

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Paôla Tatiana Felippi Tomé

**AVALIAÇÃO OPERACIONAL PORTUÁRIA UTILIZANDO
SIMULAÇÃO: ESTUDO DE CASO DO BERÇO 401 DO PORTO DE SÃO
FRANCISCO DO SUL - SC**

Florianópolis

2019

Paôla Tatiana Felippi Tomé

**AVALIAÇÃO OPERACIONAL PORTUÁRIA UTILIZANDO
SIMULAÇÃO: ESTUDO DE CASO DO BERÇO 401 DO PORTO DE SÃO
FRANCISCO DO SUL - SC**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em
Engenharia Civil do Centro Tecnológico da
Universidade Federal de Santa Catarina como
requisito para a obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia Civil

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Hering Coelho

Coorientador: Tiago Buss

Florianópolis

2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Tomé, Paôla Tatiana Felippi

Avaliação operacional portuária utilizando simulação: estudo de caso do berço 401 do Porto de São Francisco do Sul - SC / Paôla Tatiana Felippi Tomé; orientador, Alexandre Hering Coelho, coorientador, Tiago Buss, 2019.

111 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. simulação. 3. planejamento portuário. 4. operações portuárias. 5. são francisco do sul. I. Hering Coelho, Alexandre. II. Buss, Tiago. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

Paôla Tatiana Felippi Tomé

**AVALIAÇÃO OPERACIONAL PORTUÁRIA UTILIZANDO
SIMULAÇÃO: ESTUDO DE CASO DO BERÇO 401 DO PORTO DE SÃO
FRANCISCO DO SUL - SC**

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Civil e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Civil

Florianópolis-SC, 19 de novembro de 2019

Prof. Luciana Rohde, Dra.
Coordenadora do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Alexandre Hering Coelho, Dr.
Orientador

Tiago Buss
Coorientador

Prof. Marcos Noronha, Dr.
Membro

Oscar Schimidt Neto, Dr.
Membro

Este trabalho é dedicado ao meu avô Antonio, que me inspira a ser cada dia melhor.

AGRADECIMENTOS

À UFSC, por propiciar os meios para a realização deste trabalho.

Ao meu orientador, Alexandre Hering Coelho, pela forma dedicada e profissional pela qual conduziu seu trabalho de orientador.

Ao meu co orientador, Tiago Buss, pela paciência e o tempo dedicado a repassar seu conhecimento.

Ao meu esposo Tiago e ao meu filho Matheus por terem sido pacientes e me apoiado ao longo dessa trajetória.

A minha família pelo amor, confiança e apoio incondicional.

Aos meus amigos, que estiveram ao meu lado, e me proporcionaram momentos incríveis e necessários para eu conseguir concluir a graduação com êxito.

RESUMO

Atualmente o setor portuário brasileiro vem passando por alterações, com o objetivo de ser mais dinâmico, aumentar sua produtividade e principalmente a sua participação na matriz de transportes nacional. Nesse contexto, diversos terminais privados entraram em operação, assim como novos berços em portos públicos foram arrendados nos últimos anos.

As obras de grande vulto, como os terminais portuários, demandam grandes investimentos e podem impactar de forma significativa a logística da região ou até mesmo do país. Por essa razão, a análise e planejamento dessas infraestruturas se torna uma etapa muito importante, e nesse contexto, a utilização de modelos e simulação de sistemas para análises retrospectivas e preditivas vem ganhando cada vez mais espaço, tanto no âmbito do poder público, quanto em empresas privadas.

Além disso, a concorrência cada vez maior entre os mercados acaba por exigir melhorias na produtividade, eficiência e diminuição dos custos de produção.

Nesse contexto, o presente estudo trata da aplicação de um modelo de simulação para avaliação de um novo berço localizado no porto público de São Francisco do Sul, em Santa Catarina. Para o desenvolvimento do modelo foi utilizado o software Arena, e através de quatro cenários alternativos, foram feitas análises em relação aos tempos de fila, número de navios atendidos e índice de ocupação.

Palavras-chave: simulação; planejamento portuário; operações portuárias

ABSTRACT

Currently the Brazilian port sector has been undergoing changes, aiming to be more dynamic, to increase its productivity and especially its participation in the national transport matrix. In this context, several private terminals have entered into operation, as well as new berths in public ports have been leased in recent years.

Major works, such as port terminals, require large investments and can to impact significantly the logistics in the region or even the country. For this reason, the analysis and planning of these infrastructures becomes a very important step, and in this context, the use of models and simulation of systems for retrospective and predictive analysis has been gaining more and more space, in the public domain, as in private companies.

In addition, increasing competition between markets ultimately requires improvements in productivity, efficiency and lower production costs.

In this context, the present study deals with the application of a simulation model to evaluate a new berth located in the public port of São Francisco do Sul, in Santa Catarina. For the development of the model, the Arena software was used, and through four alternative scenarios, analyzes were made in relation to queue times, number of ships served and occupancy index.

Keywords: simulation; port planning; port operations

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplos de configurações típicas de terminais portuários.....	18
Figura 2 - Elementos de um terminal portuário – Porto de São Francisco do Sul	19
Figura 3 - Exemplo de cais contínuo	20
Figura 4 - Exemplo de cais com <i>dólfins</i>	21
Figura 5 - Berços de Paranaguá em cais contínuo e píeres com <i>dólfins</i>	22
Figura 6 - Pátios no Porto de Paranaguá	23
Figura 7 - <i>Shiploader</i> no Berço 101 do Porto de São Francisco do Sul.....	24
Figura 8 - Guindastes da APM Terminals no Porto de Itajaí	24
Figura 9 - Empilhadeira tipo Reach Stacker.....	25
Figura 10 - Operações gerais em terminais de granéis sólidos	26
Figura 11 – Fluxograma de operação portuária.....	26
Figura 12 - Componentes do terminal	27
Figura 13 - Procedimento para calcular a capacidade dos terminais.....	28
Figura 14 – Resultados do cálculo de capacidade de berços por Chang <i>et al</i> (2012)	32
Figura 15 - Concepção de um sistema.....	34
Figura 16 - Etapas do processo de modelagem e simulação	36
Figura 17 - Esquema de simulação de Shannon (1997)	38
Figura 18 - Etapas de um projeto de simulação – Promodel Corporation.....	40
Figura 19 - Classificação dos sistemas para modelagem	45
Figura 20 - Mudanças de estado da variável – Modelos discretos	46
Figura 21 - Mudanças de estado da variável – Modelos contínuos.....	47
Figura 22 - Esquema dos tipos de modelos usados na simulação por Harling & Bruce (1971).....	48
Figura 23 - Fluxograma do procedimento de análise do número de replicações	51
Figura 24 - Ambiente do Arena.....	52
Figura 25 - Exemplo de um modelo criado no Arena	54
Figura 26 - Tela de saída do <i>Input Analyzer</i>	55
Figura 27 - Exemplo de gráfico gerado no <i>Output Analyzer</i>	56
Figura 28 - Exemplo do uso do <i>Process Analyzer</i>	57
Figura 29 - Resultado da distribuição dos tempos de chegada dos navios – estudo Altiok, Almaz e Ghafoori	58
Figura 30 - Número de atracações anuais e tempo de espera simulado e observado	59

Figura 31 - Modelo da situação atual no estudo de Silva (2011).....	60
Figura 32 - Método adotado	63
Figura 33 - Localização do Complexo Portuário de São Francisco do Sul.....	67
Figura 34 - Áreas do Porto de São Francisco do Sul.....	68
Figura 35 - Evolução da movimentação no Complexo Portuário de São Francisco do Sul.....	69
Figura 36 - Principais produtos movimentados no Porto público de São Francisco do Sul (2018).....	70
Figura 37 - Natureza dos produtos movimentados no Porto de São Francisco do Sul em 2018.....	71
Figura 38 - Berço 101 – soja: demanda vs. Capacidade na estrutura atual.....	73
Figura 39 - Berços 101/401 e TGSC – soja: demanda vs. Capacidade	73
Figura 40 - Capacidade dinâmica de armazenagem – soja e milho: demanda vs. Capacidade	74
Figura 41 - Localização aproximada da área a ser arrendada no Porto de São Francisco do Sul.....	75
Figura 42 - Fluxograma do modelo de simulação	80
Figura 43 - Exemplo de chegada de navios.....	82
Figura 44 - Modelo de simulação do Porto no Arena	85
Figura 45 - Modelo de simulação do Porto no Arena, com zoom no 401.....	86
Figura 46 - Número de navios esperados e gerados na simulação em 2025	87
Figura 47 - Número de navios esperados e gerados na simulação em 2030	87
Figura 48 - Número de navios atendidos de Soja e Milho - 2025.....	88
Figura 49 - Número de navios atendidos de Soja e Milho - 2030.....	88
Figura 50 - Número de navios atendidos de Fertilizantes - 2025.....	89
Figura 51 - Número de navios atendidos de Fertilizantes – 2030	90
Figura 52 - Número de navios atendidos de siderúrgicos - 2025	90
Figura 53 - Número de navios atendidos de siderúrgicos – 2030	91
Figura 54 - Número de navios atendidos de outras cargas - 2025.....	91
Figura 55 - Número de navios atendidos de outras cargas - 2030.....	92
Figura 56 - Índice de ocupação dos berços por cenário - 2025	94
Figura 57 - Índice de ocupação dos berços por cenário - 2030.....	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Proporção entre tempo de espera na fila e tempo de operação.....	31
Tabela 2.	Tipos de distribuições consideradas pelo Arena.....	54
Tabela 3.	Exemplo de indicadores dos cenários de simulação do estudo de Silva (2011)....	61
Tabela 4.	Características operacionais dos berços de São Francisco do Sul.....	68
Tabela 5.	Índice de ocupação dos berços em 2018.....	71
Tabela 6.	Indicadores operacionais dos berços em 2018.....	72
Tabela 7.	Cenários considerados na simulação	77
Tabela 8.	Utilização dos berços em 2018	78
Tabela 9.	Ordem de prioridade adotada.....	80
Tabela 10.	Previsão das cargas e do número de navios.....	83
Tabela 11.	Número de navios atendidos por berço e cenário - 2025.....	92
Tabela 12.	Número de navios atendidos por berço e cenário - 2030.....	92
Tabela 13.	Tempos médios de fila por berço e cenário (em horas).....	93

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	Objetivo geral	17
1.1.2	Objetivos específicos	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1	ELEMENTOS PORTUÁRIOS	18
2.2	OPERAÇÕES PORTUÁRIAS	25
2.3	CAPACIDADE PORTUÁRIA	27
2.3.1	Capacidade de cais	29
2.3.2	Capacidade das estruturas de armazenagem	32
2.4	MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE SISTEMAS	34
2.4.1	Conceitos utilizados em simulação	43
2.4.2	Sistemas para modelagem e simulação	44
2.4.3	Análises estatísticas	49
2.5	O SOFTWARE ARENA	51
2.5.1	Input Analyzer.....	54
2.5.2	Output Analyzer.....	56
2.5.3	Process Analyzer	56
2.6	SIMULAÇÕES EM PORTOS UTILIZANDO O ARENA.....	57
3	MÉTODO	63
3.1	ETAPA DE PLANEJAMENTO	64
3.2	ETAPA DE MODELAGEM	64
3.3	ETAPA DE LEVANTAMENTO DE DADOS	65
3.4	ETAPA DE EXPERIMENTAÇÃO.....	65
3.5	ETAPA DE ANÁLISE DE RESULTADOS	66
3.6	ETAPA DE CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	66

4	ESTUDO DE CASO: O BERÇO 401 – PORTO DE SÃO FRANCISCO DO SUL	67
4.1	SOBRE O PORTO DE SÃO FRANCISCO DO SUL.....	67
4.1.1	Cargas movimentadas.....	70
4.1.2	Indicadores operacionais atuais.....	71
4.1.3	Gargalos existentes e perspectivas.....	72
4.2	SOBRE O BERÇO 401.....	75
4.3	APLICAÇÃO DO MÉTODO.....	76
4.3.1	Etapa de planejamento.....	76
4.3.2	Etapa de modelagem.....	78
4.3.3	Etapa de levantamento de dados.....	81
4.3.4	Etapa de experimentação.....	83
4.3.5	Etapa de análise dos resultados.....	86
4.3.6	Etapa de conclusões e recomendações.....	95
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	98
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	100
	Anexo A: Curvas de distribuição de chegada.....	104

1 INTRODUÇÃO

Tradicionalmente os portos (principalmente os públicos) são ambientes complexos, com muitas atividades sendo realizadas ao mesmo tempo, o que pode acarretar baixa produtividade e altos custos. Assim, a análise da capacidade portuária e a realização do planejamento operacional vêm se mostrando cada vez mais necessárias, uma vez que, com a importância que os portos passaram a ter no crescimento econômico das nações através do processo da globalização, as empresas passaram a buscar aqueles com maior eficiência, obrigando os portos a promover ações para diminuir os seus gargalos e tornar-se mais econômicos e eficientes (Paixão e Marlow, 2003).

De acordo com Arruda et al (2008), quando os armadores dos navios se deparam com portos com baixa qualidade operacional ou com longas filas, eles podem adotar duas soluções: repassar os custos adicionais (*demurrage*) aos clientes ou procurar outro porto com melhores condições.

“Para se destacar no mercado e aumentar sua competitividade, o porto deve oferecer infraestrutura adequada e eficiente para movimentação e armazenamento de cargas, segurança na logística de embarque e desembarque, serviços rápidos e um preço acessível (Caldeira et al, 2015 p 4).

No entanto, as intervenções dentro da estrutura portuária demandam altos custos e longo período de retorno (Ignacio e Neves, 2009). Dentro desse contexto, surgem técnicas que auxiliam a resolução de problemas de operação ou buscam analisar o comportamento que alterações no sistema causam, como a simulação. De acordo com Fraga *et al* (2017) a simulação tem diversas vantagens, sendo que a principal é justamente analisar o comportamento do sistema frente a diversas alterações sem a necessidade de enfrentar riscos ou disponibilizar recursos elevados.

Ainda, a simulação tem como uma das vantagens responder questões como: “o que aconteceria se?”, e essa resposta pode ser dada sem que o sistema ao qual se está estudando sofra qualquer interferência. Além disso, a análise pode ser em um sistema que ainda não existe, e as respostas podem auxiliar no desenvolvimento de projetos mais eficientes (FILHO, 2008).

Analisando o contexto portuário, Ignacio e Neves (2009) apontam que a simulação tem potencial para:

- Auxiliar no planejamento estratégico portuário: podem ser analisados os efeitos decorrentes das variações de demanda ou das mudanças nas configurações das instalações, como aumentar o número de guindastes, ou restringir o uso de algum berço, por exemplo;
- Auxiliar no planejamento operacional portuário: através da análise das capacidades em diferentes tipos de configuração.

A simulação computacional pode ser usada para investigar as implicações de modificações operacionais e logísticas nos terminais existentes, bem como no planejamento de novas instalações. A visualização tridimensional e as imagens "rápidas" dos desenvolvimentos de portos e terminais propostos podem ajudar no refinamento de layouts nos estágios iniciais do planejamento (Pianc, 2014).

Com os modelos de simulação, é possível analisar várias atividades e opções operacionais importantes, incluindo (Pianc, 2014):

- Empilhamento de contêineres no pátio e opções de layout;
- Capacidade e produtividade do pátio;
- Logística e capacidade dos *gates*;
- Seleção e operação de equipamentos nos terminais (cais e pátio);
- Rendimentos anuais do terminal;
- Requisitos e uso de armazenamento;
- Restrições no rendimento, por exemplo disponibilidade e utilização do berço, utilização do rebocador, efeitos de armazenamento variável, eficiência do navio.

Dentro desse contexto, o presente documento aborda a realização de um estudo de caso de um novo trecho de cais a ser implementado no porto público de São Francisco do Sul, utilizando a técnica de simulação através do software Arena. Para isso, são abordados os seguintes capítulos:

- Capítulo 1 – Introdução.

- Capítulo 2 – Revisão bibliográfica: contempla os resultados advindos das pesquisas na literatura realizadas como forma de estudo e entendimento do contexto tanto de simulação quanto do contexto portuário. São abordados os seguintes tópicos: operações portuárias; modelagem e simulação de sistemas e as funcionalidades do software Arena.
- Capítulo 3 – Método: o método utilizado para aplicação do caso é apresentado.
- Capítulo 4 – Estudo de Caso: primeiramente são apresentadas informações a respeito do porto de São Francisco do Sul, como forma de contextualização da problemática, e em seguida a aplicação do método e os resultados encontrados.
- Capítulo 5 – Considerações finais.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho consiste na análise comparativa do desempenho de diferentes configurações para implantação de um novo berço no porto público de São Francisco do Sul, em Santa Catarina, através da utilização de simulação.

1.1.2 Objetivos específicos

- Exploração de métodos para cálculo de capacidade portuária (cais, armazenagem e vias de acesso);
- Definição de um método que possa ser utilizado na determinação das melhores configurações para implantação de um terminal portuário;
- Identificação de dificuldades inerentes à criação de modelos de simulação portuária e soluções para elas;
- Identificação das características relevantes para a criação de um modelo de simulação para um terminal portuário.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De acordo com Arruda et al (2008), os portos são primeiramente terminais de cargas, que desempenham as seguintes funções:

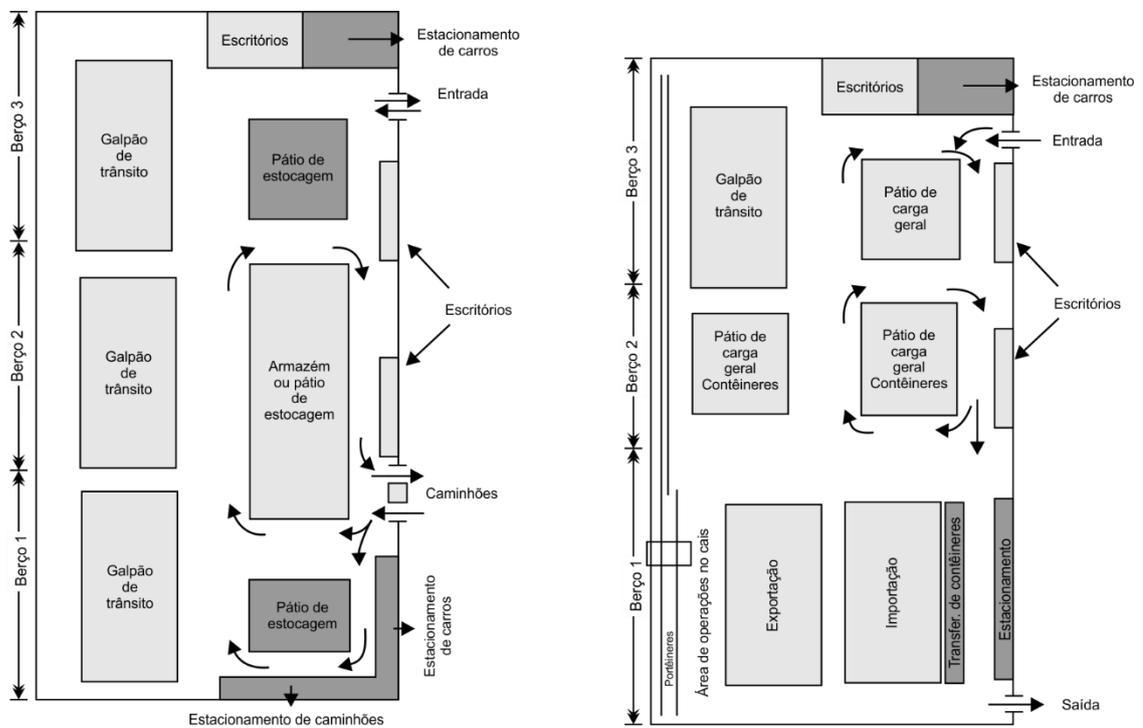
- Manuseio de cargas;
- Interface entre os modos de transporte;
- Consolidação de cargas.

Em função de sua importância no contexto do comércio mundial (já que constituem o começo ou o final do transporte internacional de cargas), há muitos complexos portuários que podem ser também considerados grandes áreas industriais, onde os terminais de cargas são uma parte do contexto global (Arruda et al, 2008).

2.1 ELEMENTOS PORTUÁRIOS

Alfredini e Arasaki (2018) apresentam configurações típicas de terminais portuários, como mostrado na Figura 1, que traz na imagem da esquerda um terminal de carga geral e na da direita um terminal de multicargas.

Figura 1 - Exemplos de configurações típicas de terminais portuários



Fonte: Adaptado de Alfredini e Arasaki (2018)

Em um terminal portuário há diversos elementos, sendo que para alguns há especificações em função da carga movimentada. De forma geral, destaca-se o acesso aquaviário, a infraestrutura de acostagem, a infraestrutura de armazenagem, os equipamentos e a infraestrutura terrestre, como mostra a Figura 2.

