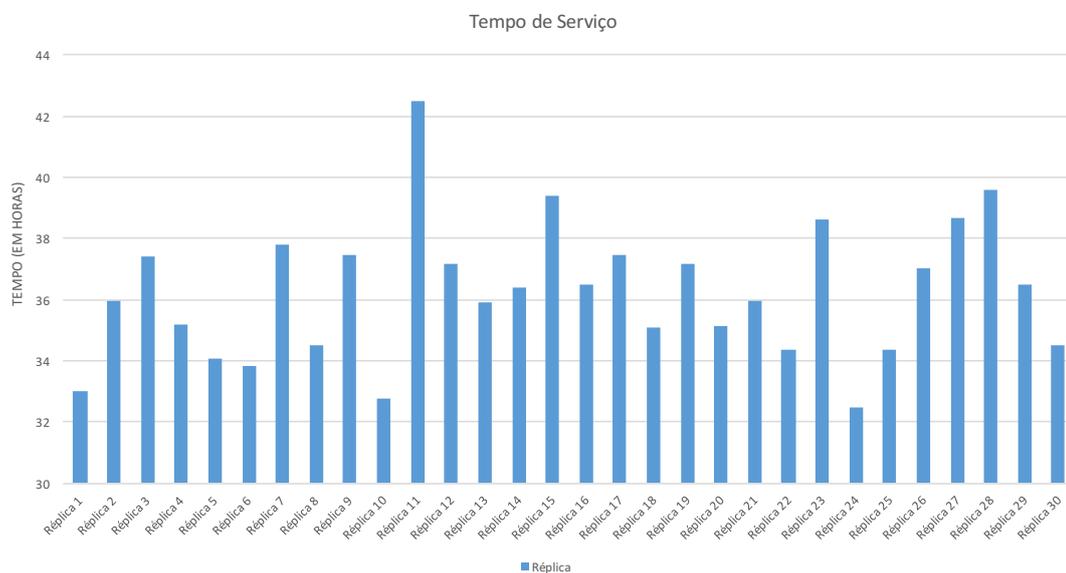
O gráfico da [Figura 12](#) tem o mesmo objetivo do gráfico da seção anterior: observar o comportamento do Tempo de Atendimento ao longo de 30 réplicas do experimento,

Tabela 4 – Análise de Variância (ANOVA) entre médias do tempo de atendimento

Cenários	Diferença	Menor	Maior	p-adj
2-1	1.421085e-13	-2.321861	2.321861	1.0000000
3-1	-2.872364e-01	-2.604673	2.030200	0.9888303
4-1	2.060574e-13	-2.321861	2.321861	1.0000000
3-2	-2.872364e-01	-2.604673	2.030200	0.9888303
4-2	6.394885e-14	-2.321861	2.321861	1.0000000
4-3	2.872364e-01	-2.030200	2.604673	0.9888303

levando em consideração que a decisão tomada para atracação nos berços foi baseada em prioridade a embarcação que carrega o produto com menor consumo de estoque - Cenário 1 -, possuindo média de 36,23 horas de atendimento.

Figura 12 – Gráfico do Tempo de Atendimento - Cenário 1



Os outros três gráficos mantêm o mesmo propósito para efeito de comparação. Na [Figura 13](#), está destacada a política de prioridade ao navio que embarcará o produto com maior volume de chegada aos estoques, com média de atendimento de 36,21 horas. Por sua vez, a [Figura 14](#) equivale ao FCFS, com média de 35,94 horas. E a [Figura 15](#) representa a última política de prioridade ao maior volume a ser embarcado, com média de 36,21 horas.

Os valores médios encontrados para cada cenário são melhor observados no gráfico da [Figura 16](#). Novamente, os resultados obtidos através dos quatro cenários não expressam

Figura 13 – Gráfico do Tempo de Atendimento - Cenário 2

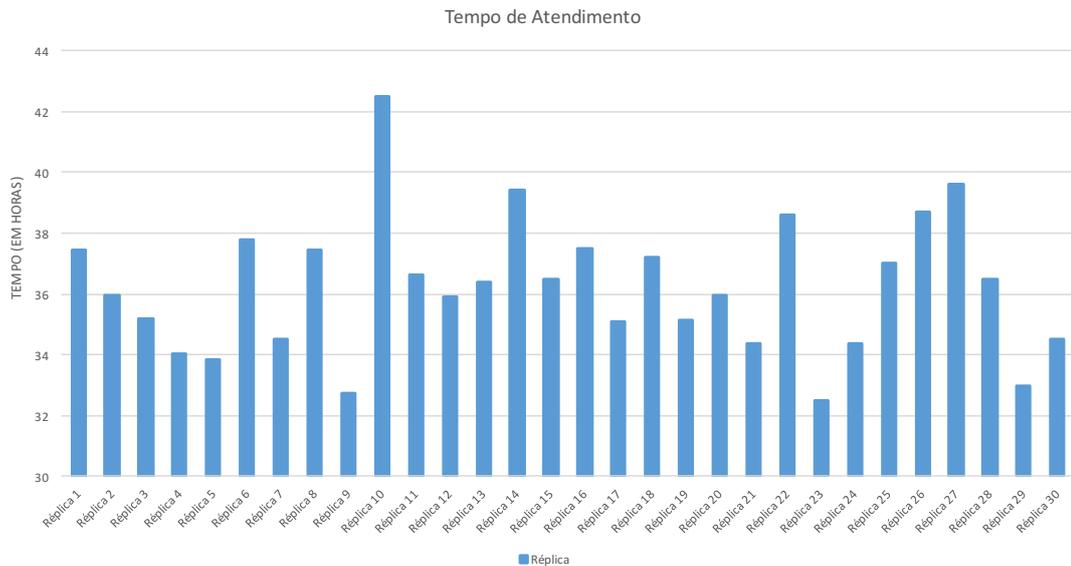
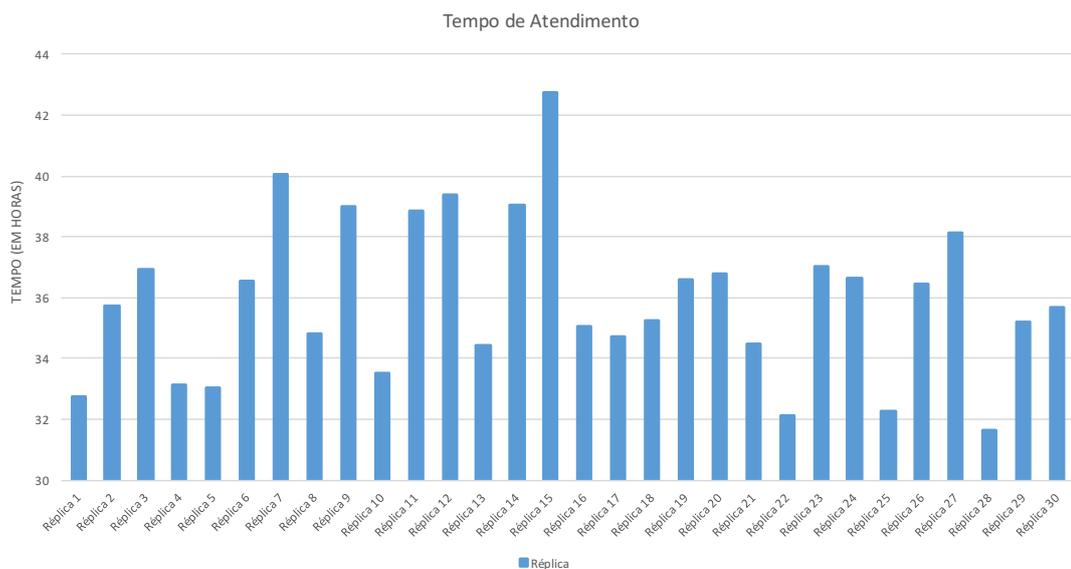


Figura 14 – Gráfico do Tempo de Atendimento - Cenário 3



diferença estatística significativa, conforme observado na [Tabela 4](#).