Figura 2 - Elementos de um terminal portuário – Porto de São Francisco do Sul



Fonte: Adaptado de SCPar (2019)

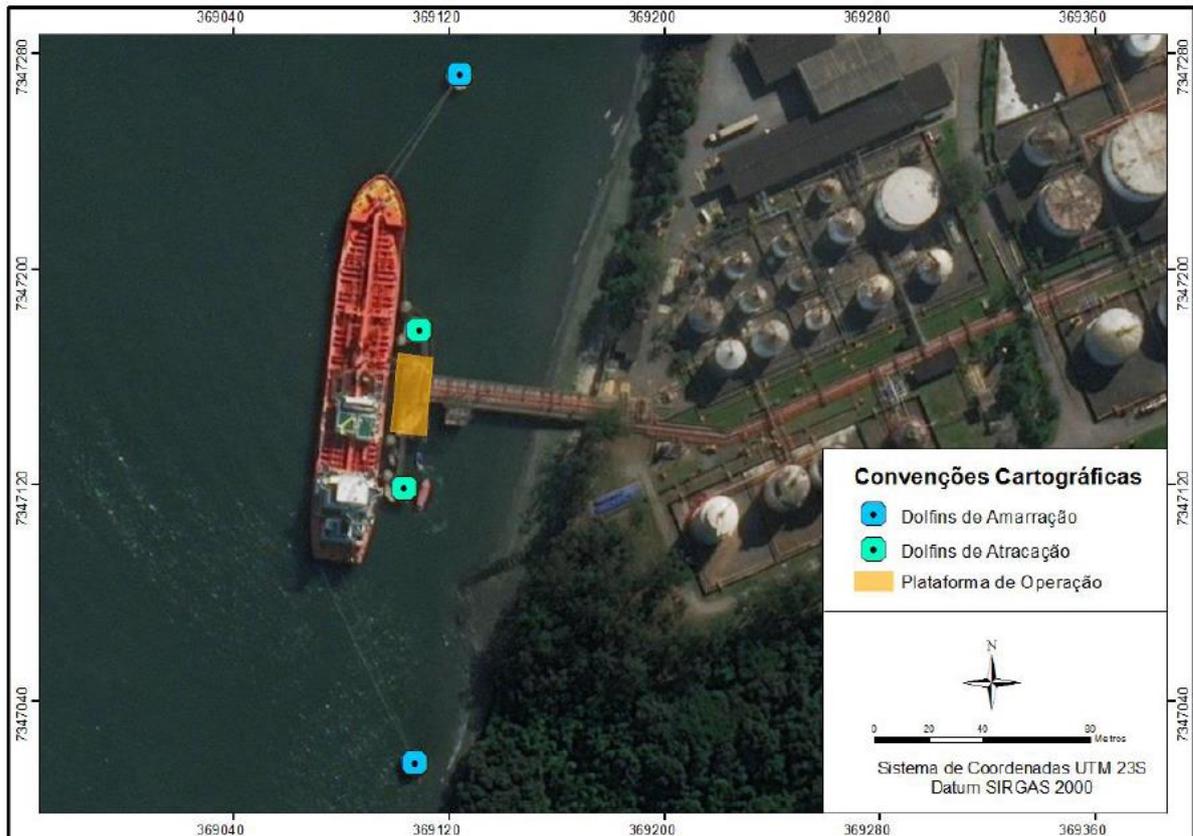
A infraestrutura de acostagem refere-se principalmente aos berços e as obras de abrigo. Os berços são as estruturas onde o navio atraca para carregamento ou descarregamento da carga (ou dos passageiros), e que compõem o cais. De acordo com Alfredini e Arasaki (2014) apud Triska (2015), os cais de acostagem podem ser de dois tipos: estruturas contínuas e com elementos discretos. O cais é dito contínuo quando todos os elementos (acesso, suporte de equipamentos, atracação e amarração) estão integrados em uma mesma plataforma, que está conectada em toda a sua extensão com a área primária do porto, como mostra a Figura 3. Essa configuração geralmente é considerada melhor em termos de flexibilidade para as operações, pois possibilita a movimentação de todos os tipos de carga. Além disso, o número de berços não precisa ser necessariamente fixo, pois podem ser operados mais navios de comprimentos menores, por exemplo.

Figura 3 - Exemplo de cais contínuo



Fonte: Google Earth

Por outro lado, os cais com elementos discretos geralmente são projetados para movimentações específicas (com equipamentos específicos), e são constituídos por elementos como plataforma de operação, ponte de acesso e *dólfins*. Na maior parte das vezes os custos de implantação desse tipo de configuração são relativamente menores do que para o cais contínuo, mas também restringe a operação com alguns tipos de cargas (Triska, 2015). A Figura 4 mostra um terminal do Porto de Santos, cuja infraestrutura de acostagem é composta por um píer, com plataforma de operação, quatro *dólfins* e uma ponte de acesso (Brasil, 2019).

Figura 4- Exemplo de cais com *dólfins*

Fonte: Brasil (2019)

Naturalmente um porto pode ser composto pelos dois tipos de estrutura, onde alguns terminais são de cais contínuo e outros compostos por elementos discretos, como se observa no Complexo Portuário de Paranaguá, mostrado através da Figura 5.

Figura 5 - Berços de Paranaguá em cais contínuo e píeres com *dolphins*



Fonte: Brasil (2018)

As estruturas de armazenagem em um porto servem como um pulmão, para dar mais celeridade às operações, e assim geralmente as cargas devem ficar o menor tempo possível armazenadas, sendo que alguns portos inclusive estipulam um número máximo de dias, mediante a cobrança de uma alta sobretaxa. Há terminais que podem funcionar sem essas estruturas, operando assim por transferência direta, mas são pouco usuais e geralmente empregados quando há pouca carga movimentada, de forma que os volumes não justifiquem os custos de implantação. Os elementos que fazem parte da infraestrutura de armazenagem são:

- Pátios: a céu aberto, são utilizados para cargas que não sofrem danos causados por intempéries. Geralmente são utilizados para armazenagem de contêineres, carga geral e minérios, veículos, produtos siderúrgicos, dentre outros.
- Armazéns: diferentemente dos pátios, são utilizados para cargas que necessitam de proteção a intempéries, como o açúcar, por exemplo.
- Silos: podem ser verticais ou horizontais e são muito utilizados para o armazenamento de grãos vegetais, como soja e milho, mas também podem ser utilizados para grãos minerais, como alumina.

- Tanques: estrutura utilizada para a armazenagem de granéis líquidos, como combustíveis e produtos químicos (líquidos).
- Esferas: as esferas são utilizadas na armazenagem de gás liquefeito de petróleo (GLP).

Figura 6 - Pátios no Porto de Paranaguá



Fonte: Brasil (2018)

Os equipamentos utilizados estão ligados de forma direta com a produtividade e a capacidade dos terminais e dependem do tipo de carga movimentada. Geralmente eles podem ser divididos entre os que se localizam no cais e aqueles que se localizam na retroárea, sendo que os primeiros são os responsáveis pela movimentação da carga de e para os navios, enquanto que os segundos tem diversas funções. Os mais usuais são:

- *Shiploader e shipunloader*: ambos são equipamentos utilizados na movimentação de granéis sólidos, sendo o primeiro utilizado para carregamento e o segundo para descarregamento.

Figura 7 - *Shiploader* no Berço 101 do Porto de São Francisco do Sul



Fonte: Brasil (2017)

- Outros tipos de guindastes: podem ser guindastes sobre pneus (MHC), utilizados na movimentação de carga geral e contêineres ou guindaste sobre trilhos, que se movimentam ao longo do cais através do seu trilho. O portêiner é um guindaste sobre trilhos utilizado na movimentação de contêiner. Há também os guindastes de bordo, que são equipamentos que fazem parte dos navios, e não ao cais.

Figura 8- Guindastes da APM Terminals no Porto de Itajaí



Fonte: Brasil (2018)

- Moegas rodoviária ou ferroviária: são utilizadas para recebimento ou condução do granel sólido para esteiras, caminhões ou vagões.
- Esteiras: geralmente são utilizadas na movimentação de granéis sólidos da armazenagem para o cais.
- Empilhadeiras: também são guindastes, mas utilizados na retroárea. Podem ser do tipo *fork lift*, *Rubber tyred gantry crane (RTG)*, *empty handler* ou *reach stackers*, são veículos que usualmente são utilizados na movimentação de contêineres em armazéns, pátios ou mesmo para a movimentação dos contêineres em veículos (caminhões) que os levam ou trazem do cais.

Figura 9 - Empilhadeira tipo Reach Stacker

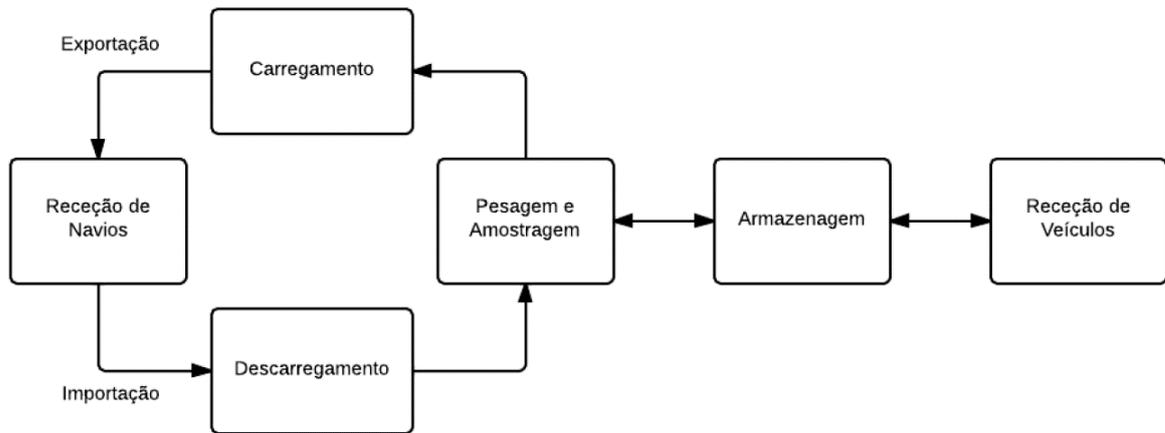


Fonte: Trimak (2019)

2.2 OPERAÇÕES PORTUÁRIAS

De acordo com Martingo (2014), tratando especificamente de terminais de granéis sólidos, como pode haver uma gama maior de produtos do que em terminais de contêineres ou nos terminais de líquidos, os processos logísticos possuem um papel bem relevante. A Figura 10 traz uma síntese das operações em terminais desse tipo, apresentada pelo autor.

Figura 10 - Operações gerais em terminais de granéis sólidos

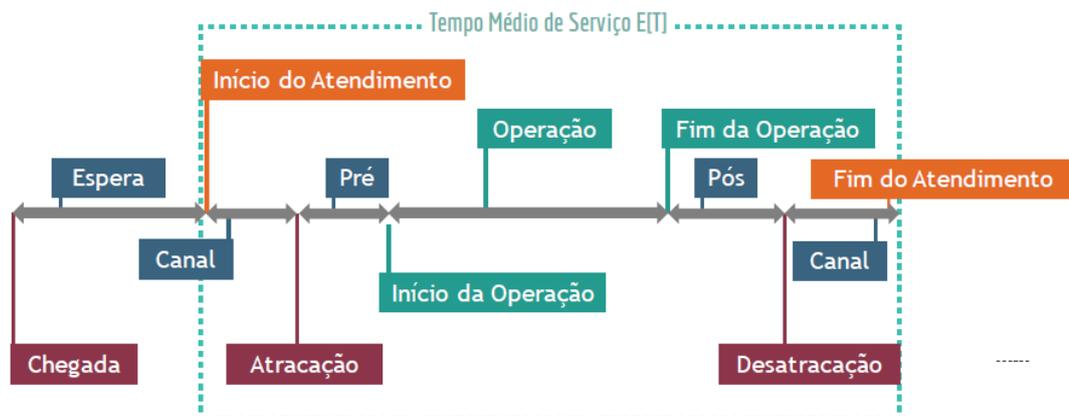


Fonte: Martingo (2014)

O carregamento, no caso de exportação, ou o descarregamento, no caso de importação, são as atividades geralmente mais críticas no processo, uma vez que suas produtividades podem afetar a capacidade de atendimento do cais. Assim: “há que ter especial atenção na previsão e dimensionamento do número e tipo de equipamentos carregadores de modo a não condicionar as operações” (Martingo, 2014 p47).

Brasil (2015) apresenta a Figura 11, que traz um fluxograma padrão da operação portuária, destacando o tempo médio de serviço, que corresponde ao tempo entre o início e o fim do atendimento. Isso porque, os navios ao chegar em um porto, geralmente necessitam aguardar a disponibilidade de berço para iniciar o acesso ao canal e o próprio atendimento.

Figura 11 – Fluxograma de operação portuária



Fonte: Brasil (2015)

2.3 CAPACIDADE PORTUÁRIA

De acordo com Brasil (2015), indicadores de capacidade das instalações portuárias podem ser calculados através de diversas metodologias, que trazem resultados diferentes, uma vez que a capacidade é uma função de utilização, produtividade e nível de serviço. Assim, geralmente separam-se as atividades de um terminal em dois componentes: processamento de fluxo e armazenamento, como pode ser observado na Figura 12.

Figura 12 - Componentes do terminal

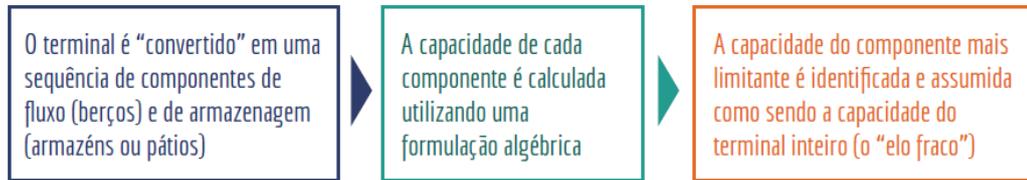


Fonte: Brasil (2015)

No caso das instalações que compõem os componentes de processamento de fluxo, a capacidade é definida como “capacidade dinâmica”, e é calculada em função da produtividade de tais instalações. Para as instalações dos componentes de armazenamento, a capacidade é definida como “capacidade estática”, e calculada pela forma de utilização das mesmas, lembrando que nem todos os terminais portuários possuem os componentes de armazenamento (Brasil, 2015).

De forma geral, a capacidade do terminal como um todo é dada em função do componente limitante, como mostra a Figura 13, que traz o procedimento para calcular a capacidade de diferentes terminais de acordo com o Plano Mestre de Logística Portuária (PNLP) (Brasil, 2015).

Figura 13 - Procedimento para calcular a capacidade dos terminais



Fonte: Brasil (2015)

A UNCTAD (2012) entende que a capacidade de um terminal pode ser definida como o tráfego máximo que ele pode manipular em um determinado cenário. No entanto, como as condições em que esse limite pode ser calculado são diferentes, existem vários conceitos de capacidade.

Como resultado, alguns critérios podem ser considerados para o cálculo da capacidade, tais como (UNCTAD, 2012):

- Aqueles ligados a otimização econômica das instalações;
- Aos relacionados à saturação das instalações; e
- As condições que estão relacionadas à qualidade de serviço mínima aceitável pelos usuários. Como por exemplo, um aumento no tráfego pode fazer com que os clientes percebam uma diminuição na qualidade do serviço do terminal.

Pianc (2014) em seu Manual para desenvolvimento de Planos Mestres, cita que a capacidade portuária é, em princípio, uma função do calado, comprimento do cais, área do pátio, densidade do pátio, horas de operação e valores teóricos de produtividade no manuseio de carga comparados com outros portos. Este Manual cita ainda que a capacidade é uma medida dos volumes que podem ser manipulados por um porto ou terminal com uma qualidade de serviço definida. Assim, a avaliação da capacidade pode ser usada em conjunto com as previsões de demanda de carga para identificar oportunidades de melhoria da capacidade dos terminais, bem como definir necessidades de obras de engenharia e requisitos de equipamento necessários para permitir que o porto consiga atender os volumes de carga previstos.

2.3.1 Capacidade de cais

A capacidade de cais de um porto é um fator muito importante dentro das análises de planejamento portuário, tanto por ser o atendimento de cais um dos mais frequentes gargalos, quanto por investimentos nesse tipo de infraestrutura geralmente serem elevados. Ao se comparar a demanda prevista para um horizonte de planejamento, com a capacidade de cais, pode-se observar se essa demanda se torna superior à capacidade de atendimento em algum tempo do horizonte de previsão (Triska, 2015).

Para o cálculo das capacidades dos componentes de um porto, há diversas metodologias na literatura. No entanto, a mais utilizada comumente, inclusive nos programas de planejamento do Governo Federal para o setor portuário, ou seja, o PNLP e os Planos Mestres dos Complexos Portuários, elaborados pela Secretaria de Portos é dada por:

$$C = \frac{\rho \times A \times n_b}{\bar{T}} \times \bar{L} \quad (2.1)$$

em que:

C : capacidade do trecho de cais (unidades/ano)

ρ : índice de ocupação admissível de cais (adimensional)

A : tempo operacional disponível no ano (h/ano)

n_b : número de berços do trecho de cais (adimensional)

\bar{T} : tempo médio de atendimento para o trecho de cais (h/navio)

\bar{L} : lote médio atendido no trecho de cais (unidades/navio)

Alfredini e Arasaki (2018) mencionam que a capacidade de um berço está muito atrelada à capacidade dos equipamentos que o compõe, além do número de navios que frequenta, tipo de carga, dentre outros. Uma forma de se determinar essa capacidade pode ser através da seguinte equação (UNCTAD, 2012):

$$c_b = P \times N \times n_{hy} \times m_b \quad (2.2)$$

em que:

c_b : movimentação anual por berço (t/ano ou TEU/ano)

P : produtividade na operação por equipamento (t/h)

N : número de berços

n_{hy} : número de horas operacionais por ano

m_b : taxa aceitável de ocupação do berço

Durante os anos 80 e 90 a capacidade dos terminais de contêineres dos portos da Coreia do Sul eram calculados através da chamada “Fórmula Tradicional” dada por (Chang *et al*, 2012):

$$V = N \times C \times E \times K \times H \times D \times O \times U \quad (2.3)$$

em que:

V : capacidade anual do berço

N : número de equipamentos do berço (guindastes)

C : produtividade horária do equipamento

E : índice de eficiência do equipamento (72%)

K : eficiência após subtrair o efeito de interferência entre guindastes (90%)

H : jornada de trabalho horária (18-24)

D : dias úteis anuais (330-365)

O : taxa de utilização do berço (45-70%)

U : taxa de trabalho dos guindastes (72-75%)

Atualmente o governo coreano tem usado a seguinte fórmula na maioria de seus planos de desenvolvimento portuário:

$$V = ACTUAL \times D \times H \times O \times G \quad (2.4)$$

em que:

$ACTUAL$: produtividade observada da transferência de cargas entre o berço e o navio

G : coeficiente utilizado para considerar o tempo de atracação e desatracação (0.9)

As variáveis ρ (índice de ocupação admissível) e m_b (taxa aceitável de ocupação do berço) e O (taxa de utilização do berço) referem-se à mesma ideia: determinar qual é o percentual do tempo em que o berço opera. Isso porque não necessariamente o berço operando 100% do tempo é a fração ideal, já que uma ocupação máxima muito possivelmente acarretará longas filas de espera de navios, que não é o esperado pelo mercado. Há de se considerar também que muitas vezes não há demanda o suficiente para o berço operar o tempo todo.

De acordo Pianc (2014), as taxas de ocupações dos berços geralmente baseiam-se em manter uma proporção média de tempo de espera para tempo de operação menor que 0,3 para terminais a granel, 0,2 para operações gerais de carga até cerca de 0,1 para terminais de contêineres. Os números aceitáveis de ocupação dos berços variam de acordo com o número de berços disponíveis no terminal, bem como o tipo de terminal. A Tabela 1 mostra o tempo médio de espera das embarcações (como uma porcentagem do tempo de serviço) na fila que supõe chegadas aleatórias das embarcações.

Tabela 1. Proporção entre tempo de espera na fila e tempo de operação

Taxa de ocupação do berço	Número de berços							
	1	2	3	4	5	6	7	8
30%								
40%	0,32	0,08	0,03	0,02	0,01	0	0	0
50%	0,48	0,14	0,06	0,03	0,02	0,01	0,01	0
60%	1,08	0,42	0,20	0,13	0,08	0,06	0,05	0,04
70%	1,70	0,72	0,42	0,27	0,19	0,14	0,11	0,09
80%	2,95	1,40	0,82	0,57	0,43	0,34	0,27	0,22
90%	6,60	3,20	2,00	1,34	1,12	0,92	0,76	0,64

Fonte: Adaptado de Pianc (2014)

Essa tabela se baseia na teoria de filas, que usa uma abordagem estatística para derivar tempos médios de espera para navios com base em diferentes utilizações.

Nesse contexto, Chang *et al* (2012) apresentam o cálculo de diversos indicadores, mediante alguns cenários de demanda e número de berços de um terminal de contêineres. Pelo resultados, apresentados na Figura 14, pode ser observado que para uma mesma demanda, conforme aumenta-se o número de berços, diminui-se a capacidade de cada um, uma vez que a demanda estará sendo dividida, e com isso o tempo de utilização (ou taxa de ocupação do berço) também.

Figura 14 – Resultados do cálculo de capacidade de berços por Chang *et al* (2012)

Demand (TEU)	Demand (ships)	No. of berth	Annualized capital cost	Waiting time cost	LRTC	LRAC	Berth capacity (TEU)
100 000	100	1	52 500	21 736	74 236	742.36	100 000
100 000	100	2	55 000	19 793	74 793	747.93	50 000
100 000	100	3	57 500	19 752	77 252	772.52	33 333
100 000	100	4	60 000	19 751	79 751	797.51	25 000
200 000	200	1	52 500	48 330	100 830	504.15	200 000
200 000	200	2	55 000	39 835	94 835	474.17	100 000
200 000	200	3	57 500	39 515	97 015	485.08	66 667
200 000	200	4	60 000	39 503	99 503	497.52	50 000
300 000	300	1	52 500	17 810	70 310	234.37	300 000
300 000	300	2	55 000	13 178	68 178	227.26	150 000
300 000	300	3	57 500	12 944	70 444	234.81	100 000
300 000	300	4	60 000	12 931	72 931	243.10	75 000
1 600 000	1600	2	55 000	147 916	202 916	126.82	800 000
1 600 000	1600	3	57 500	78 964	136 464	85.29	533 333
1 600 000	1600	4	60 000	70 833	130 833	81.77	400 000
1 600 000	1600	5	62 500	69 317	131 817	82.39	320 000
1 600 000	1600	6	65 000	69 026	134 026	83.77	266 667
1 600 000	1600	7	67 500	68 974	136 474	85.30	228 571
1 600 000	1600	8	70 000	68 965	138 965	86.85	200 000

Fonte: Chang *et al* (2012)

A simulação das operações de um terminal portuário é outra forma eficiente de se determinar a capacidade de cais e do porto como um todo, uma vez que esse indicador é um dos resultados da simulação.