O tempo de atendimento entre os cenários apresenta pouca diferença de desempenho entre os experimentos. Com essa variável, é possível medir o quanto as decisões de atracação de berços poderiam influenciar a eficiência do terminal. A maior diferença entre as médias de tempo de atendimento é de 0,29 hora, ou 17 minutos (entre FCFS e prioridade ao Consumo de Estoque), equivalente a menos de 1% da maior. A proximidade entre os valores são ratificados pelo resultado encontrado na análise de variância da [Tabela 4](#), de pouca diferença estatística.

Figura 15 – Gráfico do Tempo de Atendimento - Cenário 4

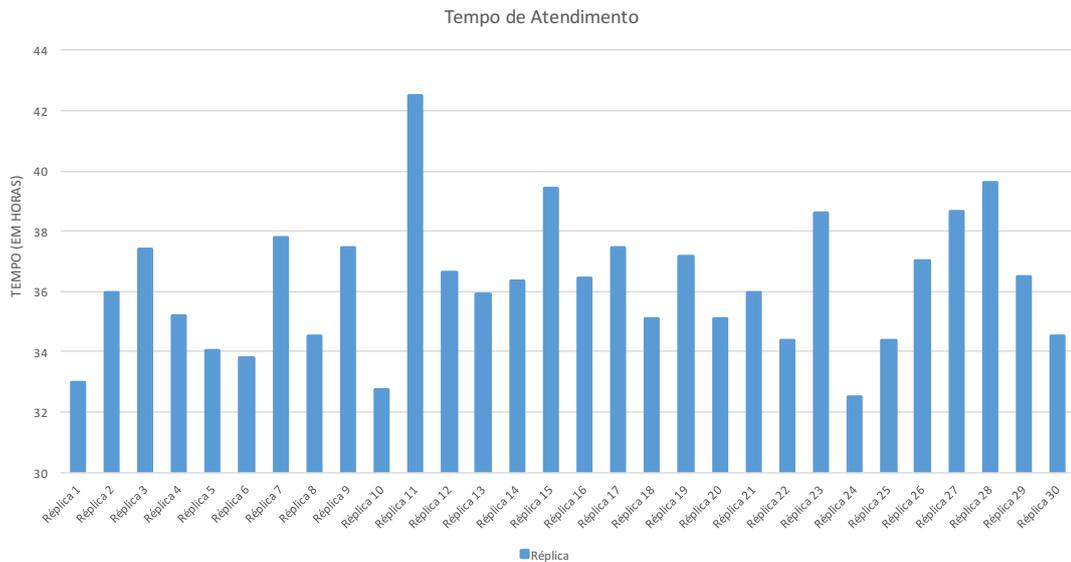
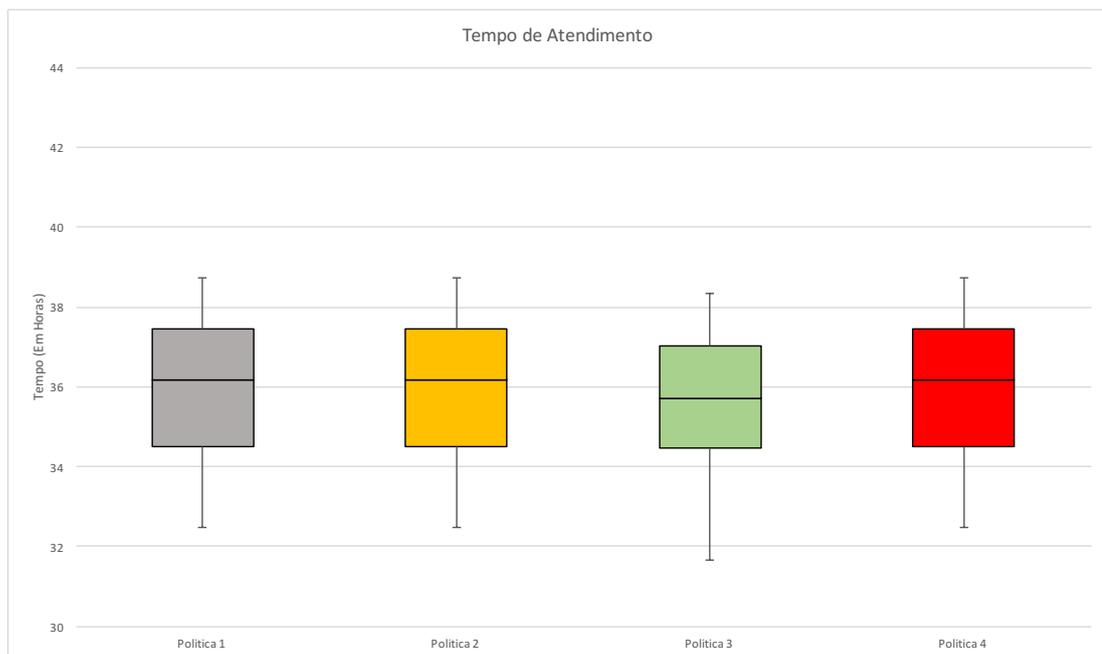


Figura 16 – Gráfico do Tempo de Atendimento com os 4 cenários



### 4.3 Nível de Estoque

As comparações propostas levaram em conta mais três variáveis: estoques dos Produtos 1, 2 e 3. Com essas comparações, pretende-se analisar com quais cenários é possível manter níveis aceitáveis de estoque, de modo que valores negativos sejam evitados. Para isso, foram mantidos os gráficos e análises de variância semelhantes à seção anterior.

O monitoramento e controle dos níveis de estoque, por sua vez, podem garantir liquidez ao fluxo de entrada e saída das matérias-primas no Porto. Dessa forma, é possível manter nos pátios a quantidade necessária sem que haja prejuízo (falta do produto) ao

embarque de navios. Por ser um modelo teórico de simulação, pôde-se estudar a diferença do impacto das políticas na variação do estoque.

### 4.3.1 Produto 1

O Produto 1 é o principal produto embarcado pela empresa. Por esse motivo, é essencial que os níveis do estoque mantidos sejam razoáveis (não-negativos) a fim de que haja embarque do produto a cada atracação, sem deixar de lado os outros produtos.