2.3.2 Capacidade das estruturas de armazenagem

A armazenagem é uma instalação muito importante dentro das operações de um terminal portuário, uma vez que permite a transferência de carga entre o navio e os modos de transporte terrestre. De acordo com Brasil (2015), o cálculo da capacidade é dado em função de diversos fatores, tais como: tamanho do lote, distribuição das chegadas dos navios, taxas de carga ou descarga do navio, frequência e velocidade com que a carga é transferida ao meio de transporte.

Como esses fatores são estocásticos, fica difícil estabelecer a capacidade de armazenagem necessária para o porto. Brasil (2015) sugere a utilização de simulações ou do

Método de Monte Carlo para verificar a variação do estoque no decorrer do tempo. Ainda, em função dessas dificuldades, Brasil (2015) estabelece que a capacidade necessária para a armazenagem de cargas pode ser calculada em função do lote máximo esperado, de acordo com a natureza da carga:

- Granéis líquidos: armazenagem correspondente a 3 a 4 vezes o lote máximo esperado;
- Granéis liquefeitos: armazenagem correspondente a 2 a 3 vezes o lote máximo esperado;
- Granéis sólidos: armazenagem correspondente a 4 a 6 vezes o lote máximo esperado (pátios ao ar livre); 3 a 4 vezes para armazéns e 2 a 4 vezes para silos;
- Carga geral solta: devido ao mix de produtos, fica mais difícil determinar a capacidade necessária de armazenagem. Como regra simples, ela deve ser suficiente para atender o armazenamento da carga de dois navios sucessivos.

Alfredini e Arasaki (2018) apresentam a seguinte equação para cálculo da área de armazenagem:

$$A_{gr} = \frac{f_{area} \times f_{mercadoria} \times N_C \times t_{d,méd}}{m_c \times h_s \times me_{méd} \times 365} \quad (2.5)$$

Em que:

A_{gr} : área de estocagem bruta (m²);

f_{area} : relação entre a superfície bruta e a superfície líquida, considerando as faixas de tráfego para os equipamentos (valor típico = 1,5);

$f_{mercadoria}$: devido ao desmonte e estocagem separada das entregas especiais, bens danificados, etc. (valor típico = 1,2);

N_C : movimentação total anual que passa pela estrutura de armazenagem (toneladas);

$t_{d,méd}$: estadia média da mercadoria, em dias;

m_c : taxa média de ocupação do armazém (usualmente é adotado a faixa entre 0,65 e 0,75 – depende das flutuações da estadia e do número de berços);

h_s : altura média do empilhamento (m);

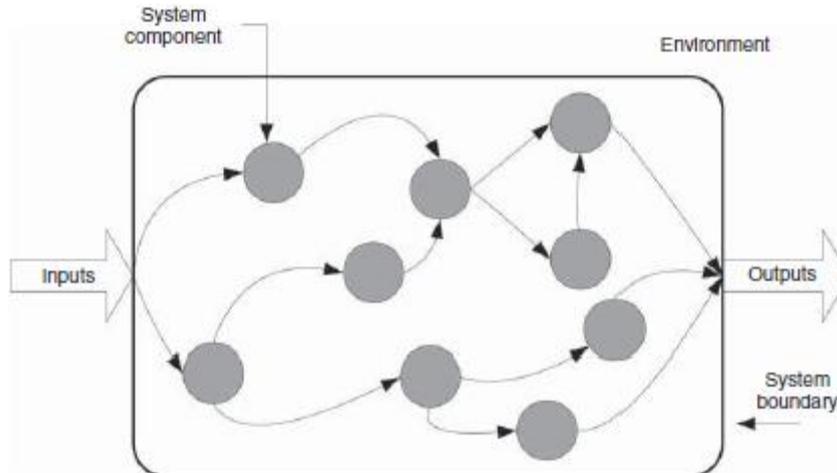
$me_{méd}$: massa específica média da mercadoria (t/m³).

Ainda de acordo com o autor, em caso de haver sazonalidade, a área para armazenagem deve ser calculada em função dos valores de pico (meses com maior movimentação), e não pela movimentação média anual.

2.4 MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE SISTEMAS

De acordo com Portugal (2005), a simulação deve ser entendida como uma ferramenta de auxílio na tomada de decisão ou para um processo de otimização de um sistema. Rossetti (2016) mostra através da Figura 15 a concepção de um sistema, que normalmente requer entradas e produz saídas usando componentes internos. De acordo com o autor, a forma no qual é modelado sistema específico dependerá do uso pretendido dele.

Figura 15 - Concepção de um sistema



Fonte: Rossetti (2016)

Geralmente os modelos de simulação tem como razão a busca de respostas para os seguintes sistemas (Filho, 2008):

- Sistema real que ainda não existe: tendo como foco o planejamento de um sistema que se busca implementar;
- Verificar se o sistema real é dispendioso: para verificar se a inserção de um novo equipamento, por exemplo, é vantajosa;

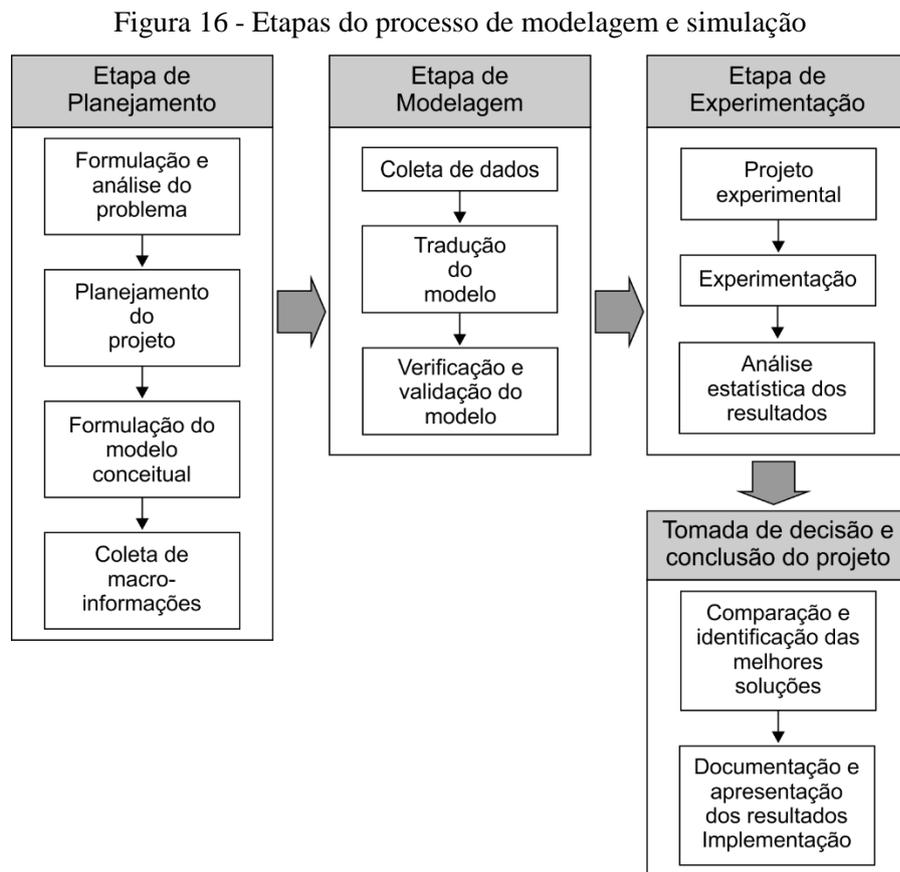
- Verificar se o sistema real é apropriado: para testar os efeitos e as respostas em caso da ocorrência de uma determinada situação, como por exemplo, o atendimento em situações de emergência.

Filho (2008) apresenta quatro passos clássicos para a formulação de estudos com modelagem e simulação, sendo eles:

- Etapa de planejamento: etapa inicial, onde deve se estabelecer os propósitos e objetivos do estudo. O planejamento contempla a análise da disponibilidade de recursos (como pessoal, *hardware*, *software*, etc.), além da definição dos cenários analisados e o cronograma das atividades. É recomendável traçar um esboço do sistema, abordando os componentes, as variáveis e as interações;
- Etapa de modelagem: nesta etapa os dados e informações deverão ser levantados e apurados, se for necessário. Além disso, o modelo deve ser codificado para a linguagem de simulação a ser utilizada, e a verificação e validação deve ser realizada (representatividade do modelo simulado frente do modelo real);
- Etapa de experimentação: antes de se realizar a própria simulação, deve ser determinado o projeto experimental mais adequado às respostas que se busca, sendo que o principal objetivo é se determinar o maior número de informações com o menor número de experimentações. Após a execução da primeira rodada de simulação, pode ser observado que há a necessidade de um maior número de execuções para se chegar ao resultado esperado;
- Tomada de decisão e conclusão do projeto: inicialmente trata da definição de como os resultados da simulação serão apresentados. Geralmente os estudos de simulação buscam identificar diferenças entre cenários, e assim, é necessária a identificação de quais variáveis respostas traduzem essas diferenças. Além disso, deve se tomar cuidado em documentar todo o processo de desenvolvimento do modelo,

deixando claro os objetivos, as premissas utilizadas, técnicas e métodos, resultados, análises, conclusões e recomendações.

Esses quatro passos estão apresentados de forma esquemática na Figura 16.



Fonte: Filho (2008)

Shannon (1997) apud Portugal (2005) propõe as seguintes etapas no processo de simulação de sistemas:

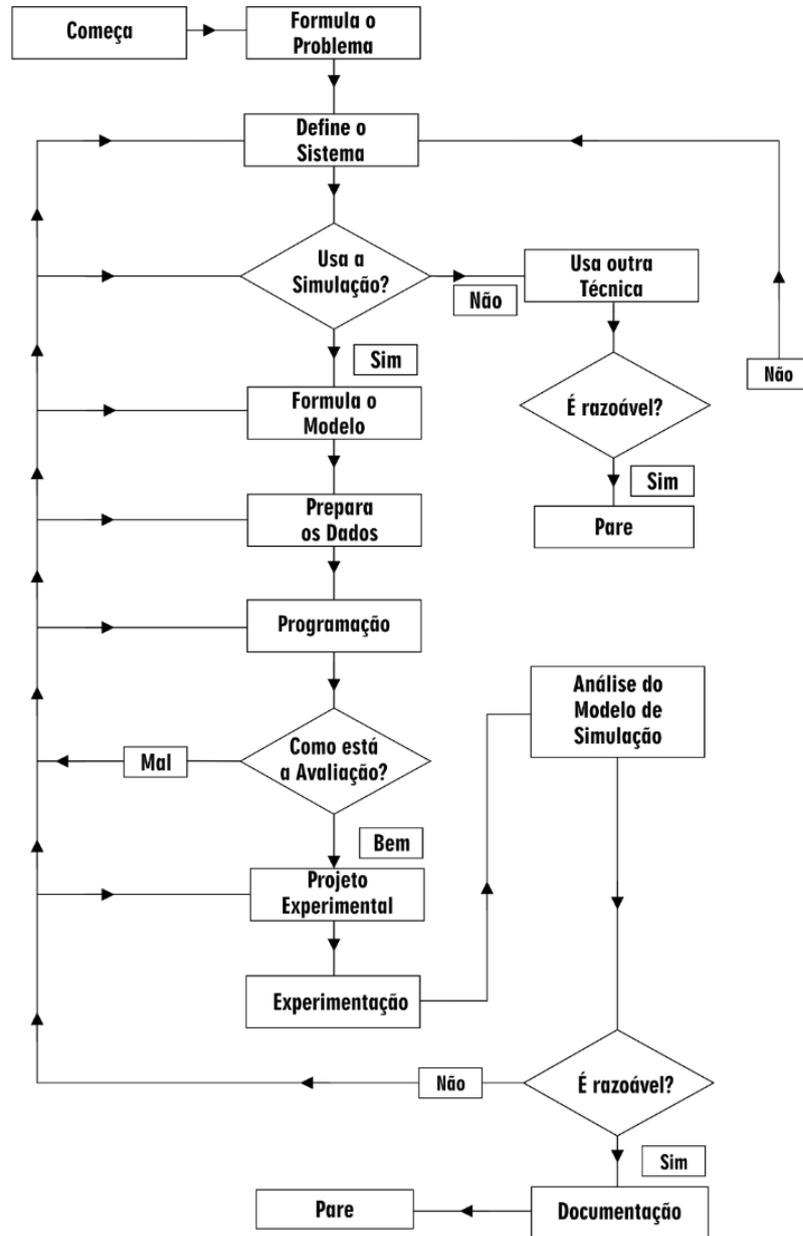
- Definição do sistema: abordagem inicial, onde devem ser definidos os limites, restrições e as medidas de efetividade;
- Formulação do modelo: criação de um bloco ou fluxograma que represente a situação real;

- c. Preparação dos dados: identificação e tratamento dos dados necessários para a modelagem;
- d. Programação: descrição do modelo na linguagem a ser utilizada;
- e. Validação: análise do comportamento do modelo frente a situação real, dado certo grau de confiança;
- f. Planejamento do experimento: consiste no planejamento do experimento para gerar os resultados e informações esperadas;
- g. Experimentação: execução da simulação do experimento;
- h. Análise dos resultados da simulação: a partir dos dados gerados na simulação, gerar os resultados.

O fluxograma que mostra o método de Shannon pode ser visualizado através da Figura

17.

Figura 17 - Esquema de simulação de Shannon (1997)



Fonte: Portugal (2005)

O processo de construção de um modelo de simulação apresenta as seguintes etapas, de acordo com Ignacio e Neves (2009):

- i. Conhecimento da questão: identificar o foco principal, quais são os dados necessários, as restrições do projeto, dentre outros;
- ii. Modelo conceitual: quais serão as atividades do processo, os recursos e os dados;

- iii. Análise de dados: parâmetros de distribuição de probabilidade;
- iv. Modelagem: é um processo iterativo, iniciando com um modelo simples, e aumentando-se a complexidade, conforme necessário;
- v. Validação: verificar se o modelo atende ao esperado;
- vi. Calibração: ajustar os parâmetros das distribuições para obter os indicadores para análise de comparação;
- vii. Resultados referenciais: análise de um caso base;
- viii. Cenários: análise de alternativas diferentes em relação ao cenário base;
- ix. Análises dos *trade-offs*: pode-se construir um modelo de decisão.

Rossetti (2016) intitula a sua metodologia de modelagem como DEGREE, uma referência à letra inicial (em inglês) de cada uma das seis etapas que a compõe:

1. Definição do problema: ajuda a garantir que o problema esteja sendo resolvido de modo correto;
2. Estabelecimento das medidas de performance: as métricas devem ser coerentes com o problema;
3. Geração de soluções alternativas: devem ser analisadas várias soluções para o mesmo problema;
4. Ranqueamento das soluções alternativas: o analista precisa avaliar o desempenho as alternativas analisadas;
5. Avaliação (*Evaluate*) e iteração durante o processo: o conceito de iteração reconhece que o processo de solução de problemas pode ser repetido até que o grau desejado de fidelidade da modelagem seja alcançado;
6. Execução e avaliação da solução: executar a solução e analisar os resultados com a implementação das decisões.

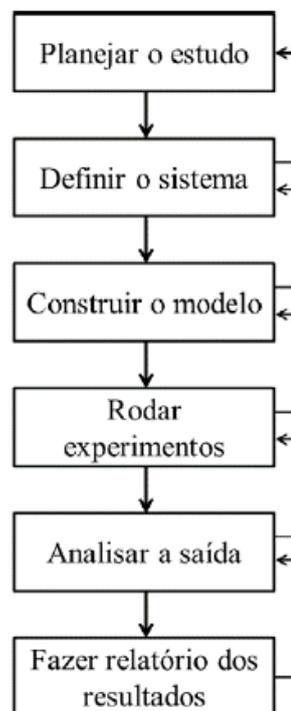
Com base nessas seis etapas, o autor ainda apresenta uma metodologia específica para o desenvolvimento de um modelo de simulação, que contempla também seis fases:

- Fase 1 - Formulação do problema: as seguintes ações devem ser realizadas: definição do problema; definição do sistema; estabelecimento das métricas de análise; concepção do modelo e premissas do modelo. A fase 1 contempla as etapas 1 e 2 do método DEGREE.

- Fase 2 - Criação do modelo de simulação: contempla a tradução do modelo; modelagem dos dados de entrada; verificação e validação do modelo. Está relacionada à etapa 3 do método DEGREE.
- Fases 3 e 4 - Análise experimental: contempla as rodadas preliminares, os experimentos finais e a análise dos resultados, capturando a noção de iteração e está, portanto, relacionada às etapas 3 e 4 do método DEGREE.
- Fase 5 - Documentação e resultados: a documentação é essencial ao tentar garantir o uso contínuo e futuro do modelo de simulação
- Fase 6 - Implementação: reconhece que os projetos de simulação geralmente falham se não houver acompanhamento das soluções recomendadas.

Promodel Corporation (2011) apud Sarnaglia (2014) coloca que não há regras precisas sobre as etapas em um processo de simulação. No entanto, alguns passos são recomendados, conforme apresentado na Figura 18.

Figura 18 - Etapas de um projeto de simulação – Promodel Corporation



Fonte: Promodel Corporation apud Sarnaglia (2014)

O primeiro passo refere-se ao planejamento do estudo, onde devem ser abordadas questões como (Promodel Corporation, 2011):

- Definição dos objetivos: a simulação deve ser feita apenas se ela puder auxiliar no atingimento dos objetivos. Geralmente os objetivos estão correlacionados a análise de performance, capacidade ou sensibilidade, estudos comparativos e de otimização, dentre outros.
- Identificação das restrições: geralmente as restrições estão associadas a disponibilidade de recursos financeiros, dados e tempo, e é um item tão importante quanto os objetivos.
- Preparar as especificações da Simulação: está relacionada às exigências da simulação, ou seja, determinação de escopo, nível de detalhes, precisão, formas dos resultados e dos experimentos.

A definição do sistema, está relacionada à concepção inicial do modelo (modelo conceitual), e à busca de dados e informações que irão alimentá-lo. O autor cita que as seguintes sub etapas devem ser discutidas no passo 2:

- determinação dos dados: refere-se a identificação dos dados necessários para a construção do modelo. Para isso, pode-se utilizar fluxogramas que mostre o fluxo físico de atividades ou das entidades dentro do sistema, e assim poder identificar quais são os dados necessários para compor tal fluxo;
- usar fontes apropriadas de dados: identificar quais as melhores fontes de dados para o levantamento;
- fazer suposições quando necessário: muitas vezes será necessária a adoção de premissas em função de não disponibilidade de dados ou mesmo de não se conhecer a realidade de algum processo, ou ainda para torná-lo mais simples;
- converter os dados para um formato útil: pode ser necessário utilizar métodos para que os dados sejam convertidos em um formato compatível com a sua utilização. No caso da simulação, são largamente utilizadas curvas de distribuição, que servem para descrever o comportamento de uma dada variável;

- documentar e validar os dados: etapa importante para documentar todo o processo e conseguir validar os dados levantados.

A etapa de construção do modelo não precisa necessariamente iniciar apenas após encerrar a fase 2, ou seja, após o levantamento de todos os dados. O modelo pode passar por um processo de refinamento progressivo, onde ele vai sendo construído por estágios. Procedendo dessa forma, fica mais fácil visualizar e corrigir erros.

“Ainda que haja poucas regras sobre como alguém deve construir modelos, um ponto onde a maioria dos autores concordam, é que sempre é uma boa ideia começar com um modelo simples que pode mais tarde vir a ser sofisticado se necessário. Um modelo deve conter apenas detalhes suficientes para captar a essência do sistema para os propósitos do estudo: Não é necessário ter uma relação um-a-um entre os elementos do modelo e os elementos do sistema. Um modelo com muitos detalhes pode ser muito caro de se construir e rodar. (Law e Kelton, 1991 p 107)”

Após a construção do modelo, ele deve ser verificado e validado. A etapa de condução dos experimentos está relacionada diretamente com os objetivos da simulação e a precisão requerida, e assim devem ser definidas questões como número de repetições e tempos de simulação.

A análise dos dados de saída da simulação está relacionada à forma de uso das informações geradas na simulação. Isso porque algumas vezes os dados de saída não correspondem exatamente ao formato adequado para responder aos objetivos da simulação. Nesse caso, eles podem ser trabalhados para tal fim.

Por fim, a etapa de relatório dos resultados corresponde à apresentação dos resultados oriundos do processo de simulação, abordando também as recomendações e conclusões.

Como pode ser percebido, os métodos apresentados pelos diversos autores possuem subetapas diferentes, mas de forma geral, todos eles partem de um planejamento inicial, onde o modelo deve ser formulado, os dados levantados e as variáveis respostas identificadas. Após esta etapa inicial, parte-se para a execução do modelo propriamente dita e por fim a análise dos resultados e conclusões.

2.4.1 Conceitos utilizados em simulação

Nos estudos envolvendo modelagem e simulação de sistemas há diversos conceitos que são utilizados comumente, sendo eles (Filho, 2008):

- Variáveis de estado: corresponde às variáveis cujas informações são necessárias para que se tenha o conhecimento sobre o que está ocorrendo no sistema em um determinado instante do tempo. Elas variam conforme o campo de estudo, como por exemplo: número de pessoas esperando em uma fila; número de navios esperando para operar; número de navios operando; número de berços disponíveis, entre outros;
- Eventos: correspondem aos acontecimentos que alteram o sistema: “...sempre que ocorre um evento, pelo menos uma variável de estado se altera (Filho, 2008 p 41)”. Os eventos podem ser chegadas, saídas, entre outros;
- Entidades e atributos: as entidades correspondem aos objetos do sistema, e que podem ser dinâmicos (navios, pessoas, etc.) ou estáticos (caixas de banco, berços, equipamentos, etc.). Os atributos correspondem às características próprias das entidades, e que podem ser essenciais na determinação do comportamento da entidade no processo. Como por exemplo, o tempo de processamento de um navio de 150.000 toneladas é bem diferente do tempo de processamento de um navio de 40.000 toneladas. Assim, o navio pode ser a entidade e a capacidade pode ser o atributo.
- Recursos e fila de recursos: recurso é uma entidade estática que serve às entidades dinâmicas. Assim, um recurso poderá fornecer serviços a mais de uma entidade dinâmica, assim como uma entidade dinâmica poderá utilizar os serviços de mais de um recurso. Caso o recurso esteja indisponível no momento da solicitação da entidade, uma fila deverá ser formada. O processamento dessa fila depende das premissas operacionais adotadas no sistema, sendo que geralmente é do tipo FIFO (*first in, first out*), ou seja, o primeiro a chegar será o primeiro a ser

atendido. Poderão também serem adotadas outras premissas, como a prioridade de atendimento das entidades que possuem algum atributo especial;

- Atividades e período de espera: de forma geral, as atividades correspondem a um período de tempo predeterminado, mas a sua duração não precisa necessariamente ser constante. Ela pode ser determinada através de um valor aleatório, de uma distribuição de probabilidade baseada em dados históricos, através de uma expressão matemática, ou ainda ser dependente de um acontecimento no próprio sistema. Por outro lado, para uma espera, não é possível que seja programado seu fim, uma vez ela iniciada. Como por exemplo, dado um evento inesperado com tempo indeterminado (como a quebra de um recurso, por exemplo), não é possível se determinar o tempo em que essa entidade ficará na fila;
- Tempo simulado e tempo de simulação: é importante estar atento em relação às diferenças existentes entre o tempo real simulado e o tempo que o *software* necessita para realizar a simulação. Esse último é diretamente proporcional a quantidade de entidades e processos do sistema simulado, e geralmente dura alguns minutos ou em sistemas mais complexos, algumas horas. O tempo simulado, por outro lado, depende muito do sistema que se está estudando. No caso de operações portuárias, geralmente é necessário simular o tempo de meses ou anos, para que sejam consideradas as sazonalidades.

2.4.2 Sistemas para modelagem e simulação

Na literatura, os modelos são classificados de diversas formas, muitas vezes dependendo do foco com qual o autor está trabalhando. Nesse contexto, geralmente os modelos são classificados em três dimensões (Silva, 2011):

- Importância do fator tempo: modelos classificados em dinâmicos e estáticos;
- Componentes probabilísticos: podem ser determinísticos ou aleatórios;

- Mudança nas variáveis: os modelos são classificados em contínuos ou discretos.

Essas três dimensões estão apresentadas através do fluxograma exposto na Figura 19.

Figura 19 - Classificação dos sistemas para modelagem



Fonte: Filho (2008)

Nos sistemas dinâmicos, ao contrário dos estáticos, as variáveis que representam o modelo se modificam ao longo do tempo. Os modelos determinísticos são aqueles cujas variáveis podem ser determinadas com exatidão, ao contrário do que ocorrem com as variáveis chamadas de aleatórias (ou estocásticas), que obedecem a leis de distribuições, buscando uma aproximação probabilística do problema (Portugal, 2005).

De acordo com Rosetti (2016), o comportamento estocástico ou aleatório é um componente importante do sistema, então o sistema é considerado estocástico; caso contrário, é considerado determinístico. Uma das maneiras mais úteis de analisar um sistema é se ele muda com relação ao tempo. Se um sistema não muda significativamente em relação ao tempo, é considerado estático; caso contrário, é chamado de dinâmico. Se um sistema for dinâmico, convém considerar como ele evolui com relação ao tempo.

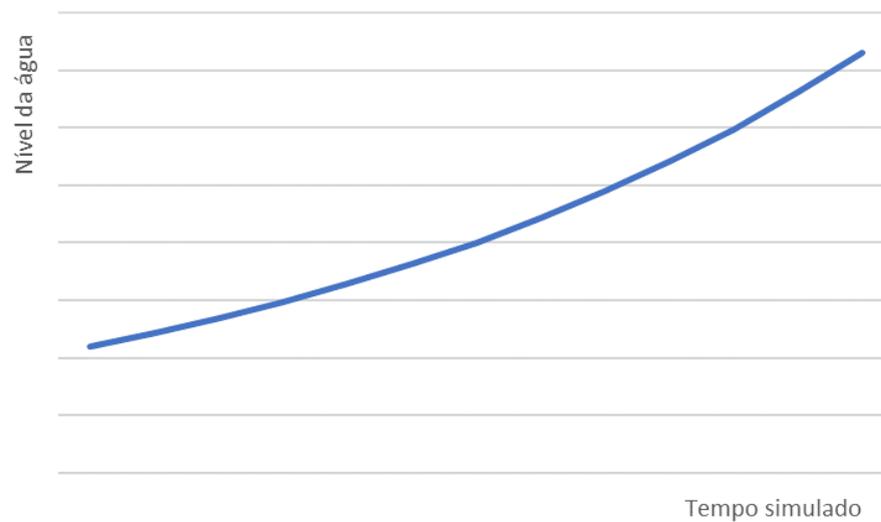
Em relação aos modelos contínuos e discretos, a principal caracterização está na maneira com que ocorrem as mudanças nas variáveis de estado do sistema. Nos modelos discretos, as variáveis mudam de valores apenas em tempos de ocorrência definidos (momentos distintos de tempo), permanecendo inalteradas no restante do tempo (Rossetti, 2016). Pode ser citado como exemplo a fila de navios esperando para atracação: o número de navios só vai alterar quando sair ou chegar um navio, permanecendo o mesmo durante o restante do tempo, conforme mostra o exemplo hipotético da Figura 20.

Figura 20- Mudanças de estado da variável – Modelos discretos



Já no caso de modelos contínuos, as variáveis de estado variam continuamente ao longo do tempo (Rossetti, 2016). Como exemplo, pode ser citada o enchimento de uma caixa d'água, como mostra a Figura 21.

Figura 21 - Mudanças de estado da variável – Modelos contínuos



Ainda, de acordo com Filho (2008), há outras formas de classificação de modelos para simulação, como pelo seu propósito. Nesse contexto, há três tipos de modelos, sendo eles:

- Modelos voltados à previsão: utilizados para se prever como se comportará o sistema em algum momento no futuro, baseado no comportamento atual e/ou com utilização de premissas;
- Modelos voltados à investigação: utilizados para analisar o comportamento do sistema mediante novos estímulos, como alteração no *layout* atual, inserção de novo equipamento, etc.
- Modelos voltados à comparação: muito utilizados, buscam a comparação entre cenários, com o objetivo de definir o mais vantajoso, ou ainda, os ganhos ou perdas entre eles.

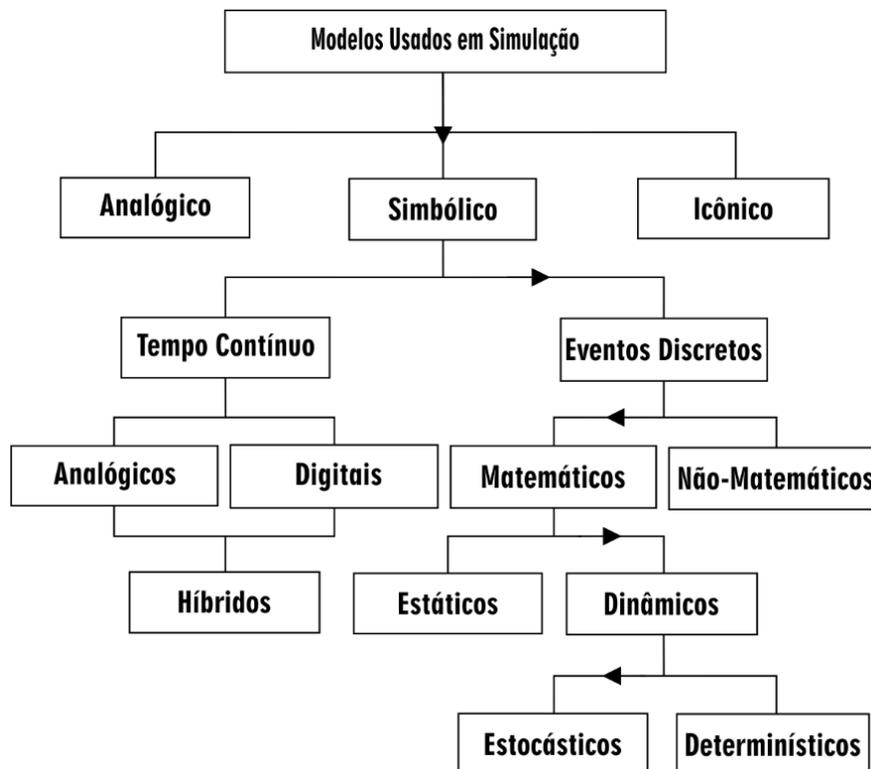
Neste mesmo contexto, Rossetti (2016), apresenta a seguinte classificação:

- Modelos de comparação: utilizados para comparar alternativas do sistema e suas medidas de desempenho em vários fatores (variáveis de decisão) com relação a alguns objetivos
- Modelos de otimização: caso especial de comparação no qual se busca encontrar a configuração do sistema que otimiza o desempenho sujeito a restrições.

- Modelos de previsão: para prever o comportamento do sistema em algum momento futuro.
- Modelos de investigação: para analisar e obter informações sobre o comportamento atual do sistema.

Outra forma de classificação adotada por Harling & Bruce (1971) *apud* Portugal (2005) está apresentada na Figura 22, e embora seja uma configuração diferente, ela aborda as mesmas características e denominações dos modelos de simulação apresentados anteriormente.

Figura 22 - Esquema dos tipos de modelos usados na simulação por Harling & Bruce (1971)



Fonte: Filho (2008)

De acordo com Rossetti (2016), os modelos podem ser descritivos ou prescritivos. Os primeiros descrevem como um sistema se comporta, sendo que a simulação é justamente usada para descrever os comportamentos ou características dos sistemas existentes. No entanto, ela também pode ser utilizada para prescrever uma solução, tendo assim um modelo prescritivo.

2.4.3 Análises estatísticas

Conforme pode-se observar, diversos autores apontam como uma das etapas da simulação a análise de resultados. Porém, antes de realizar a análise dos resultados, é importante a análise do próprio modelo e também a definição do número de repetições necessárias para que se tenha resultados satisfatórios estatisticamente.

De acordo com Seabra (2006), devem ser realizadas duas análises para considerar o modelo como válido: verificação e validação, sendo que a primeira está relacionada a verificação se as atividades e os pressupostos foram implementados corretamente no modelo computacional e a validação relaciona-se com a precisão do modelo em representar o sistema real.

Para realizar a verificação há diversos métodos que podem ser adotados, tais como (Filho, 2008):

- Variação dos dados de entrada: consiste basicamente em alterar os dados de entrada e verificar se as respostas estão condizentes com os resultados esperados;
- Aplicações de testes de continuidade: realizar diversas rodadas de simulação, com pequenas alterações dos dados de entrada, e verificar a cada rodada se os resultados também sofrem pequenas alterações. Caso os resultados sejam mais bruscos, o modelo deve ser investigado;
- Emprego de testes de robustez ou degenerescência: neste caso podem ser aplicados valores (maiores ou menores) que estão fora do intervalo permitido ou valores muito extremos e analisar como o modelo se comporta;
- Execução de casos simplificados: embora essa técnica não garanta que a execução do modelo mais completo vai estar correta, a adoção de modelos mais simples ou ainda, em etapas pode mostrar possíveis erros, e que são de mais fácil resolução do que o modelo completo implantado.

No caso da validação do modelo, Filho (2008) aponta as seguintes técnicas:

- Conhecimento e intuição de especialistas: é uma das melhores formas de validação do modelo, e deve ser realizada desde a fase de concepção até a fase de experimentação;

- Medições obtidas e sistemas reais: embora deva ser levado em consideração que se está comparando observações em sistemas distintos, a comparação com a situação real é uma das formas mais utilizadas para validação do modelo. Nos casos em que se está modelando um sistema que ainda não existe, podem ser utilizados outros sistemas, que sejam similares;
- Resultados teóricos: refere-se ao emprego de técnicas de modelagem analítica, como uso de Teoria das Filas, Leis Operacionais ou Redes de Petri.

O número de replicações que devem ser realizadas pode ser determinado de forma estatística para que os resultados se mostrem viáveis. De acordo com Filho (2008), essa determinação pode se dar através da aplicação da seguinte equação:

$$n = \left(\frac{100 \times z \times S}{r \times \bar{x}} \right)^2 \quad (2.6)$$

Em que:

n : número de replicações;

z : valor da variável normal padronizada para o nível de confiança desejado;

S : desvio padrão da variável analisada;

r : nível de precisão;

\bar{x} : média da variável analisada.

Uma das formas de se aplicar essa equação é realizar um número qualquer de replicações (geralmente 10), e com os resultados verificar se atendeu o nível de confiança desejado. Em caso negativo, pode-se calcular o número de repetições necessárias para atingi-lo através da seguinte equação (Seabra, 2006):

$$n^* = n \times \left(\frac{h}{h^*} \right)^2 \quad (2.7)$$

Em que:

n : número de replicações realizadas;

n^* : número de replicações a serem realizadas;

h : semi-intervalo de confiança obtido;

h^* : semi-intervalo de confiança desejado.

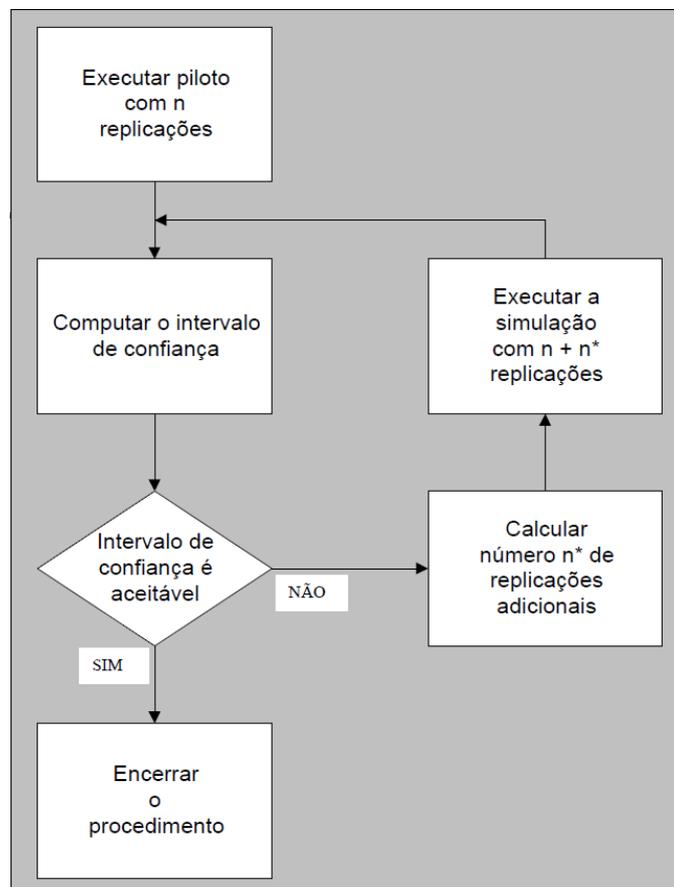
O semi-intervalo de confiança h é dado por:

$$t_{n-1, \alpha/2} \times \frac{S}{\sqrt{n}}$$

em que $t_{n-1, \alpha/2}$ é o valor tabulado da distribuição *t de Student* com $n-1$ graus de liberdade.

Esse procedimento é apresentado por Filho (2008) através da Figura 23.

Figura 23- Fluxograma do procedimento de análise do número de replicações



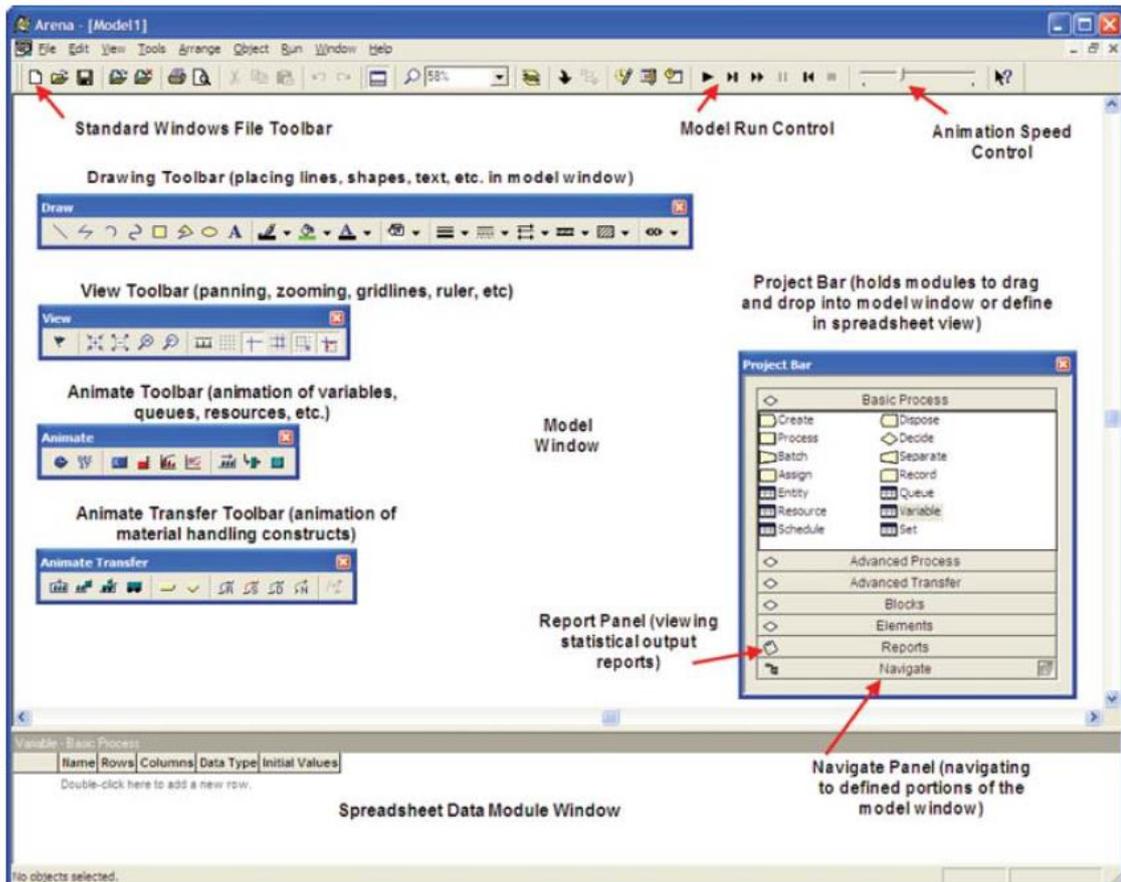
Fonte: Filho (2008)

2.5 O SOFTWARE ARENA

O Arena é um *software* de simulação muito utilizado na área de transporte e logística. De acordo com Rossetti (2016), o Arena fornece acesso a uma linguagem de simulação subjacente chamada SIMAN através de um ambiente que permite a construção de modelos

usando uma metodologia de fluxogramas. O ambiente do *software* é apresentado através da Figura 24.