A análise de variância sobre esse produto ao longo das réplicas é revelada na [Tabela 5](#). Seu resultado atesta que há diferença estatística na variação de estoque do Produto 1 no Cenário 3 em relação aos restantes. Além disso, os Cenários 1, 2 e 4 apresentam resultados similares do ponto de vista de suas variâncias.

Tabela 5 – Análise de Variância (ANOVA) entre as médias de variação do Estoque - Produto 1

Cenários	Diferença	Menor	Maior	p-adj
2-1	-7.217750e-09	-100960.3	100960.3	1
3-1	-3.460555e+05	-446823.4	-245287.6	0
4-1	1.210719e-08	-100960.3	100960.3	1
3-2	-3.460555e+05	-446823.4	-245287.6	0
4-2	1.932494e-08	-100960.3	100960.3	1
4-3	3.460555e+05	245287.6	446823.4	0

O gráfico da [Figura 17](#) indica a variação das médias de níveis de estoque entre as réplicas para o Cenário 1, mantendo média total de 1,58 milhão de toneladas nos pátios. Na [Figura 18](#) está representado o Cenário 2, que mantém nos estoques média total de 1,6 milhão de toneladas. Por sua vez, o gráfico da [Figura 19](#) representa o terceiro cenário proposto, que retém em média 1,27 milhão de toneladas. Por último, o gráfico do Cenário 4, [Figura 20](#), retém em média 1,57 milhão de toneladas.