Figura 24 - Ambiente do Arena



Fonte: Rossetti (2016)

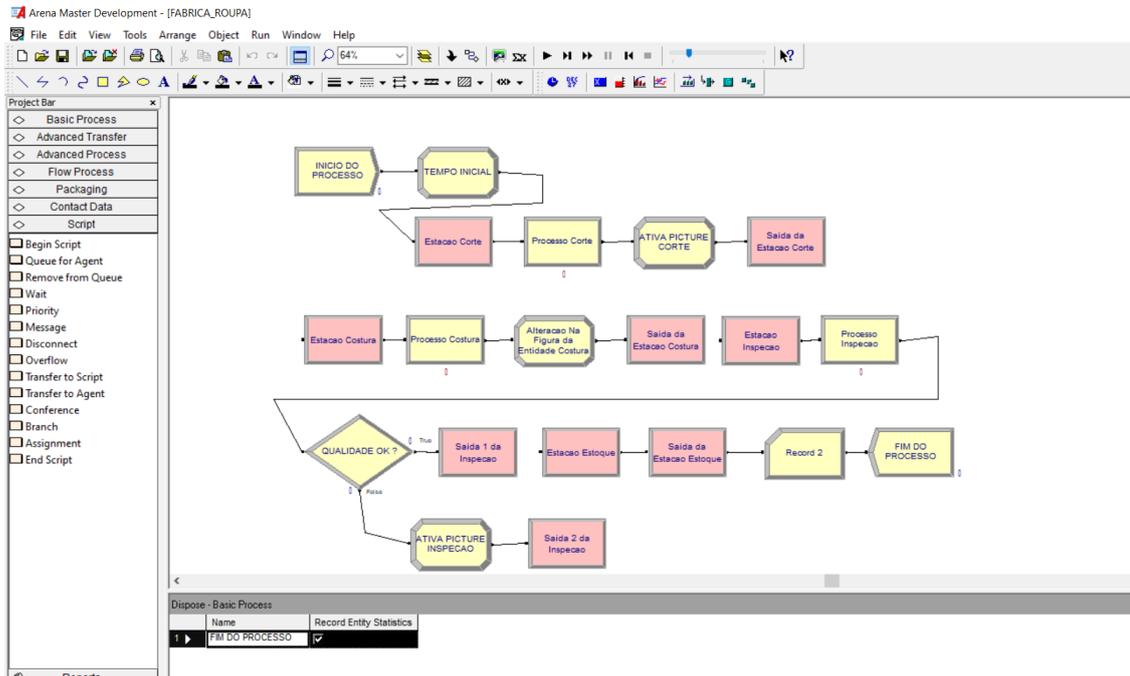
O ambiente fornece barra de ferramentas, acesso ao menu para atividades comuns de simulação, como animação do modelo, execução do modelo e exibição dos resultados. O Arena possui diversos módulos, sendo que alguns dos principais são (Kelton; Sadowski; Zupick, 2015):

- *Create*: é através dele que as entidades são criadas, sendo que alguns parâmetros devem ser definidos, como: a expressão que define o processo de chegada, unidade de tempo, número de entidades por chegada, dentre outros;

- *Decide*: utilizado quando existe mais de um caminho no fluxo, e mediante uma condição, deve ser escolhido qual opção seguir. Esta escolha pode ser através de uma probabilidade, mediante a inserção do percentual de vezes que deve ser escolhido um caminho A em detrimento de um caminho B, por exemplo;
- *Assign*: utilizado para realizar contagens, ou seja, sempre que uma entidade passar pelo bloco de *Assign*, haverá um acréscimo estabelecido para aquela variável;
- *ReadWrite*: o módulo serve para dar um atributo (como por exemplo cor, peso, tamanho, dentre outros) às entidades, através de um arquivo de entrada ou pelo teclado. Caso se utilize o arquivo externo, é preciso inseri-lo no Arena através do comando “*File*”;
- *Seize*: o bloco *Seize* é utilizado para alocar os recursos (ou partes deles) às entidades. Ao chegar no *Seize*, a entidade ocupa uma fila até que todos os recursos necessários para sua operação estejam disponíveis;
- *Process*: está relacionado ao processo propriamente dito. Ao chegar em um bloco *process*, a entidade ocupará por um determinado tempo o recurso (e assim é atribuído um *delay*). Esse tempo pode ser fixo ou determinado através de uma equação;
- *Release*: serve para que a entidade libere o recurso;
- *Dispose*: assim como o bloco *create*, ele é obrigatório pois significa o fim do processo, e assim a entidade ao chegar nesse módulo, “some” do sistema.

Conforme já mencionado, o Arena possui diversos outros módulos e ferramentas que podem ser largamente explorados. No entanto, não está no escopo do presente trabalho uma análise aprofundada do software, apenas apresentar algumas funcionalidades básicas, mas que podem ser utilizadas para a elaboração de modelos complexos de simulação. A Figura 25 traz a tela do *software*, com um modelo implementado.

Figura 25 - Exemplo de um modelo criado no Arena



Fonte: Dados de Prado (2014)

2.5.1 Input Analyzer

O Input Analyzer é uma ferramenta inserida no ARENA para determinar a equação da distribuição dos dados de chegada das entidades no sistema. Isso porque geralmente essa chegada não é constante, e pode variar por diversos fatores. Assim, a partir de dados observados, o usuário pode escolher qual a distribuição que melhor se adapta a situação ou ainda pode solicitar que a própria ferramenta determine a melhor distribuição estatisticamente.

As distribuições que são analisadas no ARENA estão apresentadas na Tabela 2, enquanto que a Figura 26 mostra a tela de saída de dados do *Input Analyzer*.

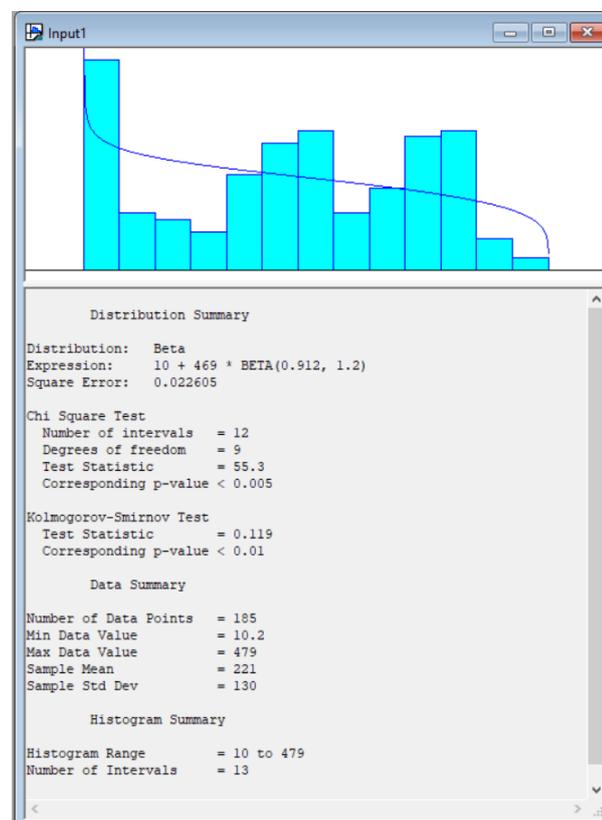
Tabela 2. Tipos de distribuições consideradas pelo Arena

Distribuição	Parâmetros	Característica
Normal	Média (μ) e desvio padrão (σ)	Descreve fenômenos simétricos em torno da média
Uniforme	Valor mínimo (a) e valor máximo (b)	É a mais simples ou a que mostra o maior desconhecimento do comportamento estudado
Triangular	Valor mínimo (a), valor máximo (b) e valor mais provável (m)	Não se conhece o comportamento da variável, mas além dos limites inferior e superior, se tem estimativa do valor mais provável
Exponencial	Tempo médio entre duas observações (β)	Caracteriza-se por um comportamento de total imprevisibilidade

Distribuição	Parâmetros	Característica
Lognormal	Média (μ) e desvio padrão (σ)	Comportamento do logaritmo de uma variável normal
Erlang	Número de distribuições exponenciais (m) e Tempo médio entre duas observações (β)	Utilizada como uma extensão da exponencial.
Gama	Número de distribuições exponenciais (m) e Tempo médio entre duas observações (β)	Generalização da Erlang, mas permitindo m não inteiro.
Beta	Forma (a) e escala (b)	Utilizada para variáveis cujos valores estão dentro de um intervalo.
Weibull	Forma (a) e escala (b)	Representação de variáveis que representam características de confiabilidade de sistemas ou equipamentos
Poisson	Média (λ)	Modela o número de ocorrências que uma variável pode assumir em um intervalo contínuo
Uniforme discreta	Valor mínimo (a) e valor máximo (b)	Quando a variável pode assumir apenas valores inteiros, todos com mesma probabilidade

Fonte: Adaptado de Filho (2008)

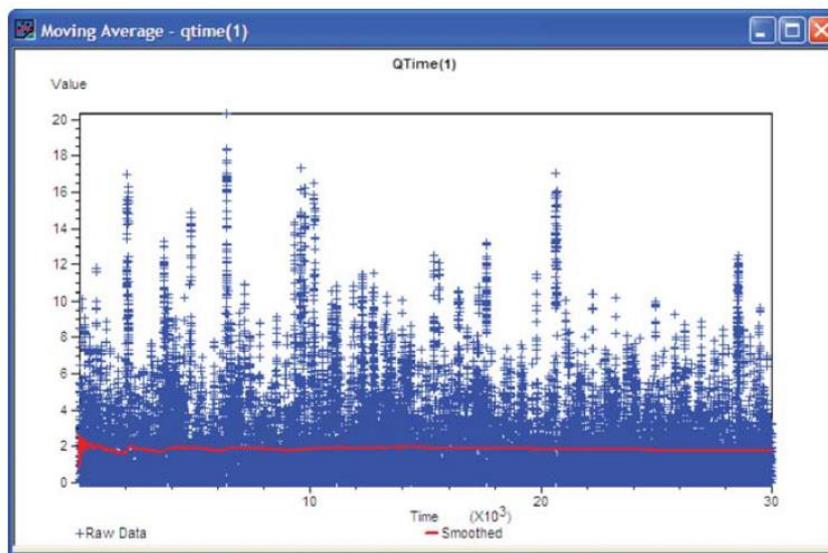
Figura 26 - Tela de saída do *Input Analyzer*



2.5.2 Output Analyzer

O *Output Analyzer* é uma ferramenta adicional do Arena, que pode ser utilizada para analisar estatisticamente os dados de saída do modelo de simulação. Assim, através dos dados gerados na simulação (como média e desvio padrão das várias replicações) a ferramenta possui algumas funções, como construção de gráficos, onde é possível se observar o comportamento do modelo ao longo das replicações realizadas (Kelton; Sadowski; Zupick, 2015). Um exemplo de gráfico desse tipo é apresentado na Figura 27.

Figura 27 - Exemplo de gráfico gerado no *Output Analyzer*



Fonte: Rossetti (2016)

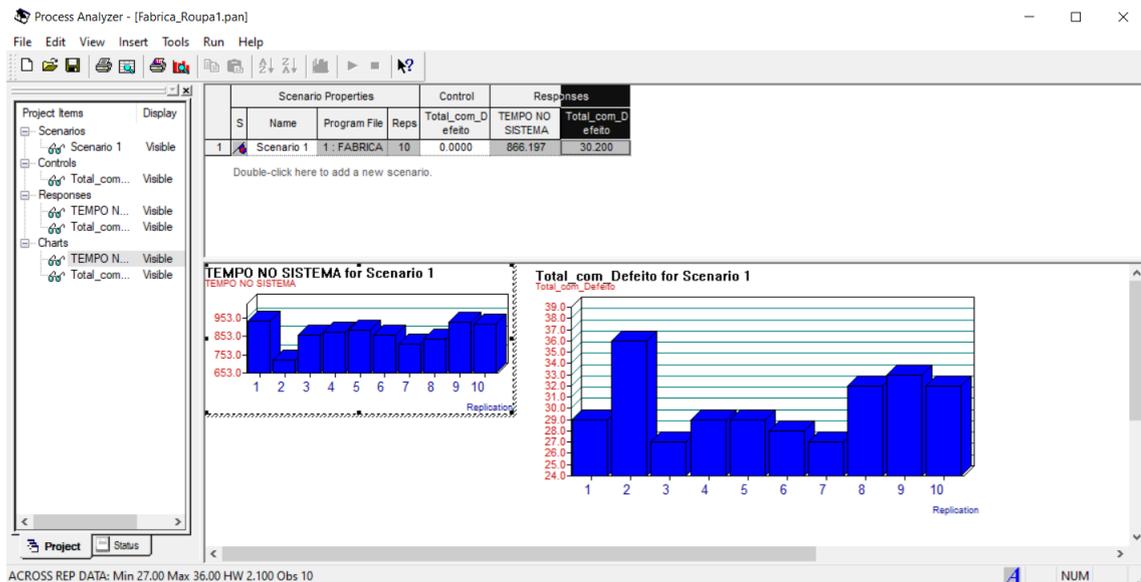
Outra informação gerada através do *Output Analyzer* são os intervalos de confiança das variáveis de resposta, e que poderão ser utilizados para determinar o número de replicações necessárias, como exposto no item 2.4.3.

2.5.3 Process Analyzer

Assim como o *Output Analyzer*, o *Process Analyzer* serve para mostrar ao usuário os resultados das execuções de simulação, com foco na análise das diferenças nominais das variáveis de resposta entre as várias replicações (Kelton; Sadowski; Zupick, 2015).

Assim, é possível construir gráficos que mostrem em um eixo (abscissa) as n replicações e no outro eixo (ordenada), o resultado para determinada variável, como mostra uma imagem da ferramenta na Figura 28.

Figura 28 - Exemplo do uso do *Process Analyzer*



Fonte: Dados de Prado (2014)

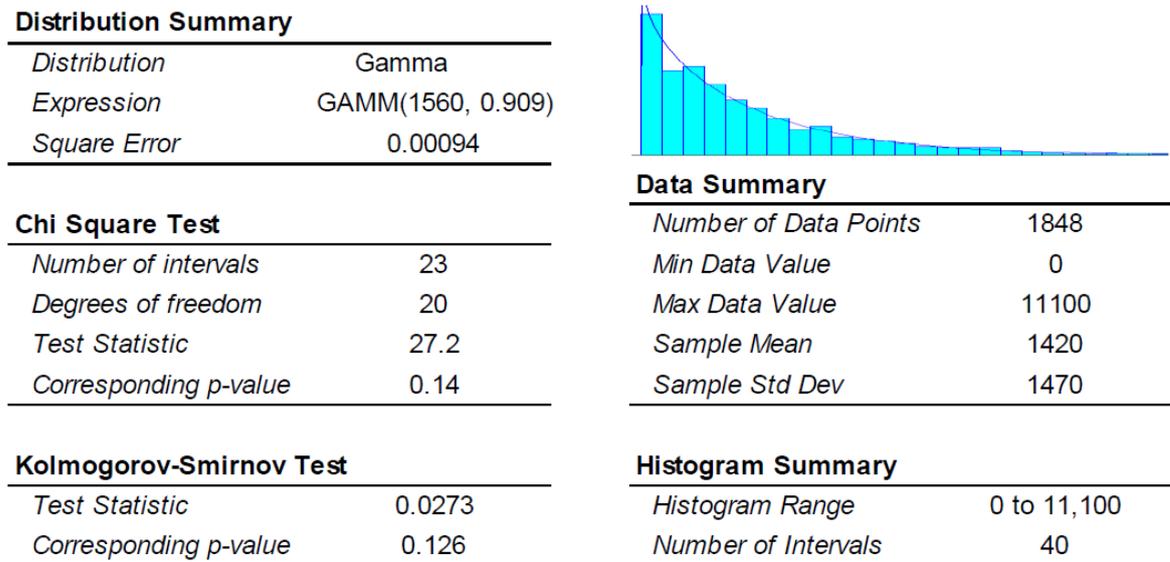
2.6 SIMULAÇÕES EM PORTOS UTILIZANDO O ARENA

Na literatura é possível encontrar alguns estudos abordando a simulação de terminais portuários ou do canal de acesso aquaviário utilizando o software Arena. Altiok, Almaz e Ghafoori (2012) desenvolveram juntamente com o *New Jersey Department of Transportation* um modelo de simulação detalhado para estudar as principais questões relacionadas à operação do rio Delaware através da análise de cenários, como aumento da chegada de embarcações, aprofundamento do rio e mudanças nas políticas operacionais e de navegação. Foram consideradas todas as instalações dos terminais portuários ao longo do rio, de Cape May a Trenton, sendo que o modelo inclui todos os tipos de navios de carga, suas particularidades, padrões de chegada, as regras de navegação, atividade de marés e atividades de ancoragem, juntamente com as operações de cais do terminal, mas excluindo a logística interna do terminal.

Os dados de entrada utilizados incluem horários de chegada, características da embarcação (comprimento, boca, calado, peso bruto), tempos de espera dos terminais e probabilidades de transição dos navios que se deslocam de um terminal para outro. Os dados

para componentes aleatórios foram analisados e as distribuições foram ajustadas, utilizando a ferramenta *Input Analyzer* (apresentada em 2.5.1), como mostra um exemplo na Figura 29.

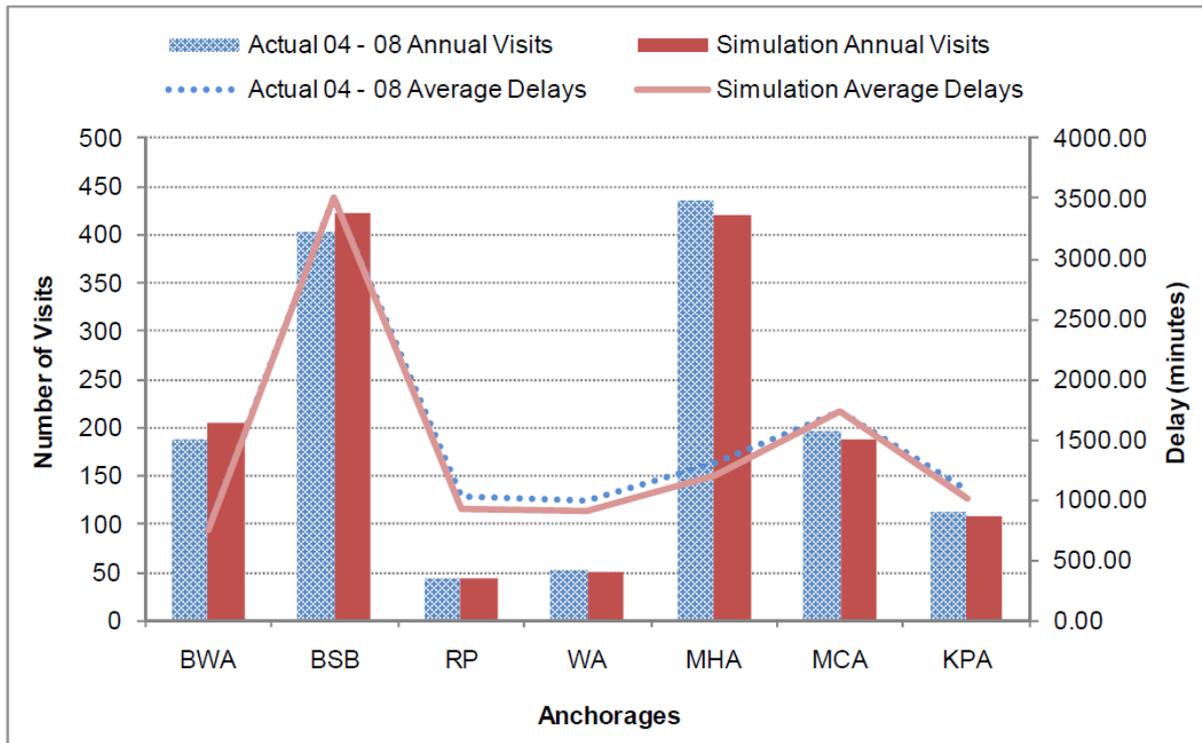
Figura 29 - Resultado da distribuição dos tempos de chegada dos navios – estudo Altiok, Almaz e Ghafoori



Fonte: Altiok, Almaz e Ghafoori (2012)

Segundo os autores, os resultados da simulação se mostraram satisfatórios, uma vez que entre os mais de 40 terminais do sistema, apenas alguns apresentaram desvios de cerca de 4% nas estimativas de utilização do berço, enquanto o restante diverge em apenas 2%. A comparação entre os resultados da simulação e os dados observados foram plotados em alguns gráficos, sendo que a Figura 30 traz os resultados do número anual de atracções e o tempo de espera para operação.

Figura 30 - Número de atracções anuais e tempo de espera simulado e observado

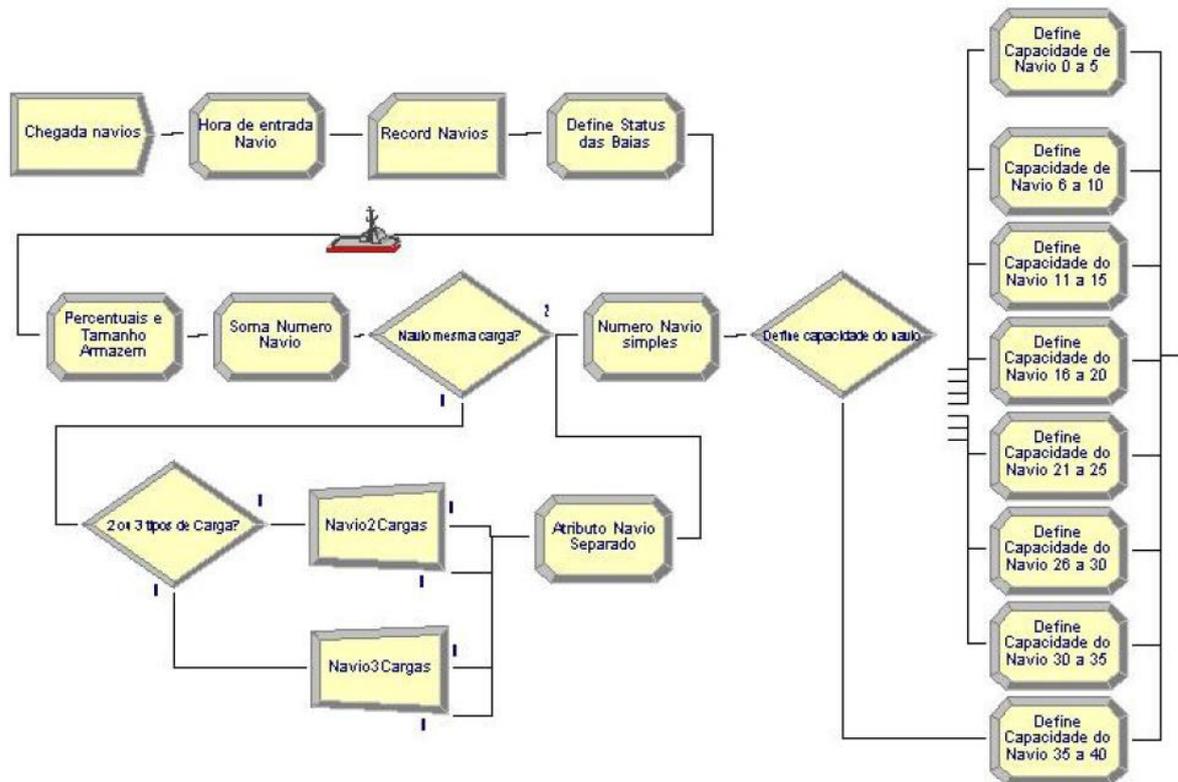


Fonte: Altiok, Almaz e Ghafoori (2012)

Como resultado dessas comparações entre os dados reais observados e as estimativas de simulação, o modelo de simulação construído para representar o tráfego de embarcações no rio Delaware e na baía foi considerado uma representação válida do sistema real para realizar análises de cenários, bem como para usar em qualquer estudo ou análise de planejamento relevante para a região.

Silva (2011) utilizou a simulação através do Arena para analisar a capacidade operacional de um terminal do Complexo Portuário de Tubarão, localizado no município de Vitória, Espírito Santo. Esse terminal opera fertilizantes, no sentido de desembarque, e teria condições de aumentar o volume movimentado, mas para isso, havia a necessidade de se investigar principalmente a capacidade dos recursos. O autor partiu da simulação da situação atual, e então considerou seis cenários, onde realizou modificações no ritmo de chegada de navios, vagões e caminhões, o que alterou também os volumes de cargas movimentados. A Figura 31 mostra uma parte do modelo simulado no Arena, para o cenário atual.

Figura 31 - Modelo da situação atual no estudo de Silva (2011)



Fonte: Silva (2011)

De acordo com Silva (2011):

“Por meio da análise dos resultados foi possível concluir que as alterações no aumento da movimentação de navios, vagões e caminhões e aumento da capacidade de armazenamento propostas em alguns cenários são viáveis, e em outros cenários o incremento da demanda coloca em risco o nível de serviço de todo o sistema portuário, em virtude da geração de filas e demasiado tempo de espera para atendimento, além da própria capacidade limitada de alguns recursos (Silva, 2011 p 7)”

Essa situação pode ser observada através dos indicadores apresentados na Tabela 3, onde para o cenário 2, por exemplo, o tempo médio de fila é aumentado consideravelmente em relação aos outros cenários.

Tabela 3. Exemplo de indicadores dos cenários de simulação do estudo de Silva (2011)

Indicadores	Atual	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Média de atendimentos	64,25	81,2	87,5	60	101,5	87	93,5
Tempo médio de espera na fila (dias)	4,43	107,27	1,72	3,46	1,06	2,67	4,48
Tamanho médio da fila	0,36	21,52	0,1	0,16	0,14	0,21	0,5
Tempo médio de operação (horas)	42,24	54,72	47,05	40,32	44,88	34,08	38,88

Fonte: Adaptado de Silva (2011)

Diversos outros trabalhos de simulação em portos e terminais portuários podem ser encontrados na literatura. Brito (2008) simulou um novo terminal de contêineres, localizado na cidade de Cubatão, com a função de servir de terminal de apoio aos terminais contêineres do Porto de Santos. O objetivo principal do estudo foi estabelecer a melhor configuração do *layout* do terminal, analisando a carga movimentada no ano, a utilização do pátio, a divisão modal no transporte desses contêineres de e para o Porto de Santos, o dimensionamento e os percentuais de utilização dos equipamentos e as filas geradas.

Outro estudo de simulação realizado no Porto de Santos foi apresentado por Fraga et al (2017), onde foi realizada uma análise da movimentação de trigo, abordando dois cenários, sendo que o primeiro considerava a operação sendo realizada com o equipamento grabe e o segundo com o sugador. O objetivo do estudo era determinar quais dos dois equipamentos trariam as melhorias mais significativas na descarga de navios de trigo.

Kotachi; Rabadi e Obeid (2013) desenvolveram uma simulação de eventos discretos para modelar operações portuárias com diferentes tipos de recursos, incluindo *gates* de segurança, guindastes de pórtico e de cais, armazéns e pátios, além de considerar navios, caminhões e trens. A ideia principal era analisar os impactos em relação a taxas de produtividade, utilização de recurso e tempos de espera, que alterações de *layout* e principalmente de número de recursos causam. A construção dos cenários foi realizada alterando-se o número de guindastes e caminhões, e verificando como essas alterações

impactam nas operações do porto. Ainda, foram alteradas as localização de algumas estruturas como do prédio de inspeção de segurança e a verificação aduaneira.

3 MÉTODO

Com base no levantamento bibliográfico realizado, foi definido um método para realização de simulação operacional em um terminal portuário. Tal método contempla a realização das etapas apresentadas no fluxograma da Figura 32, e detalhadas nas seções seguintes.

Figura 32 - Método adotado



3.1 ETAPA DE PLANEJAMENTO

Na etapa de planejamento, o modelo de simulação será inicialmente planejado, abordando os seguintes itens:

- Tipo de modelo a ser utilizado: conforme apresentado na Seção 2.4, os modelos de simulação podem apresentar diversas características. Entender cada uma delas e identificar o melhor modelo para o estudo é um ponto importante para que a simulação apresente resultados compatíveis com a realidade;
- Cenários: caso se trabalhe com modelos de comparação é necessário que os cenários sejam definidos. A definição dos cenários está muito atrelada às respostas que se busca com o desenvolvimento do estudo;
- Definição do intervalo de tempo: dependendo do tipo de estudo que se está trabalhando, pode ser importante realizar simulações para um horizonte de previsão. Para cada um dos anos considerados, o modelo deve ser rodado, e deve ser considerado que as variáveis de entrada devem ser previstas. Assim, quais os anos que serão considerados na análise devem ser já definidos na etapa de planejamento;
- Resposta: é importante identificar de forma objetiva quais são as respostas que se espera do modelo, ou ainda, quais são os objetivos do trabalho. Com base nisso, é possível identificar quais serão os critérios de avaliação e as variáveis de resposta do modelo, que em estudos portuários são: tempos de fila, tempos de processamento, número de entidades no sistema ou em cada um dos recursos e a capacidade do sistema;
- *Software* adotado: este método contempla a utilização do Arena, mas existem diversos *softwares* no mercado que podem ser utilizados no processo de simulação.

3.2 ETAPA DE MODELAGEM

A etapa de modelagem contempla a construção inicial do modelo, através de um esquema gráfico, como um fluxograma, por exemplo. Através desse esquema poderão ser

identificados de forma mais clara todos os processos do modelo, bem como os dados de entrada necessários. Essa etapa é importante dentro do processo de modelagem, pois pode evitar retrabalhos após a implementação do modelo no *software* escolhido.

Essa construção inicial baseia-se no conhecimento técnico do profissional que está desenvolvendo o estudo, bem como no levantamento de informações junto a profissionais da área e no levantamento bibliográfico (livros, jornais, revista, entre outros). Nesta etapa as informações são mais de caráter qualitativo, sendo que os dados referentes aos processos são levantados na próxima etapa.

3.3 ETAPA DE LEVANTAMENTO DE DADOS

A partir da construção inicial do modelo, realizada na etapa anterior, é possível identificar quais são os dados de entrada necessários, e fazer o levantamento deles. Sempre que possível esses dados devem ser extraídos da situação atual (quando existente), utilizando fontes fidedignas. Isso se mostra ainda mais importante caso o modelo seja de previsão, e nesse caso, seja necessário utilizar dados para o horizonte de projeção, que nem sempre estão disponíveis.

Além do levantamento de dados, é preciso prepará-los para que estejam em formato adequado para o processamento no *software* escolhido para realizar a simulação.

3.4 ETAPA DE EXPERIMENTAÇÃO

Esta etapa consiste na implementação do modelo no *Arena*, e definição de alguns tópicos importantes, sendo eles:

- Número de repetições: como a simulação é um processo aleatório, o ideal é que a mesma situação seja repetida algumas vezes, e assim utilizada a média. Essa definição deve ser dada em função do nível de precisão desejado;
- Tempo de simulação: depende da análise que está sendo realizada. Para os estudos do setor portuário, geralmente é necessário que seja simulado o tempo de um ano inteiro, como forma de considerar as variações sazonais.

Além disso, é importante estar bem familiarizado com todas as funções e ferramentas do *software* que será adotado, bem como com o formato dos resultados.

Antes da execução do modelo com os cenários que estão sendo considerados (atividade final dessa etapa) também podem ser realizadas algumas verificações iniciais, ou seja, realizar a simulação com um cenário conhecido e verificar se os resultados estão próximos aos observados na prática. Caso observe-se inconsistências, é possível realizar os ajustes necessários.

Por fim, após a definição do número de repetições, do tempo de simulação e de realizar as verificações e ajustes iniciais, o modelo pode então ser executado.

3.5 ETAPA DE ANÁLISE DE RESULTADOS

Após a execução do modelo de simulação, deve-se partir para a etapa de análise dos resultados, baseada nas variáveis de resposta definidas na primeira etapa.

A análise dos resultados é realizada muito em função do tipo de modelo que se está simulando, pois, os resultados devem ser apresentados de forma que eles consigam responder aos objetivos iniciais da simulação. Assim, para modelos de comparação, por exemplo, a análise dos resultados deve se pautar na comparação das variáveis entre os vários cenários para então definir quais são mais vantajosos. No caso de modelos de previsão, os resultados poderão ser mostrados através de uma linha temporal onde a evolução da variável analisada pode ser observada.

3.6 ETAPA DE CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As conclusões e recomendações estão atreladas a etapa anterior, e referem-se a transformação do dado (de saída) em informação. É importante tentar responder todas as perguntas que balizaram o desenvolvimento do estudo de simulação.

4 ESTUDO DE CASO: O BERÇO 401 – PORTO DE SÃO FRANCISCO DO SUL

Neste capítulo é abordado o estudo de caso, que se refere à aplicação do método apresentado para um novo terminal a ser implantado em uma área localizada dentro da zona portuária do Porto de São Francisco do Sul, em Santa Catarina.

4.1 SOBRE O PORTO DE SÃO FRANCISCO DO SUL

O complexo de São Francisco do Sul se localiza na Baía da Babitonga, no norte catarinense, no município de mesmo nome (porto público e terminais privados) e em Itapoá (terminal privado de contêineres), como pode ser observado na Figura 33.

Figura 33- Localização do Complexo Portuário de São Francisco do Sul



Fonte: Brasil (2017)

De acordo com informações do Plano Mestre do Complexo (BRASIL, 2017), atualmente o porto público dispõe de 7 berços de atracação, que perfazem um cais com aproximadamente 1.500 metros de extensão, e 14 metros de profundidade. Destes, quatro são de uso público e três são arrendados ao Terminal Portuário de Santa Catarina (TESC). Há ainda três terminais retro portuários, sendo eles: Bunge, Terlogs e Cidasc.

A Tabela 4 traz algumas informações sobre os berços, enquanto que a Figura 34 mostra sua localização no porto.

Tabela 4. Características operacionais dos berços de São Francisco do Sul

Berço	Comprimento (m)	Destinação operacional	Situação de uso
101	225	Granéis sólidos e líquidos	Uso público
102 e 103	362	Carga geral	Uso público
201	276	Multiuso	Uso público
301 e 302	384	Multiuso	Arrendado
303	264	Multiuso	Arrendado

Fonte: Brasil (2017)

Figura 34 - Áreas do Porto de São Francisco do Sul



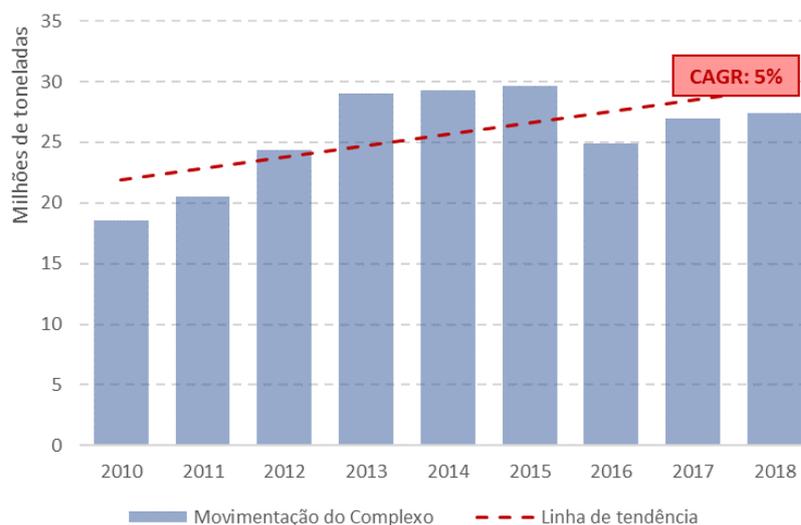
Fonte: Brasil (2017)

O Complexo de São Francisco do Sul aborda também, o Porto de Itapoá, especializado na movimentação de contêineres e o Terminal Aquaviário de São Francisco do Sul, de propriedade da Petrobras, e composto por uma monoboia que recebe petróleo de navios, que é então enviado via oleoduto para a Refinaria de Araucária (Repar), no Paraná. No entanto, esses dois terminais não serão considerados na presente análise, uma vez que estão fora do escopo.

De acordo com dados da ANTAQ (ANTAQ, 2019), o Complexo de São Francisco do Sul representou, em 2018, 2,4% das movimentações portuárias nacionais, sendo o 11º porto nacional e o 3º da região Sul. Se forem desconsideradas as movimentações de minérios (que são cargas com fluxos específicos e alto peso), São Francisco do Sul é o 9º porto nacional em termos de movimentação, e representa 4,1%.

Analisando os dados históricos, pode-se observar que os volumes movimentados vêm aumentando ao longo dos anos, embora tenha ocorrido uma queda na movimentação em 2016, fruto principalmente da instabilidade econômica e política no qual passou o país naquele ano. Os valores estão apresentados na Figura 35, juntamente com a taxa de crescimento médio anual (*Compound Annual Growth Rate – CAGR*).

Figura 35 - Evolução da movimentação no Complexo Portuário de São Francisco do Sul



Fonte: Dados de ANTAQ (2019)

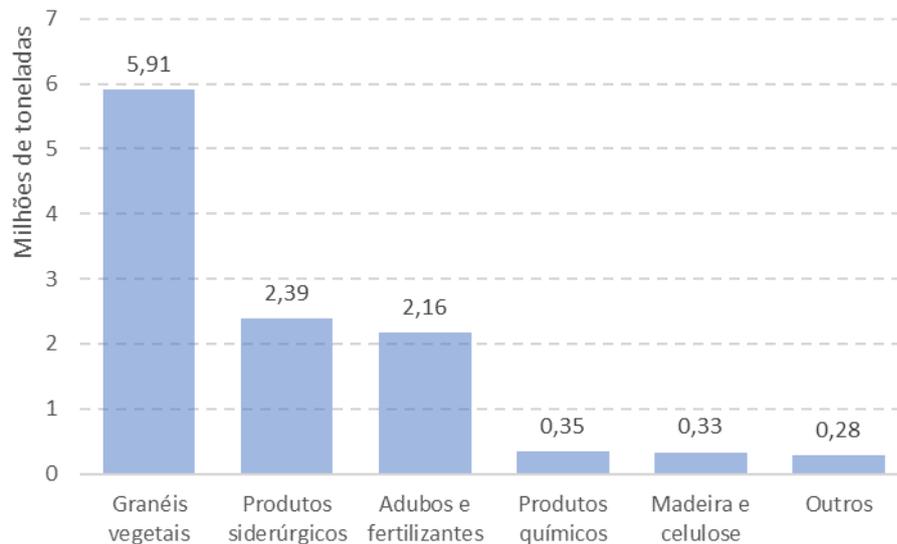
A seção seguinte traz de forma mais detalhada algumas informações sobre as cargas movimentadas no porto de São Francisco do Sul.

4.1.1 Cargas movimentadas

Com uma movimentação em 2018 de mais de 18,5 milhões de toneladas (desconsiderando o petróleo bruto do Terminal da Petrobras), o Complexo de São Francisco do Sul é um dos mais importantes na movimentação de longo curso e cabotagem da região Sul (ANTAQ, 2019). Os embarques totalizaram 10,7 milhões de toneladas (58%), enquanto que os desembarques foram 7,9 milhões de toneladas (ANTAQ, 2019).

Analisando apenas o porto público, os principais produtos movimentados neste ano, segundo os dados da ANTAQ foram: graneis vegetais (soja e milho), produtos siderúrgicos, fertilizantes e produtos químicos (barrilha), como pode ser observado na Figura 36.

Figura 36 - Principais produtos movimentados no Porto público de São Francisco do Sul (2018)

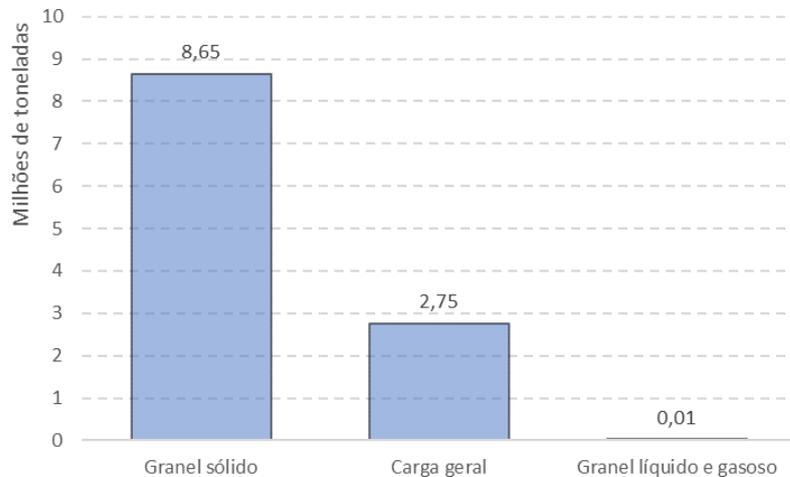


Fonte: Dados da ANTAQ (2019)

A grande parte dos produtos movimentados pelo Porto de São Francisco do Sul tem como origem ou destino portos de outros países, já que em 2018, as operações de longo curso corresponderam a mais de 84% do total (ANTAQ, 2019).

Em relação à natureza da carga, a Figura 37 mostra um panorama sobre as movimentações no ano de 2018, onde é possível observar que a maior parte se constitui de granel sólido (76%), fato explicado pelos principais produtos movimentados no porto, que são grãos (soja e milho).

Figura 37 - Natureza dos produtos movimentados no Porto de São Francisco do Sul em 2018



Fonte: Dados da ANTAQ (2019)

4.1.2 Indicadores operacionais atuais

A capacidade do porto de São Francisco do Sul foi calculada através do Plano Mestre, apresentado em 2017, e ela se dá em função da carga, ou seja, para cada uma das principais cargas movimentadas, há uma capacidade atrelada. Ainda, foram apresentados os índices de utilização para cada um dos berços.

Como os dados referem-se à movimentação do ano de 2016, os indicadores foram atualizados, baseados nas informações do ano de 2018, e os resultados dos índices de ocupações estão apresentados através da Tabela 5, que foram calculados somando-se todas as horas de movimentação no berço e dividindo-se pelo ano operacional de 8.736 horas (364 dias de 24 horas cada).

Tabela 5. Índice de ocupação dos berços em 2018

Porto	Berço	Índice de ocupação
São Francisco do Sul	101	87%
	102	89%
	103	3%
	201	85%
	300	7%
	301	71%
	302	61%
Itapoá	Berço 1	51%
	Berço 2	61%

Fonte: Dados da ANTAQ (2019)

A Tabela 6 traz outros indicadores calculados do Porto de São Francisco do Sul, tendo como base o banco de atracções disponibilizados pela ANTAQ para o ano de 2018.

Tabela 6. Indicadores operacionais dos berços em 2018

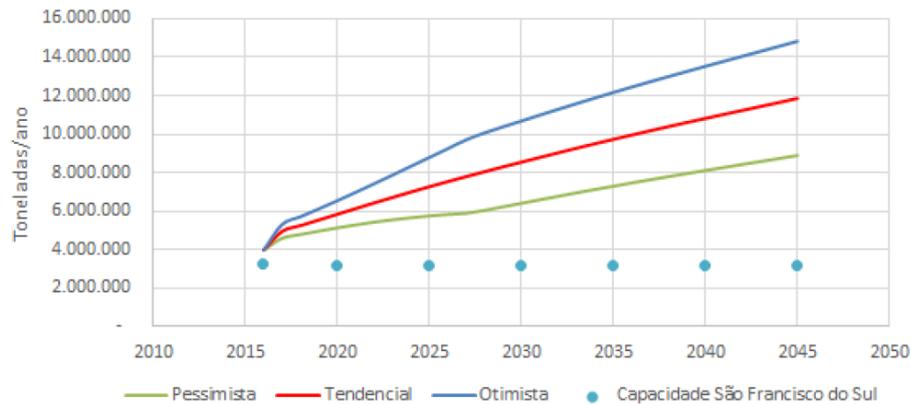
Produtos	Berço	Lote médio (t/navio)	Tempo médio de operação (horas/navio)	Produtividade média (t/navio/horas de operação)
Soja	101	66.062	77,6	851,6
Milho	101	60.431	93,1	648,8
Siderúrgicos	102/103	18.614	93,2	195,7
	201	25.703	116,9	219,8
	300/301	12.230	60,0	203,0
	302	10.946	67,8	161,4
Fertilizantes	102	19.525	87,7	222,8
	201	17.992	88,7	202,8
	301	18.347	97,6	187,9
Outras cargas	102	18.113	84,0	215,7
	201	17.988	93,9	191,5
	300/301	25.149	105,4	249,3

Fonte: Dados da ANTAQ (2019)

4.1.3 Gargalos existentes e perspectivas

No Plano Mestre do Complexo Portuário de São Francisco do Sul (Brasil, 2017) foram realizadas análises da capacidade para atendimento da demanda das instalações portuárias, para o horizonte de planejamento (2045), onde foi constatado que as movimentações de soja superam a capacidade de cais, e que com a previsão de aumento das cargas, essa situação deve se acentuar ainda mais nos próximos anos, caso não haja investimentos para ampliação na capacidade do porto de movimentação desse tipo de carga. Essa situação está apresentada na Figura 38, que mostra que em todos os cenários a demanda supera a capacidade para o caso da soja.