Figura 17 – Gráfico da Variação Média de Estoque do Produto 1 - Cenário 1

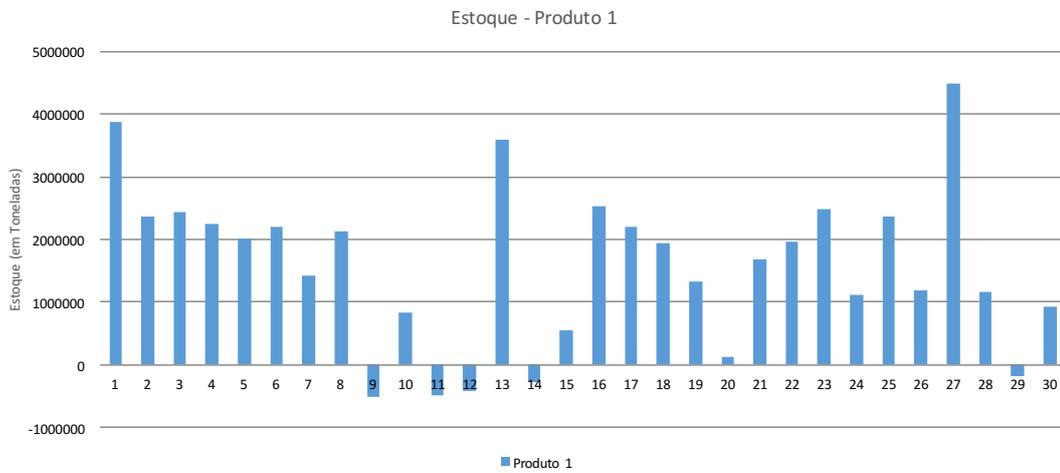


Figura 18 – Gráfico da Variação Média de Estoque do Produto 1 - Cenário 2

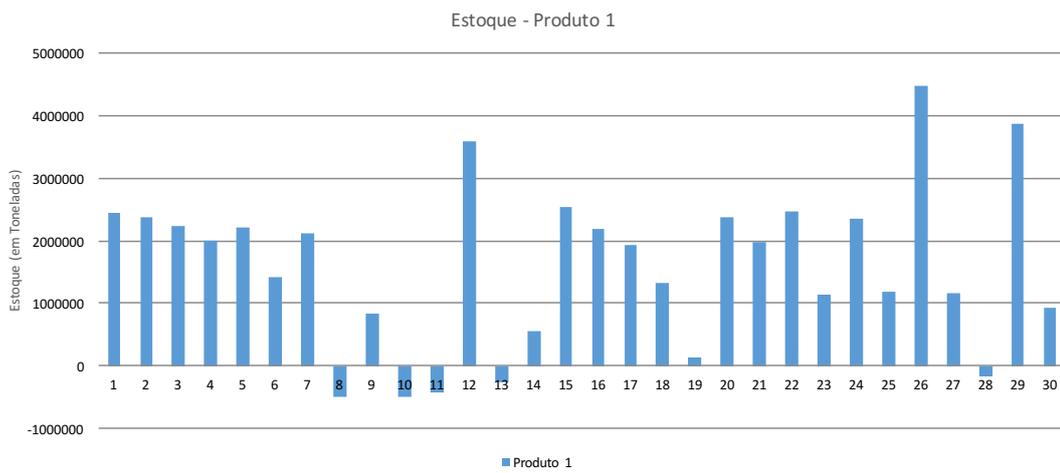


Figura 19 – Gráfico da Variação Média de Estoque do Produto 1 - Cenário 3

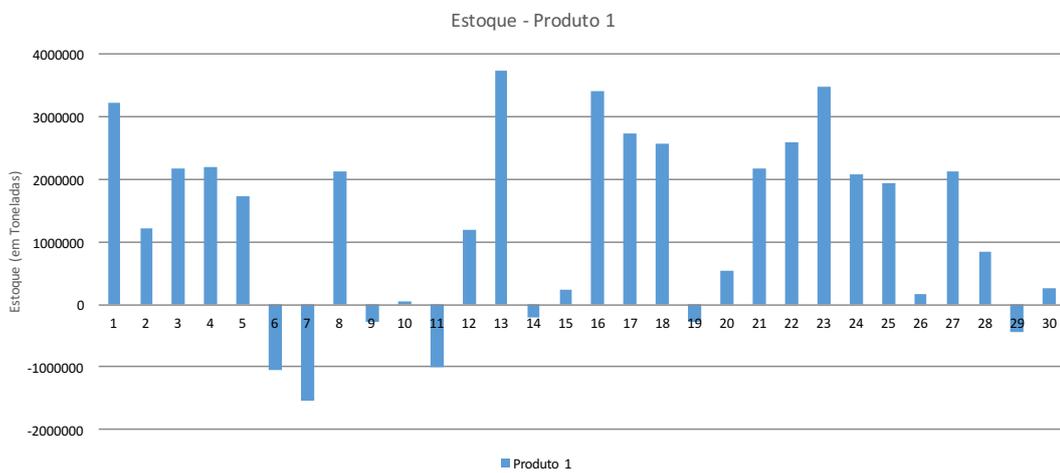


Figura 20 – Gráfico da Variação Média de Estoque do Produto 1 - Cenário 4

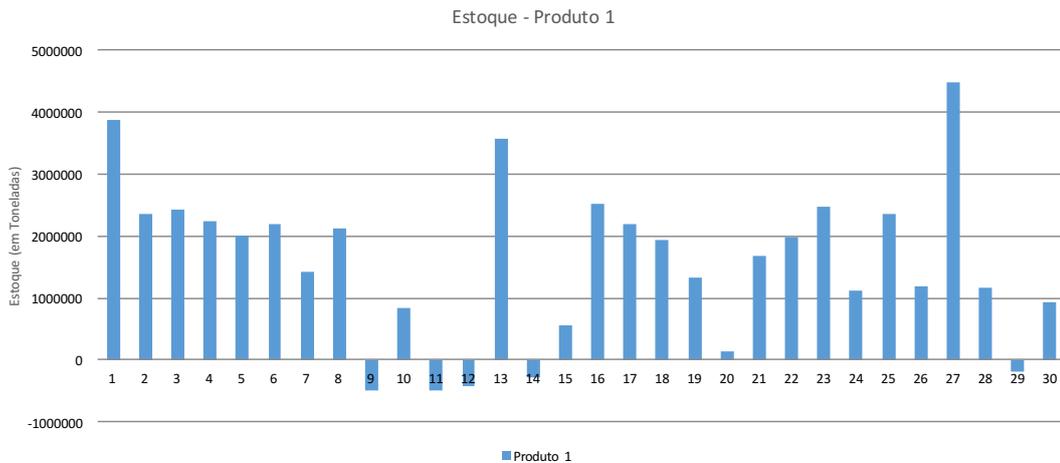
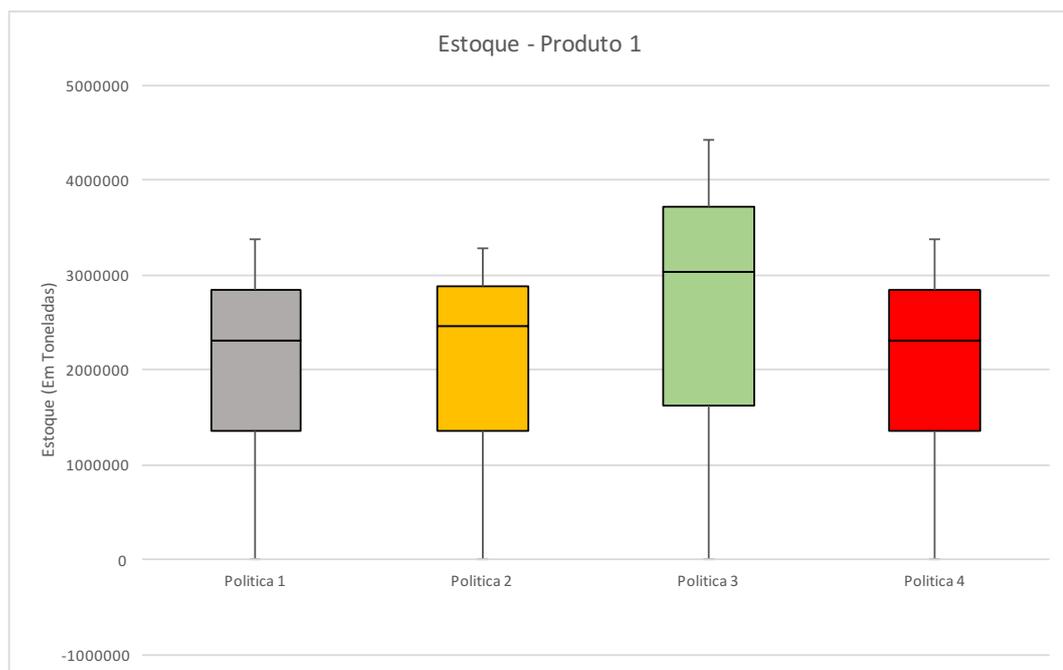


Figura 21 – Gráfico da Variação de estoque do Produto 1 nos 4 cenários



O último gráfico desta subseção, [Figura 21](#), contém as quatro médias para comparação. É possível observar nele que o valor médio de estoque da política FCFS é menor em relação as outras três políticas. Por conta dos resultados obtidos a partir do ANOVA na [Tabela 5](#), pode-se afirmar que a política FCFS possui menores valores de estoque médio em comparação com as políticas 1, 2 e 4.

Para o Produto 1, principal produto da empresa, a política de FCFS foi a que obteve menor valor de estoque médio. Seu valor médio de estoque é cerca de 20% menor que as demais. Ao longo das 30 replicações do experimento, o estoque médio atinge valores negativos ([Figura 14](#)) que seriam impossíveis em modelos reais aplicados. A análise de variância da [Tabela 5](#) indica haver diferença estatística apenas da FCFS para as outras.

### 4.3.2 Produto 2

A prioridade dada ao principal produto exportado pelo Porto não pode desconsiderar o embarque dos outros produtos. Por esse motivo, o produto 2 é igualmente analisado como meio de medir o quanto é mantido nos pátios em condições razoáveis de estoque não-negativo.

A [Tabela 6](#) mostra o resultado de uma nova análise de variância sobre os níveis de estoque, dessa vez, para o produto 2. Destaca-se nesse resultado, o fato de apenas o cenário 3 (FCFS) ser estatisticamente desigual em relação aos outros cenários.

Tabela 6 – Análise de Variância (ANOVA) entre as médias de variação do Estoque - Produto 2

Cenários	Diferença	Menor	Maior	p-adj
2-1	-1.086676e-09	-27065.12	27065.12	1
3-1	8.366724e+04	56653.70	110680.78	0
4-1	-6.901359e-10	-27065.12	27065.12	1
3-2	8.366724e+04	56653.70	110680.78	0
4-2	3.965397e-10	-27065.12	27065.12	1
4-3	-8.366724e+04	-110680.78	-56653.70	0

Os gráficos mostrados a seguir demonstram os valores médios de estoque para cada réplica, girando em torno de uma média geral.

Na [Figura 22](#), está representada a variação do estoque do Produto 2, levando em consideração o cenário 1. Este cenário manteve nos estoques 16,5 mil toneladas em média desse produto. O comportamento da variável de quantidade do produto para cenário 2 está demonstrado no gráfico da [Figura 23](#), mantendo estoque médio de 43 mil toneladas. Para o cenário 3, há o gráfico da [Figura 24](#), que retém em estoque cerca de 84,4 mil toneladas. Por fim, o cenário 4 está representado no gráfico da [Figura 25](#), contendo média de 15,8 mil toneladas.