Figura 38 - Berço 101 – soja: demanda vs. Capacidade na estrutura atual



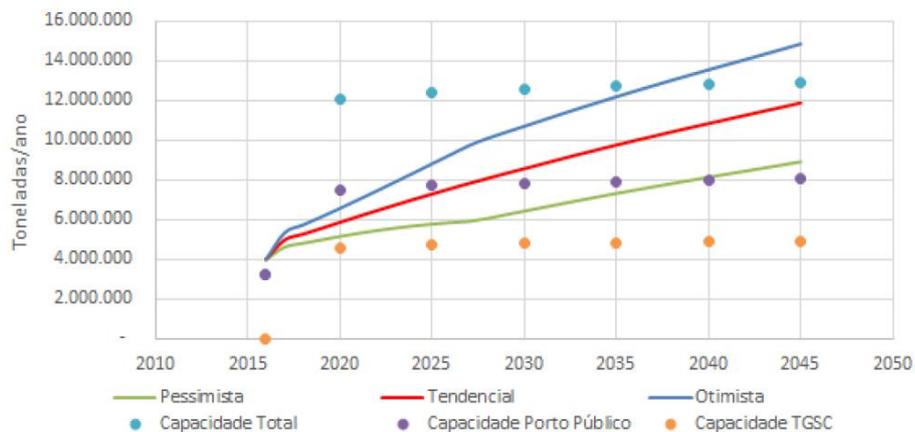
Fonte: Brasil (2017)

Assim, há projetos que visam à ampliação da capacidade de movimentação de grânéis vegetais pelo complexo portuário, sendo eles:

- Construção do TGSC: Terminais de Grânéis de Santa Catarina;
- Construção do berço 401, ampliando o Corredor de Exportação;
- Expansão da área de armazenagem para grânéis vegetais no Terlogs.

Considerando a realização desses projetos, a capacidade foi recalculada e plotada juntamente com a demanda, resultando na Figura 39, onde pode-se observar que caso tais melhorias sejam implementadas, a capacidade total seria suficiente para atender a demanda no cenário tendencial até o final do horizonte de previsão.

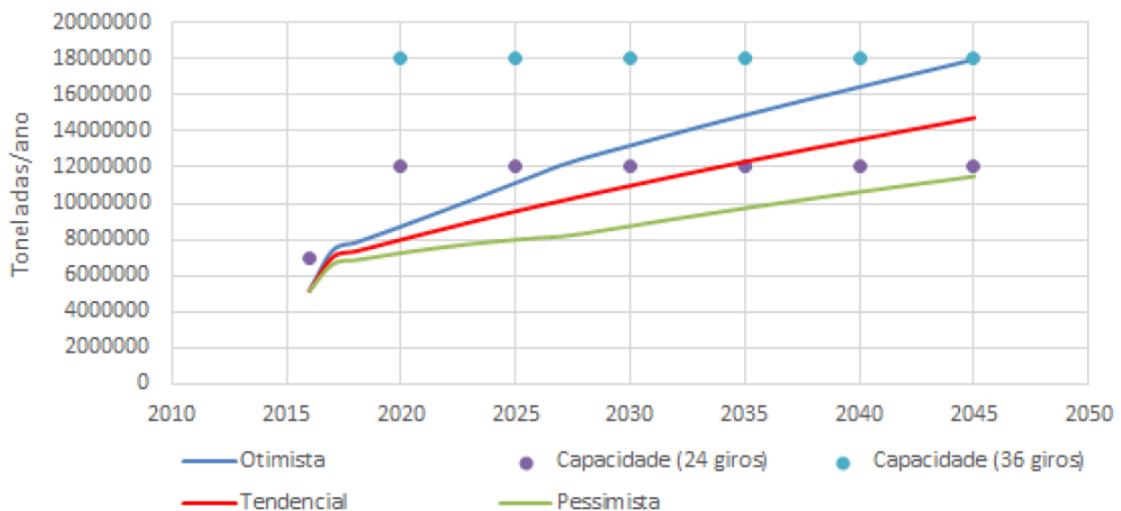
Figura 39 - Berços 101/401 e TGSC – soja: demanda vs. Capacidade



Fonte: Brasil (2017)

A capacidade de armazenagem também foi analisada para verificar se ela não poderá se tornar um gargalo, impondo limites à capacidade dos berços. Os resultados estão apresentados na Figura 40, onde observa-se que, considerando 15 dias de estadia da carga, a demanda ultrapassará a capacidade de armazenagem em 2035 no cenário tendencial. Caso sejam praticados tempos menores de estadia (10 dias), a capacidade de armazenagem seria suficiente para atender a demanda tendencial em todo o horizonte de previsão, salientando que os resultados consideram os investimentos a serem realizados pelo TGSC e o Terlogs (investimento já realizado).

Figura 40 - Capacidade dinâmica de armazenagem – soja e milho: demanda vs. Capacidade



Fonte: Brasil (2017)

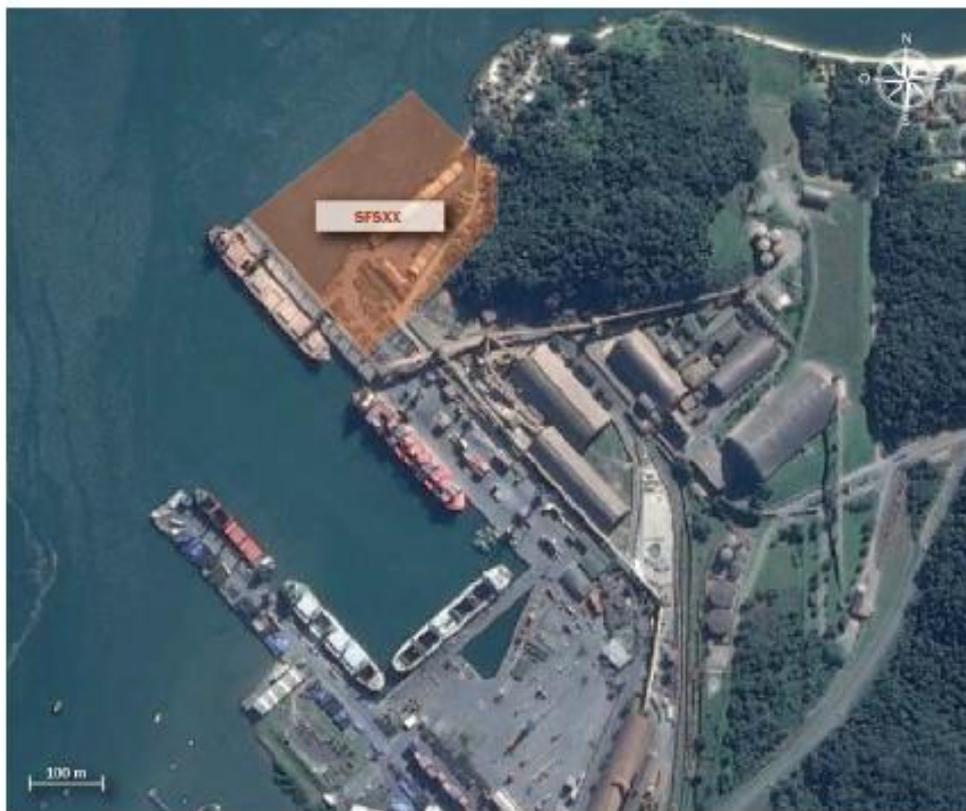
Assim, de acordo com o Plano Mestre (Brasil, 2017):

“não foi identificada a necessidade de novos investimentos em armazenagem, além daqueles previstos no TGSC e no Terlogs. Caso sejam identificados déficits de armazenagem e estes se traduzam em limitações à capacidade de cais, os mesmos podem ser mitigados aplicando um tempo menor de estadia para soja e milho, entre 15 e 10 dias. Além disso, a capacidade estática da armazenagem apresenta valores aceitáveis em relação àqueles sugeridos na literatura”. (Brasil, 2017 p 227)

4.2 SOBRE O BERÇO 401

Conforme já apresentado na seção anterior (4.1), a construção do Berço 401 está nos planos de investimento do Porto de São Francisco do Sul, como forma de aumentar a capacidade do porto na movimentação principalmente de granéis vegetais exportação, além de fertilizantes e carga geral. Sua localização dentro do Complexo Portuário está apresentada através da Figura 41, que mostra a área total a ser arrendada, contemplando além da parte água, uma retroárea de aproximadamente 50.000 m² (sendo 35.000 m² da área que está alagada).

Figura 41- Localização aproximada da área a ser arrendada no Porto de São Francisco do Sul



Fonte: Brasil (2017)

Para que seja possível realizar o arrendamento, de acordo com a legislação vigente, é necessária a realização de um Estudo de Viabilidade Técnica, Econômica e Ambiental (EVTEA). Para suprir essa demanda, em julho de 2015, a Secretaria dos Portos (SEP) publicou um edital de chamamento para Procedimento de Manifestação de Interesse (PMI), onde empresas interessadas na realização de tal estudo poderiam ser autorizadas a realiza-lo, e o

estudo de apenas uma seria escolhido para subsidiar a modelagem do arrendamento (Brasil, 2015). No entanto, esse processo encontra-se estagnado e a área continua sem utilização.

4.3 APLICAÇÃO DO MÉTODO

O método apresentado no Capítulo 3 foi aplicado no Porto de São Francisco do Sul para verificar como os indicadores do porto são afetados caso seja arrendada a área e construído o Berço 401. Foram consideradas as cinco principais cargas: soja, milho, produtos siderúrgicos, fertilizantes e outras cargas, e todos os berços atualmente em operação, além do próprio 401.

Para a realização da simulação algumas premissas foram adotadas, sendo elas:

- O canal de acesso aquaviário está sempre liberado;
- Os armazéns de grãos (exportação) possuem lote suficiente para atender a demanda de navios;
- São consideradas todas as operações simultâneas do porto e disponibilidade de cais;
- Sistema FIFO (*first in, first out*), ou seja, não há prioridade de carga, o atendimento é por ordem de chegada;
- Não haverá aumento dos lotes médios dos navios no horizonte de simulação.

4.3.1 Etapa de planejamento

Os cenários considerados foram baseados sob a ótica de demanda (fertilizantes e carga geral ou fertilizantes, carga geral e granéis vegetais exportação), sob a ótica de superestrutura e operação (utilização de equipamentos e armazéns ou carregamento e descarregamento direto do caminhão) e sob a ótica de oferta (entrada em operação ou não do TGSC). Foram considerados quatro cenários, sendo eles:

- Cenário 1: O berço 401 opera apenas fertilizantes e carga geral (siderúrgicos e outras cargas), e as operações são realizadas através de carregamento/d Descarregamento direto nos caminhões, que tem acesso ao berço através de uma ponte, e portanto, não foram consideradas infraestruturas de armazenagem. Nesse cenário, as produtividades utilizadas foram as observadas atualmente no Porto de São Francisco do Sul, uma vez que as operações são realizadas dessa mesma maneira;

- Cenário 2: O berço 401 opera apenas fertilizantes e carga geral (siderúrgicos e outras cargas), e as operações são realizadas através do descarregamento direto nos caminhões no caso da carga geral, mas através de esteira subterrânea que está conectada a um armazém localizado na retroárea. Essa situação traz uma maior produtividade à operação, proporcionando maior capacidade do berço. Nesse cenário, a produtividade considerada para os fertilizantes foi a do Terminal da Fospar, localizado em Paranaguá, que realiza a operação de fertilizantes conforme essa configuração;
- Cenário 3: O berço 401 opera fertilizantes e granéis vegetais exportação (soja e milho), e as operações são realizadas através de esteiras que estão conectadas a infraestrutura de armazenagem. A produtividade considerada para os fertilizantes foi a do Terminal da Fospar, enquanto que para o caso dos granéis vegetais foi a observada no Corredor de Exportação (berço 101) do próprio porto de São Francisco do Sul. Nesse cenário não foi considerado a entrada do TGSC;
- Cenário 4: igual ao Cenário 3, mas considerando a entrada em operação do TGSC.

A Tabela 7 traz um resumo dos cenários considerados.

Tabela 7. Cenários considerados na simulação

Cenário	Cargas movimentadas no 401	Operação	Oferta
1	Fertilizantes e carga geral	Carga/Descarga direta, sem armazéns	Com TGSC
2	Fertilizantes e carga geral	Carga geral: Carga/Descarga direta, sem armazéns Fertilizantes: operação mecanizada (descarga através de moega e esteira que conecta o armazém)	Com TGSC
3	Granéis vegetais (soja e milho) e fertilizantes	Operação mecanizada para ambos	Sem TGSC
4	Granéis vegetais (soja e milho) e fertilizantes	Operação mecanizada para ambos	Com TGSC

Também foram definidos:

- Tipo de modelo: modelo de comparação;

- Resposta: determinar a melhor configuração entre os quatro cenários, considerando as diferenças entre eles e o cenário de infraestrutura atual (ou seja, sem o berço 401);
- Critério de avaliação: capacidade, tempo de espera (fila) e índices de ocupação;
- Horizonte da simulação: 2025 e 2030.

4.3.2 Etapa de modelagem

O modelo de simulação foi definido a partir do levantamento de informações junto a documentos oficiais da área, como o Plano Mestre, bem como levantamento de informações junto a técnicos do porto e da literatura especializada. Os navios foram considerados como entidades, e os atributos elencados foram o tipo de carga e a movimentação total (peso em toneladas). Como recursos foram considerados todos os berços do Porto de São Francisco do Sul (101; 102; 103; 201; 300; 301 e 302) além do próprio 401 e do TGSC, nos cenários em que eles foram simulados.

O tipo da carga é um dos fatores que determina o berço que irá atendê-lo. Caso tal berço esteja livre, o navio poderá passar a utilizá-lo para carregar ou descarregar a carga, e caso não esteja, haverá a formação de fila. Assim, o cais é um recurso, que possui uma produtividade atrelada a ele. As cargas podem ser atendidas por mais de um berço, então a fila só será formada caso todos os berços para aquele tipo de carga não estejam disponíveis.

O critério utilizado para escolha do berço, caso mais de um estivesse disponível, foi a utilização observada para cada carga em 2018, cujos percentuais estão apresentados através da Tabela 8, enquanto que a Tabela 9 mostra o critério de preferência adotado na simulação.

Tabela 8. Utilização dos berços em 2018

Berço	Utilização dos berços em 2018				
	Siderúrgicos	Fertilizantes	Outras cargas	Soja	Milho
101	-	-	-	100,0%	100,0%
102	11,3%	39,1%	43,6%	-	-
103	2,6%	-	2,6%	-	-
201	5,7%	47,0%	35,9%	-	-
300	4,6%	0,9%	2,6%	-	-
301	38,1%	10,4%	10,3%	-	-
302	37,6%	2,6%	5,1%	-	-

Fonte: Dados da ANTAQ (2019)

Como o TGSC e o Berço 401 atualmente não se encontram em operação, houve a necessidade de se determinar a forma de escolha desses berços. Assim, para o caso dos cenários sem o 401 (CA), 1 e 2, onde opera um berço público e um TUP, a forma de escolha do berço adotada foi 50/50, ou seja, assumiu-se que metade dos navios que acessam o Complexo atracam no TUP e metade no porto público, dada a capacidade instalada. Essa foi a mesma premissa adotada no Plano Mestre para cálculo da capacidade do sistema. Assim, se um navio é enviado a um berço que esteja ocupado, mesmo o outro estando livre, esse navio fica aguardando na fila. Por outro lado, no cenário 3, como tem-se dois berços públicos, adotou-se a premissa que o porto público faria o acompanhamento e gestão das operações, direcionando o navio para o berço que esteja livre. Essa gestão cria mais dinamismo ao sistema, melhorando os tempos de espera da fila. No caso do cenário 4, considerou-se 1/3 para cada berço.

A Figura 42 traz o fluxograma do modelo de simulação, considerando neste caso o desembarque de cargas, sendo que para cargas embarcadas, o fluxo é o mesmo, alterando apenas o sentido.

Os navios (entidades) entram no sistema (canal de acesso aquaviário) em períodos aleatórios (conforme curvas de distribuições únicas para cada produto, conforme as chegadas observadas em 2018), e cada um deles possui diversos atributos: natureza da carga; volume e peso; dimensões.

Figura 42- Fluxograma do modelo de simulação

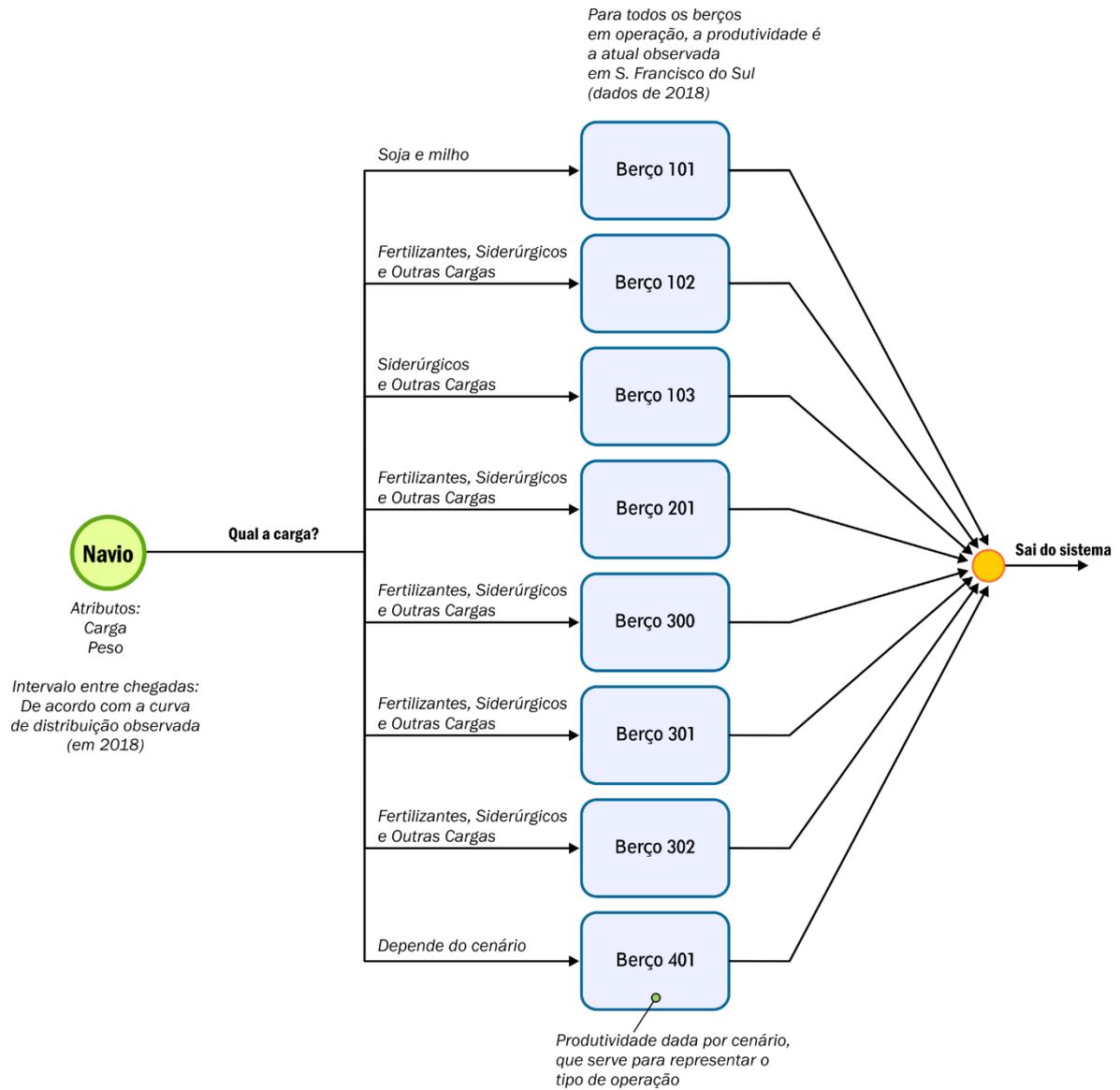


Tabela 9. Ordem de prioridade adotada

Produto	Berços
Siderúrgicos	401 - 301 - 302 - 102 - 201 - 300 - 103
Fertilizantes	401 - 201 - 102 - 301 - 302 - 300
Outras cargas	102 - 201 - 301 - 302 - 103 - 300
Soja	401 - 101
Milho	401 - 101

O tempo de processamento em cada berço depende da quantidade de carga que o navio possui, e da própria carga, tendo em vista que foram criadas curvas de distribuição da

produtividade (t/h), de acordo com os valores observados em 2018, através do *Input Analyzer*. Além disso, nos cenários nos quais o berço 401 opera de forma mecanizada, com esteiras e armazéns, para o caso dos fertilizantes, decidiu-se pela adoção dos valores de produtividade do Terminal da Fospar, em Paranaguá, terminal que opera dessa maneira. No caso dos granéis vegetais exportação (soja e milho) como o Porto de São Francisco do Sul já opera com *shiploader* e esteiras, optou-se pela utilização das mesmas taxas de produtividade do Corredor de Exportação (berço 101).