Figura 22 – Gráfico da Variação Média de Estoque do Produto 2 - Cenário 1

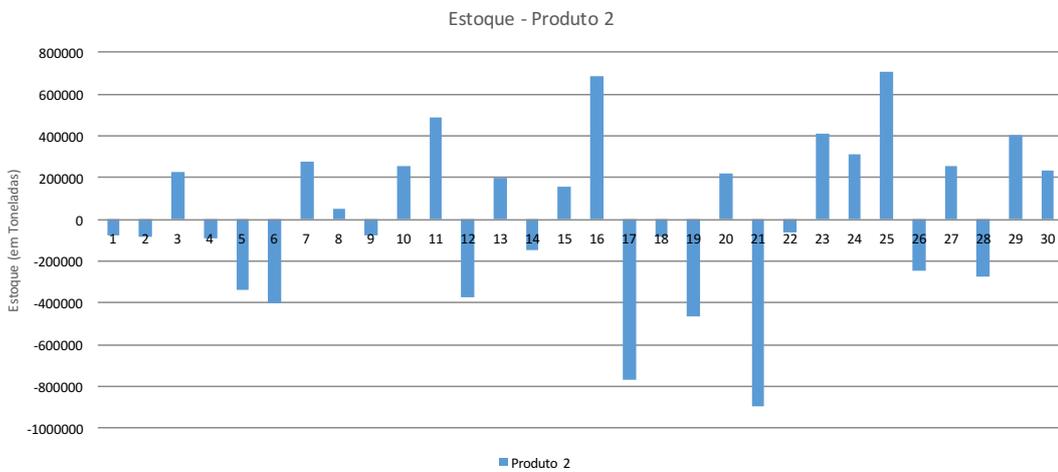


Figura 23 – Gráfico da Variação Média de Estoque do Produto 2 - Cenário 2

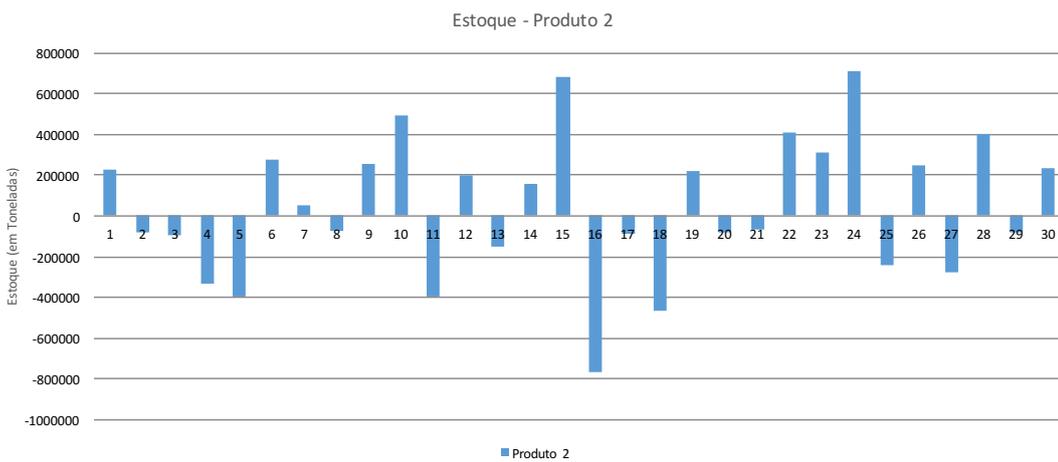


Figura 24 – Gráfico da Variação Média de Estoque do Produto 2 - Cenário 3

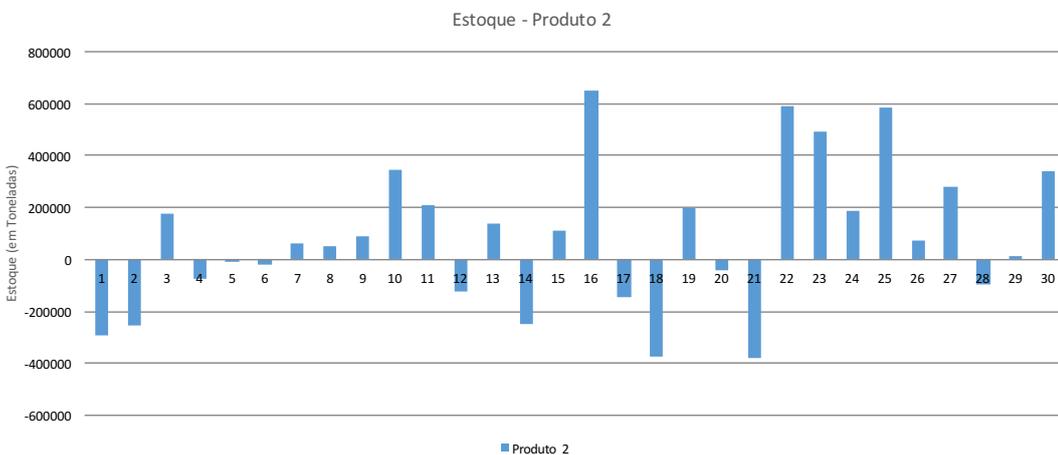
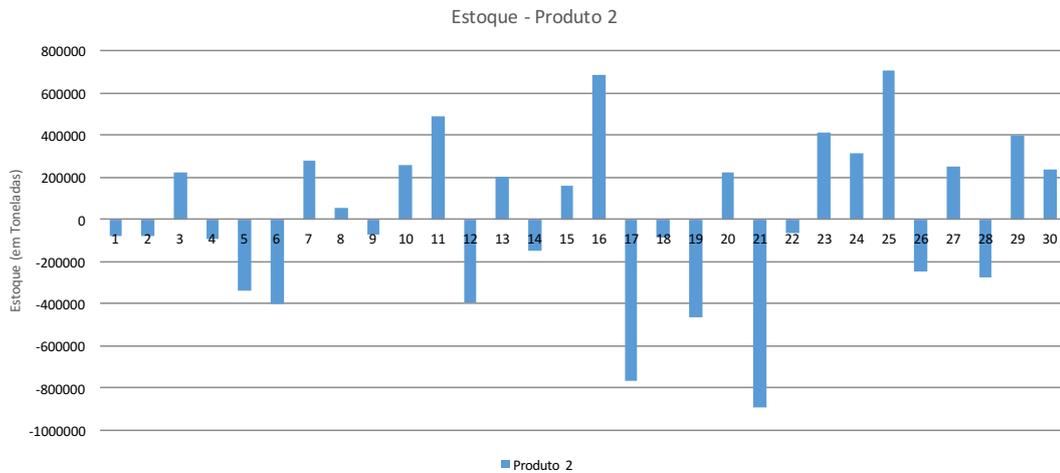
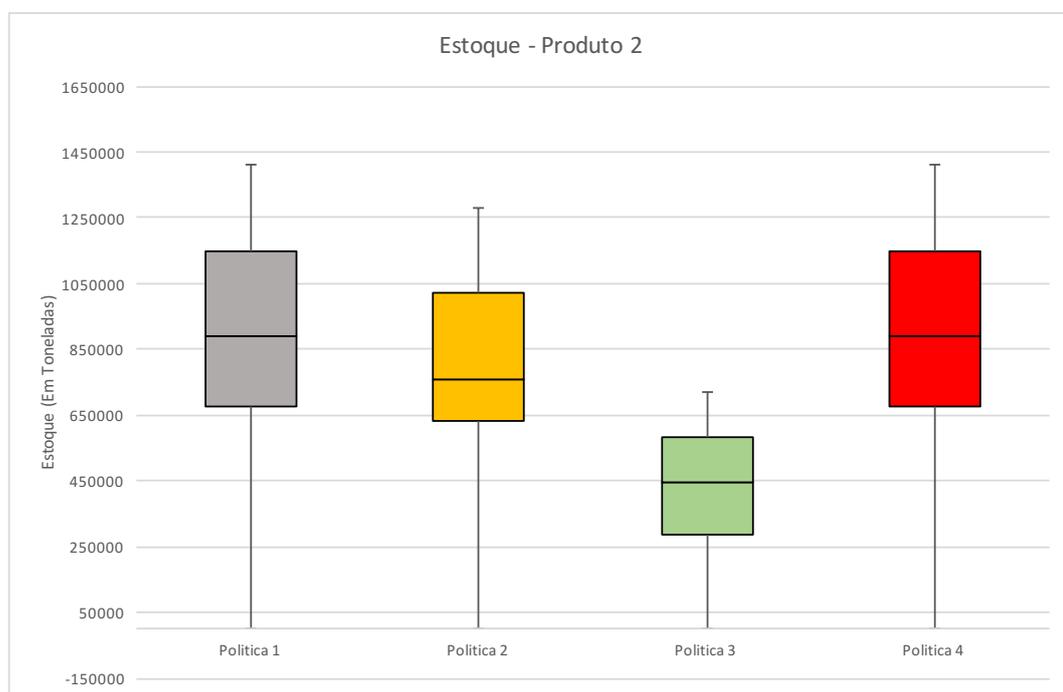


Figura 25 – Gráfico da Variação Média de Estoque do Produto 2 - Cenário 4



O gráfico da [Figura 26](#) agrupa os resultados das quatro políticas de atracação propostas para a variação de estoque do Produto 2. A análise de variância realça que há apenas diferença estatística na política FCFS em relação às outras.

Figura 26 – Gráfico da Variação de estoque do Produto 2 nos 4 cenários



Assim como no Produto 1, o Produto 2 também mostrou diferença estatística bastante relevante entre a Política FCFS e as demais, conforme mostrado pelo resultado da ANOVA na [Tabela 6](#). Para esse produto, a política apresentou a maior média de estoque durante as réplicas, evidenciado pela [Figura 26](#). O valor encontrado é aproximadamente 100% maior que a política de prioridade ao Produção de Estoque (segunda maior média); em relação a Volume Embarcado e Consumo de Estoque é cerca de 500% maior.

### 4.3.3 Produto 3

O Produto 3 é o que possui menor taxa de embarque no Porto. Apesar disso, seu níveis em estoque devem ser considerados a fim que haja fluidez normal (sem atingir valores negativos) para as embarcações.

Sendo assim, uma nova análise de variância foi feita. O resultado está apresentado na [Tabela 7](#) e indica que não há real diferença na variação dos valores médios de estoque.

Tabela 7 – Análise de Variância (ANOVA) entre as médias de variação do Estoque - Produto 3

Cenários	Diferença	Menor	Maior	p-adj
2-1	0.000002e+00	-22979.54	22979.54	1.00
3-1	-1.292222e+04	-35857.97	10013.53	0.4695887
4-1	2.692104e-10	-22979.54	22979.54	1.00
3-2	-1.292222e+04	-35857.97	10013.53	0.4695887
4-2	2.692104e-10	-22979.54	22979.54	1.00
4-3	1.292222e+04	-10013.53	35857.97	0.4695887

Para esse último caso, também foram apresentados gráficos para análise de cada uma das políticas de atracação ao longo de 30 réplicas de reprodução do modelo. O primeiro gráfico (do cenário de Consumo de Estoque) está representado na [Figura 27](#), que mantém 41,6 mil toneladas em média do Produto 3. O segundo gráfico da [Figura 28](#) está relacionado ao cenário 2 (com Produção de Estoque como prioridade) e retém cerca de 41 mil toneladas em média do produto. Na [Figura 29](#), está representada a variação do estoque de acordo com a Política de atracação 3 (FCFS) com média de 27 mil toneladas. Por último, a [Figura 30](#) apresenta a variação para a Política 4 (prioridade ao Volume Embarcado), retendo em média 42 mil toneladas do Produto 3 em estoque.

Figura 27 – Gráfico da Variação Média de Estoque do Produto 3 - Cenário 1

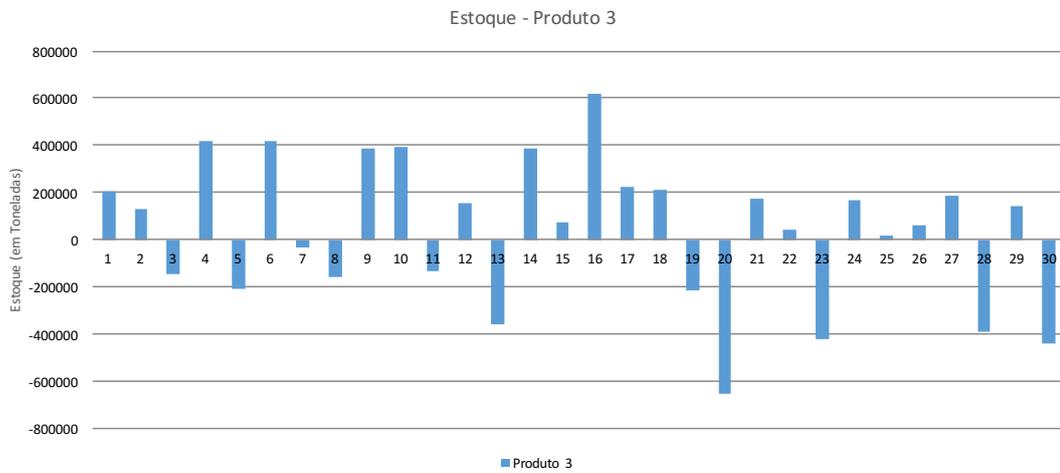


Figura 28 – Gráfico da Variação Média de Estoque do Produto 3 - Cenário 2

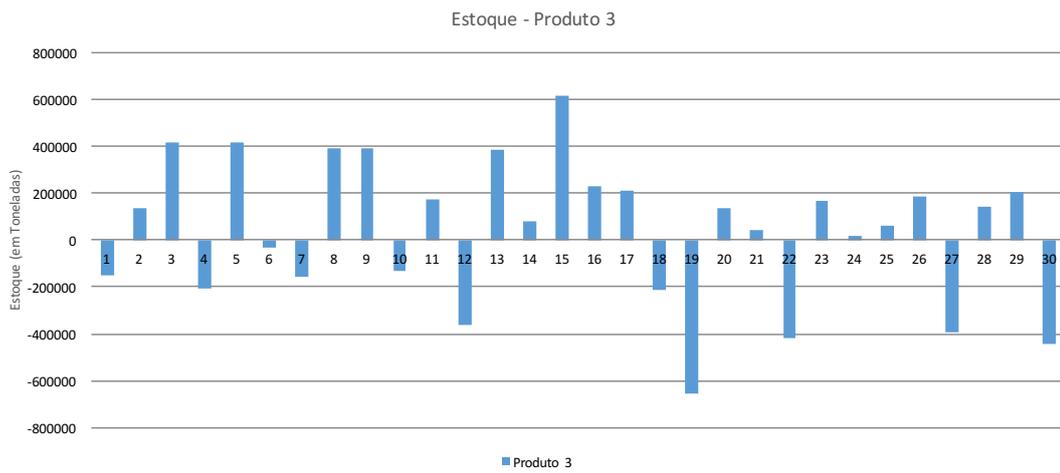


Figura 29 – Gráfico da Variação Média de Estoque do Produto 3 - Cenário 3

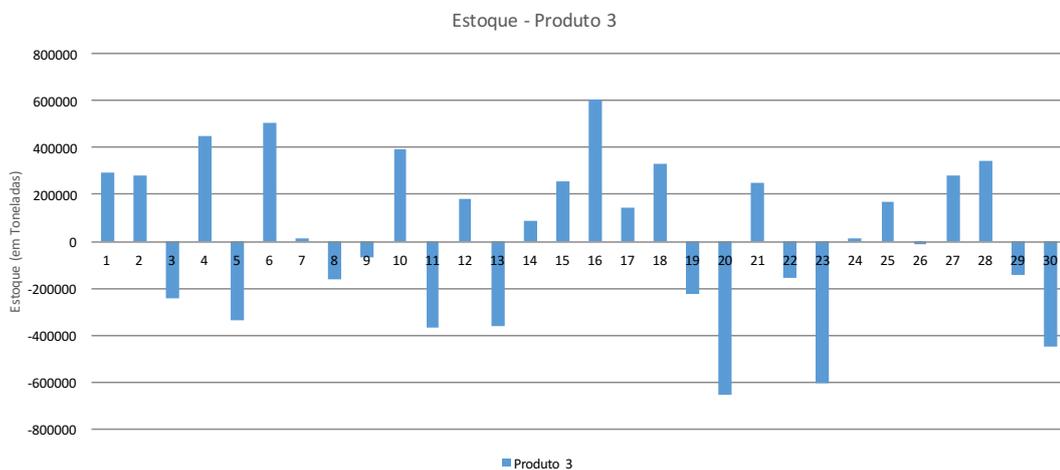


Figura 30 – Gráfico da Variação Média de Estoque do Produto 3 - Cenário 4

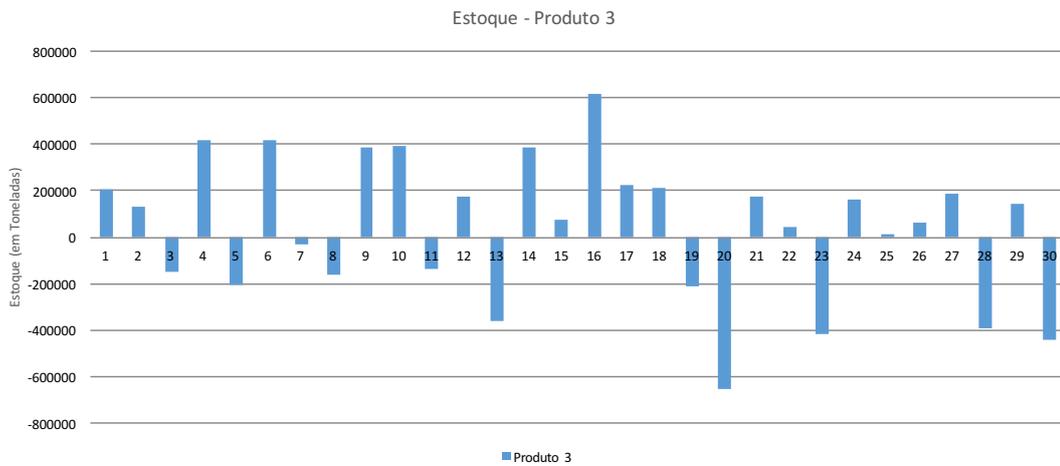
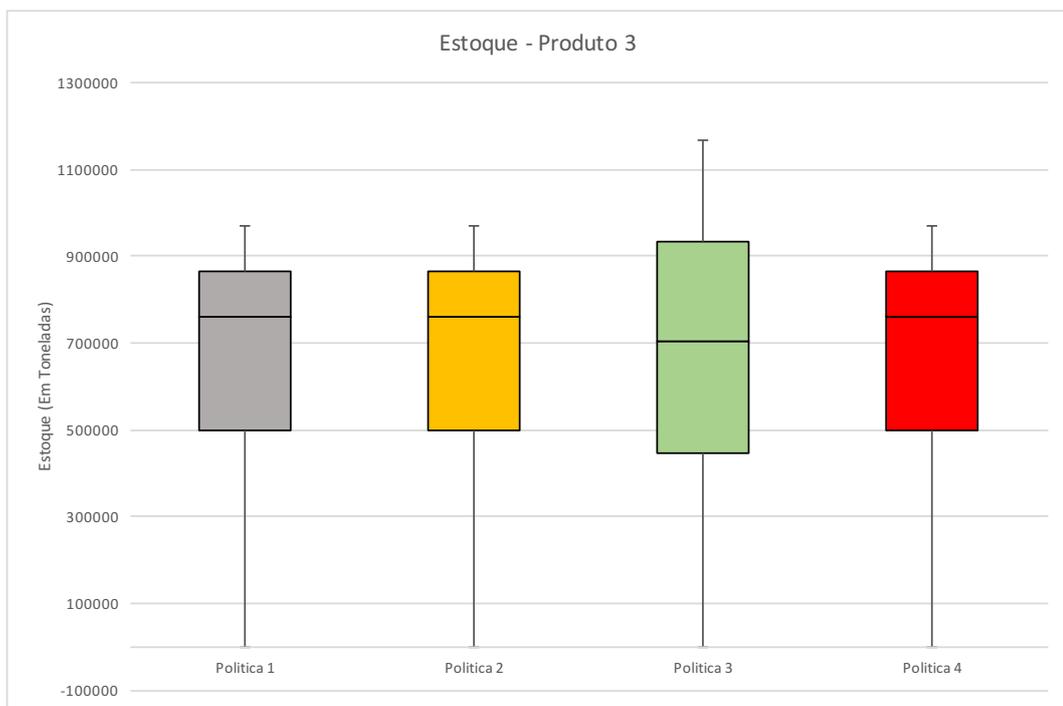


Figura 31 – Gráfico da Variação de estoque do Produto 3 nos 4 cenários



Finalmente, um gráfico comparativo com os quatro cenários de política de atracação é mostrado na [Figura 31](#). Na análise de comportamento da quantidade de Produto 3, destaca-se o cenário 3, com FCFS, que novamente apresenta-se abaixo das demais médias. A média deste cenário representa cerca de 64% da maior (Volume Embarcado), 65% da segunda maior (Consumo de Estoque) e 66% da terceira (Produção de Estoque). Apesar da grande diferença, os resultados da análise de variância, na [Tabela 7](#) indicam que os valores são equivalentes estatisticamente.

## 5 Conclusão

Este trabalho apresentou uma comparação entre diferentes decisões de atracação de navios em um Terminal Portuário de exportação de produtos em forma de granel. Para isso, foi construído um modelo de simulação com *Arena Simulation Software*, baseado em dados reais do Terminal da Ponta da Madeira, pertencente a Vale.

O objetivo seria trazer uma ampla visão quanto ao comportamento de cada uma das variáveis em relação às políticas simples de atracação propostas (FCFS e prioridade de acordo com Consumo de Estoque, Produção e Volume Embarcado). Sendo assim, as principais variáveis de funcionamento do sistema foram analisadas em um modelo teóricos que retrata até mesmo mudanças não toleradas ou impossíveis em um modelo real (estoque negativo, por exemplo).

A política de *First Come First Served* obteve variação um pouco diferente do esperado, por conta do tempo de espera levemente acima das outras. No entanto, o resultado da análise de variância equipara esses valores estatisticamente. O mesmo acontece para o tempo de serviço.

Os valores médios de níveis de estoque apresentam o impacto de cada decisão sobre o estoque. Os resultados obtidos indicam que as políticas que priorizam maior saída no volume tem melhor média para o produto mais movimentado. A perda obtida pela Política FCFS no Produto 1 foi compensada pelo ganho na média do Produto 2.

Apesar dos resultados da Análise de Variância - ANOVA - indicarem pouca diferença estatística para o Produto 3, a Política de priorização proporcional a produção do que chega aos pátios obteve melhor desempenho em função da média mantida em estoque. O Produto 2 foi o que mais sofreu proporcionalmente com as perdas por conta dos altos níveis de inventário do Produto 1.

No geral, as políticas testadas não são satisfatórias do ponto de vista prático e real. Devido aos valores de estoque negativo obtidos em algumas réplicas, não seria possível aplicar o modelo estudado no campo real. O estudo indica como seria a aplicação de técnicas mais simples para decisão de atracação de navios sem um alto nível de processamento, ainda que o tempo de análise não seja ponto crítico a um sistema desse tipo.

### 5.1 Trabalhos Futuros

No contexto deste trabalho, algumas mudanças sugeridas seriam a adequação do modelo ao mundo real com maior controle de estoque e inclusão de outras políticas simples e complexas.

Os valores de estoque podem ser melhor controlados de forma que as embarcações só possam atracar no momento que houver estoque com quantidade suficiente para o carregamento. Assim, o estoque negativo seria eliminado e haveria possível impacto a fila de espera.

De outra perspectiva, novas políticas de atracação incluiriam decidir por diferentes berços para atracação em função do volume a ser embarcado, da utilização ou da taxa de processamento por berço.

Dessa forma, poderiam haver melhoras no desempenho e na qualidade do modelo e mais aproximação do modelo real.

## Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. *Infraestrutura: Transportes - Portos*. 2000. Acessado: 09-03-2016. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/brasil-rounds/round2/pdocs/pinfra/Pportos.htm>>. Citado na página 13.
- ARANGO, C.; CORTÉS, P.; MUÑUZURI, J.; ONIEVA, L. Berth allocation planning in seville inland port by simulation and optimisation. *Advanced Engineering Informatics*, Elsevier, v. 25, n. 3, p. 452–461, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE TRANSPORTE INTERNACIONAL. *Marítimo - Tipos de Navios*. 2016. Acessado: 05-03-2016. Disponível em: <[http://www.abreti.org.br/beta/tipos\\_navios.php](http://www.abreti.org.br/beta/tipos_navios.php)>. Citado na página 13.
- BANKS, J. *Handbook of simulation: principles, methodology, advances, applications, and practice*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1998. Citado 5 vezes nas páginas 20, 23, 24, 25 e 26.
- BARBOSA, F. *O Problema de Alocação de Berços: Aspectos Teóricos e Computacionais*. Dissertação (Mestrado) — INSTITUTO DE MATEMÁTICA, ESTATÍSTICA E COMPUTAÇÃO CIENTÍFICA/USP, Janeiro 2014. Citado 3 vezes nas páginas 16, 17 e 18.
- BARROS, V. H. *Problema de Alocação de Berços em Portos Graneleiros com Restrições de Estoque e Condições Favoráveis de Maré*. Dissertação (Mestrado) — PPGEE/UFMA, Março 2010. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 16.
- BARROS, V. H.; COSTA, T. S.; OLIVEIRA, A. C.; LORENA, L. A. Model and heuristic for berth allocation in tidal bulk ports with stock level constraints. *Computers & Industrial Engineering*, Elsevier, v. 60, n. 4, p. 606–613, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.
- BIERWIRTH, C.; MEISEL, F. A survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 202, n. 3, p. 615–627, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 17.
- BRASIL. Ministério da Fazenda. Secretaria da Receita Federal do Brasil. *Portos (Marítimos, Fluviais e Lacustres)*. Brasil, 2016. Acessado: 09-03-2016. Disponível em: <<http://idg.receita.fazenda.gov.br/orientacao/aduaneira/importacao-e-exportacao/recinto-alfandegados/portos-maritimos-e-fluviais>>. Citado na página 14.
- DEGRASSI, S. *The seaport network Hamburg*. Dissertação (Mestrado) — Universität Hamburg, 2001. Citado na página 14.
- FU, M. C. Optimization for simulation: Theory vs. practice. *INFORMS Journal on Computing*, INFORMS, v. 14, n. 3, p. 192–215, 2002. Citado 3 vezes nas páginas 20, 22 e 23.
- HAMAD, R. et al. Modelagem de redes logísticas com custos de inventário calculados a partir da cobertura de estoque. *Produção*, SciELO Brasil, v. 21, n. 4, 2011. Citado na página 30.

- HARRELL, C. et al. *Simulation using promodel*. 3. ed. [S.l.]: McGraw-Hill Higher Education, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.
- LAW, A. M.; KELTON, W. D. *Simulation modeling and analysis*. 3. ed. [S.l.: s.n.], 2000. Citado na página 24.
- MIYAGI, P. E. *Introdução a simulação discreta*. São Paulo, SP: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos, 2004. Citado na página 24.
- MONTGOMERY, D. C. *Design and analysis of experiments*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2008. Citado na página 32.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. *Comércio marítimo internacional atinge 9,2 bilhões de toneladas pela primeira vez na história*. 2013. <<https://nacoesunidas.org/onu-comercio-maritimo-internacional-atinge-92-bilhoes-de-toneladas-/pela-primeira-vez-na-historia/>>. Acessado: 05-03-2016. Citado na página 13.
- SHANNON, R. E. Introduction to the art and science of simulation. In: *Proceedings of the 30th Conference on Winter Simulation*. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society Press, 1998. (WSC '98), p. 7–14. ISBN 0-7803-5134-7. Disponível em: <<http://dl.acm.org/citation.cfm?id=293172.293175>>. Citado 5 vezes nas páginas 22, 23, 24, 25 e 26.
- TORGA, B. L. M. *Modelagem, simulação e otimização em sistemas puxados de manufatura*. Tese (Doutorado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ, 2007. Citado 3 vezes nas páginas 20, 22 e 25.
- VALE S.A. *Portos e Terminais*. 2014. Acessado: 14-06-2016. Disponível em: <<http://www.vale.com/brasil/PT/business/logistics/ports-terminals/Paginas/default.aspx>>. Citado na página 27.
- VALE S.A. *30 years of the Ponta da Madeira Maritime Terminal*. 2016. Acessado: 14-06-2016. Disponível em: <<http://www.vale.com/brasil/EN/initiatives/innovation/30-years-marine-terminal/Pages/default.aspx>>. Citado na página 14.
- WANKE, P. Ship-berth link and demurrage costs: evaluating different allocation policies and queue priorities via simulation. *Pesquisa Operacional*, SciELO Brasil, v. 31, n. 1, p. 113–134, 2011. Citado na página 18.