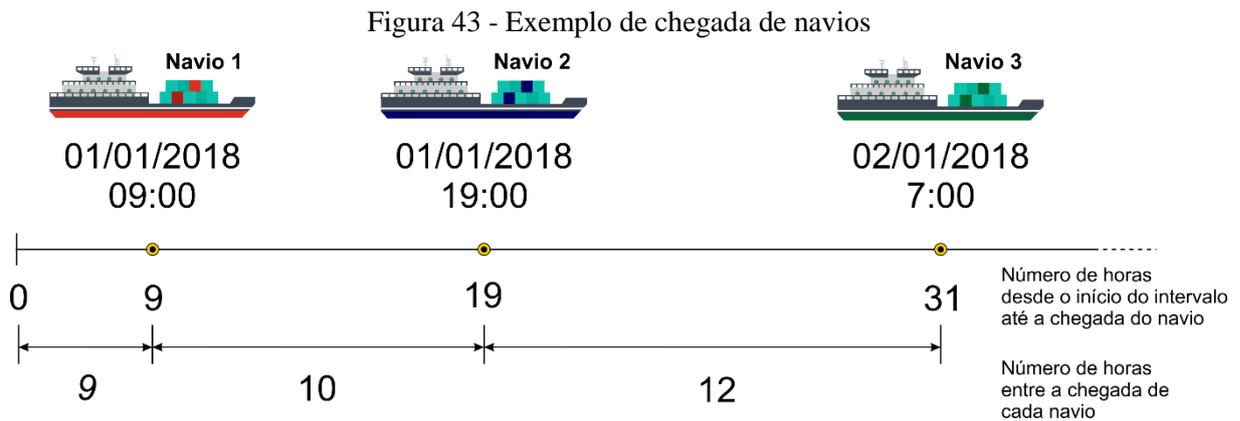
No cenário 4 é considerada a entrada em operação do Terminal TGSC, e nesse caso foram utilizados os mesmos valores de produtividade.

A partir do cais, a carga tem dois destinos possíveis: direto para os caminhões (entidades) e/ou para a estrutura de armazenagem, nos cenários em que ela existe. Após o processamento dos navios nos berços, eles saem do sistema.

4.3.3 Etapa de levantamento de dados

De acordo com o modelo definido na etapa anterior, foi possível determinar os dados necessários para executar o modelo, que foram os seguintes:

- Chegada de navios: a chegada de navios em um porto geralmente é uma distribuição aleatória, sendo que eles apresentam características distintas entre si, tais como: tamanho (LOA, boca, calado); natureza da carga e quantidade transportada (peso), dentre outros. Para o estudo de caso utilizou-se inicialmente os dados de chegada de navios no Complexo Portuário de São Francisco do Sul de todo o ano de 2018, tendo como fonte o Anuário Estatístico da ANTAQ (ANTAQ, 2019). Desse banco de dados foram utilizadas duas variáveis: Data e horário da Chegada e Nomenclatura da Carga, onde a primeira foi utilizada para criar o *line-up* de cada uma das cargas consideradas. A partir da data da chegada (e horário) informados, foi possível a criação de um arquivo contendo o tempo decorrido (em horas) de chegada de um navio desde a chegada do último. A título de exemplo, a Figura 43 mostra a chegada de três navios (de mesma carga) em tempos distintos. Neste caso, os dados utilizados para criação das curva de chegada de navios é o número de horas decorrido entre a chegada deles.



Para utilizar os dados levantados, foram criadas curvas de distribuição das chegadas através da ferramenta *Input Analyzer* do Arena, onde, através de indicadores estatísticos, o próprio software define o modelo que melhor se ajusta aos dados. Os resultados de saída dessa ferramenta, para cada uma das cargas consideradas, estão apresentados no Anexo A;

- Carga dos navios: a quantidade de carga que cada navio movimentou no porto, em toneladas, foi utilizada para determinar o tempo de operação. Esses valores foram extraídos também do Anuário Estatístico da ANTAQ do ano de 2018, e as informações foram inseridas no Arena. Assim, essa informação é um atributo que é escolhido aleatoriamente dentro de um banco de dados observados;
- Produtividade dos equipamentos: a capacidade de um terminal portuário está inteiramente conectada com a produtividade dos seus equipamentos. Para utilizar esse índice, partiu-se dos valores observados de produtividade para cada uma das cargas analisadas. A produtividade é dada pela carga do navio dividida pelo intervalo de tempo no qual durou a operação, e assim sua unidade é toneladas por hora. No entanto, esse valor não é fixo, uma vez que diversos fatores, principalmente climáticos, acabam alterando-o, como por exemplo, em caso de fortes chuvas, quando há necessidade de paralisação das atividades, aumentando o tempo, e conseqüentemente diminuindo a produtividade. Assim, para cada uma das cargas analisadas foram criadas curvas de distribuição do tipo triangulares, uma vez que essas curvas podem ser utilizadas para representar esse tipo de variável, que possui um valor médio representativo, mas com alguns pontos

inferiores e outros superiores (não são *outliers*, são faixas de pontos inferiores e superiores);

- Previsão do número de navios para os anos de 2025 e 2030: utilizou-se as mesmas taxas de crescimento apresentadas pelo Plano Mestre do Complexo, ou seja, aplicou-se os percentuais de crescimento esperados da movimentação de cada carga para 2025 e 2030 no número de navios observados em 2018. Esses dados são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10. Previsão das cargas e do número de navios

Cargas	Cargas movimentadas no complexo (t)			% total de crescimento no período		Número de navios		
	2018	2025	2030	2025	2030	2018	2025	2030
Soja e Milho	5.906.132	9.563.592	10.978.533	62%	86%	90	146	167
Fertilizantes	2.191.253	2.331.505	2.064.199	6%	-6%	118	126	111
Siderúrgicos	2.423.101	3.391.104	3.642.732	40%	50%	185	259	278
Outras cargas	879.404	848.260	927.840	-4%	6%	39	38	41

Fonte: Dados de 2018 da ANTAQ (2019) e percentuais de crescimento de Brasil (2017)

4.3.4 Etapa de experimentação

Após determinar os fluxos e as premissas, e fazer o levantamento dos dados, o sistema foi modelado no Arena, onde foi definido que o tempo de simulação seria de 1 ano inteiro (364 dias), uma vez que normalmente os indicadores portuários são apresentados nessa escala temporal. Também se definiu arbitrariamente que seriam executadas 50 replicações.

De forma geral, a construção do modelo dentro do Arena possui as seguintes etapas:

1. Etapa 1: Geração dos navios

- Através do Módulo “Create” os navios são criados, de acordo com expressão gerada pelo Input Analyzer;
- O módulo “ReadWrite” cria o atributo de peso para o navio, conforme o banco inserido no sistema (*Assignments*).

2. Etapa 2: Definição dos berços possíveis para atracação
 - Através do módulo “Decide”, foram criadas 4 condições, referentes ao tipo de carga que o navio está movimentando. Para cada carga, foram definidos os berços possíveis de serem utilizados (Figura 42).

3. Etapa 3: Definição do berço para atracação
 - Também através do Módulo “Decide”, foi inserida a condição de que o sistema direciona o navio para o primeiro berço daquele tipo de carga, de acordo com a ordem de prioridade operacional (Tabela 9). Se o berço estiver livre, inicia o tempo de operação. Se não estiver, o sistema envia para o segundo berço, onde é verificada sua disponibilidade. Caso livre, inicia a operação e caso ocupado, vai para o seguinte, até testar todos, e caso todos estejam ocupados, fica na fila de espera. Foi inserido um *delay* de 1 hora para ficar na fila, antes de iniciar nova tentativa de atracação.

4. Etapa 4: Operação
 - Após o navio “atracar” no berço, foi inserido primeiramente um módulo “Decide”, com o objetivo de identificar a sua carga, uma vez que os berços atendem a mais de um tipo de produto, e cada produto possui uma produtividade atrelada. Nessa etapa, o recurso berço fica ocupado;
 - Com base na carga identificada pelo Decide, foi atrelada a produtividade através do módulo “Process”, com uma expressão onde o Peso do Navio (t) é dividido pela produtividade (t/h), resultando em um *delay* de x horas, que é o tempo total que o navio fica atracado. A produtividade foi dada em função de uma equação (como comentado em 4.3.3) através do Input Analyzer.

5. Etapa 5: Saída do sistema
 - Através do módulo “Release” o navio libera o berço;
 - Através do módulo “Dispose” o navio deixa o sistema.

A duas imagens seguintes (Figura 44 e Figura 45) trazem, apenas para visualização geral, algumas telas que mostram o modelo inserido no Arena.

Figura 44 - Modelo de simulação do Porto no Arena

Arena Master Development - [Modelo Cenario 1 - Ano de 2023]

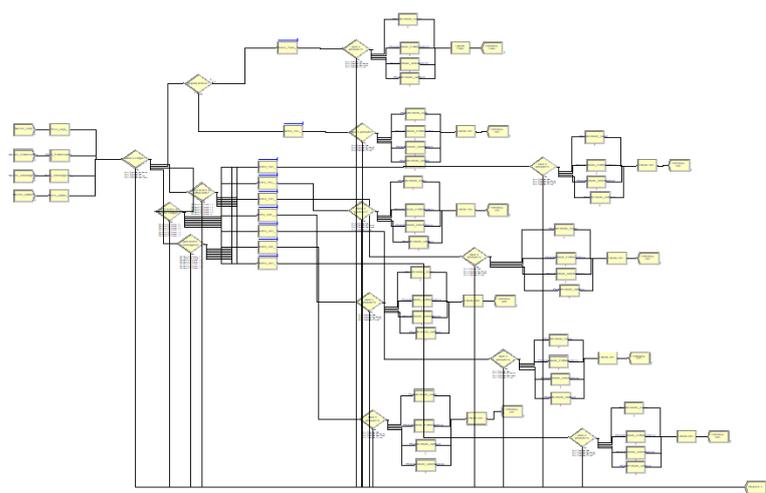
File Edit View Tools Arrange Object Run Window Help

16%

Project Bar

- Basic Process
- Advanced Process
- Advanced Transfer
- Flow Process
- Packaging
- Contact Data
- Script

- Begin Script
- Queue for Agent
- Remove from Queue
- Wait
- Priority
- Message
- Disconnect
- Overflow
- Transfer to Script
- Transfer to Agent
- Conference
- Branch
- Assignment
- End Script



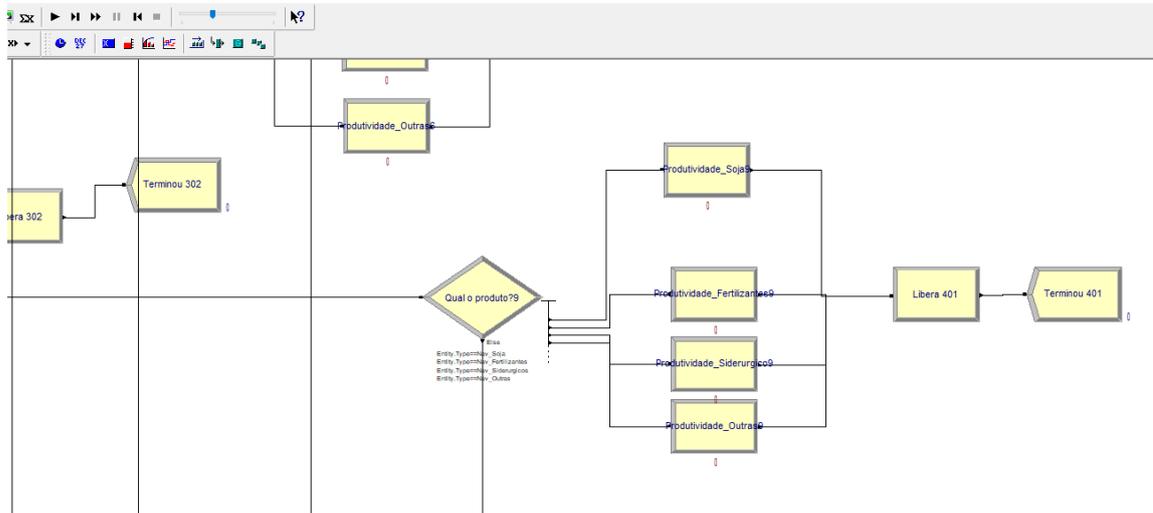
Process - Basic Process

Name	Type	Action	Delay Type	Units	Allocation	Expression	Report Statistics	
23	Produtividade_Siderurgico6	Standard	Delay	Expression	Hours	Wait	Peso_Siderurgicos_Atributo/202.9	<input checked="" type="checkbox"/>
24	Produtividade_Outraas6	Standard	Delay	Expression	Hours	Wait	Peso_Outras_Atributo/(9 + WEB(146, 1.59))	<input checked="" type="checkbox"/>
25	Produtividade_Soja7	Standard	Delay	Expression	Hours	Wait	Peso_Soja_Atributo/TRIA(268, 893, 1.61e+003)	<input checked="" type="checkbox"/>
26	Produtividade_Fertilizantes7	Standard	Delay	Expression	Hours	Wait	Peso_Fertilizantes_Atributo/(19 + ERLA(51.6, 4))	<input checked="" type="checkbox"/>
27	Produtividade_Siderurgico7	Standard	Delay	Expression	Hours	Wait	Peso_Siderurgicos_Atributo/202.9	<input checked="" type="checkbox"/>
28	Produtividade_Outraas7	Standard	Delay	Expression	Hours	Wait	Peso_Outras_Atributo/(9 + WEB(146, 1.59))	<input checked="" type="checkbox"/>
29	Produtividade_Soja8	Standard	Delay	Expression	Hours	Wait	Peso_Soja_Atributo/TRIA(268, 893, 1.61e+003)	<input checked="" type="checkbox"/>
30	Produtividade_Fertilizantes8	Standard	Delay	Expression	Hours	Wait	Peso_Fertilizantes_Atributo/(19 + ERLA(51.6, 4))	<input checked="" type="checkbox"/>
31	Produtividade_Siderurgico8	Standard	Delay	Expression	Hours	Wait	Peso_Siderurgicos_Atributo/202.9	<input checked="" type="checkbox"/>

Reports

Navigate

Figura 45 - Modelo de simulação do Porto no Arena, com destaque no 401



Após modelar o sistema no Arena, gerar alguns pré-resultados e realizar as adaptações necessárias, o modelo foi rodado, e os resultados estão apresentados na seção que segue.

4.3.5 Etapa de análise dos resultados

Embora a análise dos resultados seja uma etapa posterior ao da experimentação, esse processo (de análise e validação do modelo) iniciou na própria experimentação, onde a cada etapa de inserção de informações, o modelo foi executado, os resultados foram sendo analisados, e algumas adaptações foram necessárias como forma de torná-lo mais representativo possível da realidade. Nesse contexto, a análise dos resultados será pautada principalmente na comparação entre os resultados dos cenários analisados e do cenário sem alteração na infraestrutura (CA), ou seja, sem a entrada em operação do berço 401.

Dentro desse contexto, os resultados são apresentados analisando-se três variáveis respostas: tempo de espera para atendimento (fila), índice de ocupação e capacidade (adotado o número de navios atendidos). O número de navios gerados pelo sistema, por tipo de carga é apresentado para todos os cenários, nos anos de 2025 e 2030 através da Figura 46 e Figura 47, juntamente com o número esperado de navios, conforme as previsões do Plano Mestre. Pelos dados apresentados, pode-se observar que os números de navios gerados na simulação estão bem próximos aos esperados (com variações entre 2% e 8%), e ainda mais por se tratar de

eventos aleatórios, pode-se assumir que os resultados em relação aos números de navios gerados pelo modelo se mostram satisfatórios.

Figura 46 - Número de navios esperados e gerados na simulação em 2025

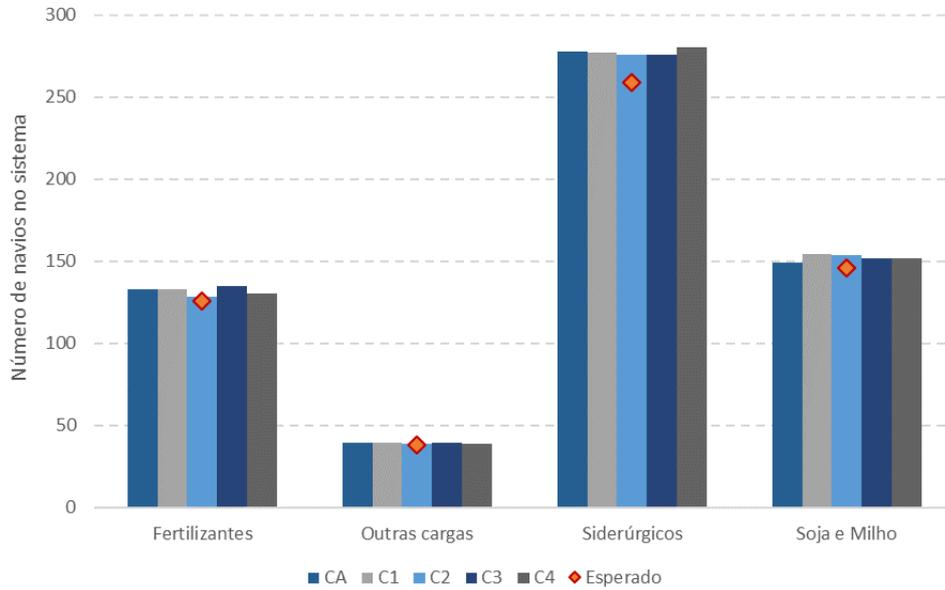
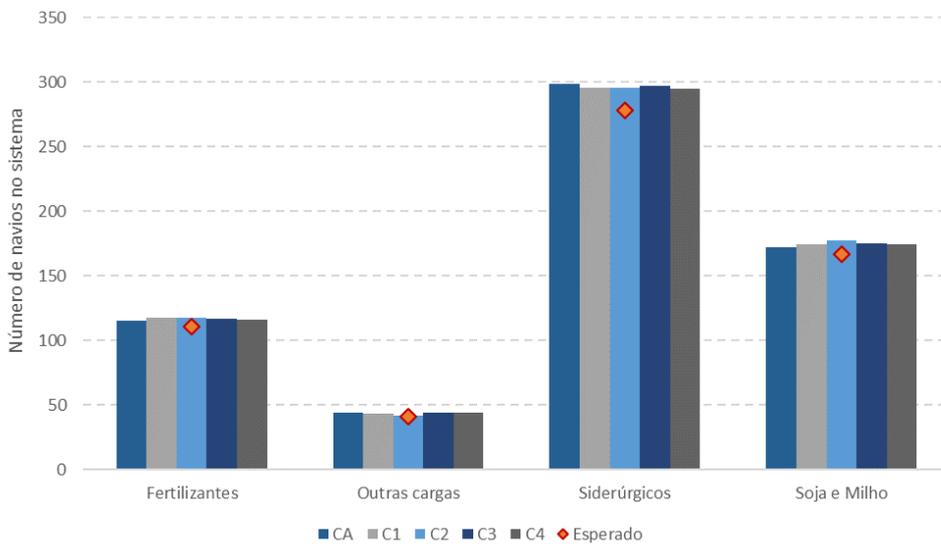


Figura 47- Número de navios esperados e gerados na simulação em 2030



Os dados de navios atendidos por carga e berço são apresentados através dos gráficos seguintes. A operação de granéis vegetais exportação (soja e milho) é apresentada através da Figura 48 para o ano de 2025 e da Figura 49 para o ano de 2030. Como pode ser observado,

nos cenários atual, 1 e 2, não há operação dessa carga no 401, conforme definido na construção desses. No cenário 3, com apenas o 101 e o 401 em operação, a carga é dividida entre os dois, com números levemente superiores ao 401, mesma situação apresentada no Cenário 4, com os três berços em operação. Esse resultado já era esperado, uma vez que de acordo com as premissas adotadas no modelo, o berço 401 é o primeiro da fila a ser consultado se está liberado para atracação.

Figura 48- Número de navios atendidos de Soja e Milho - 2025

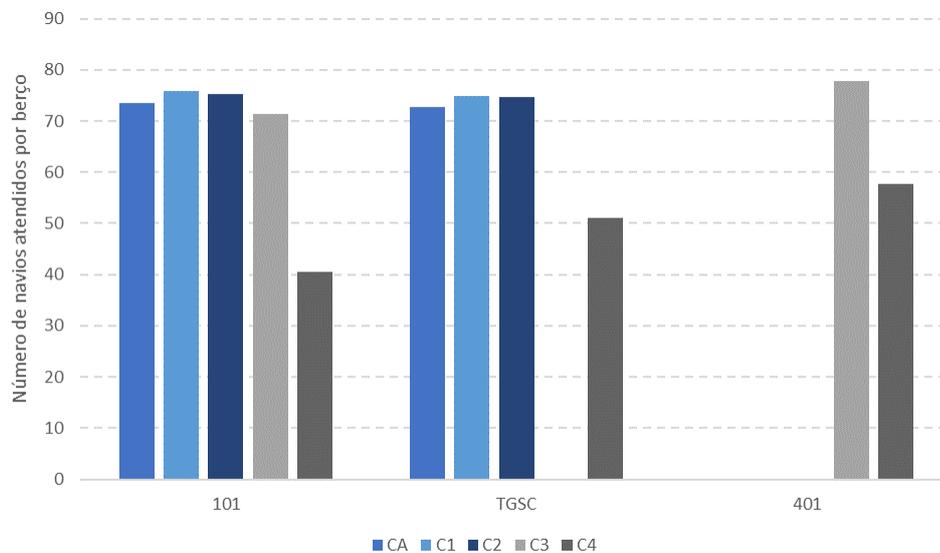
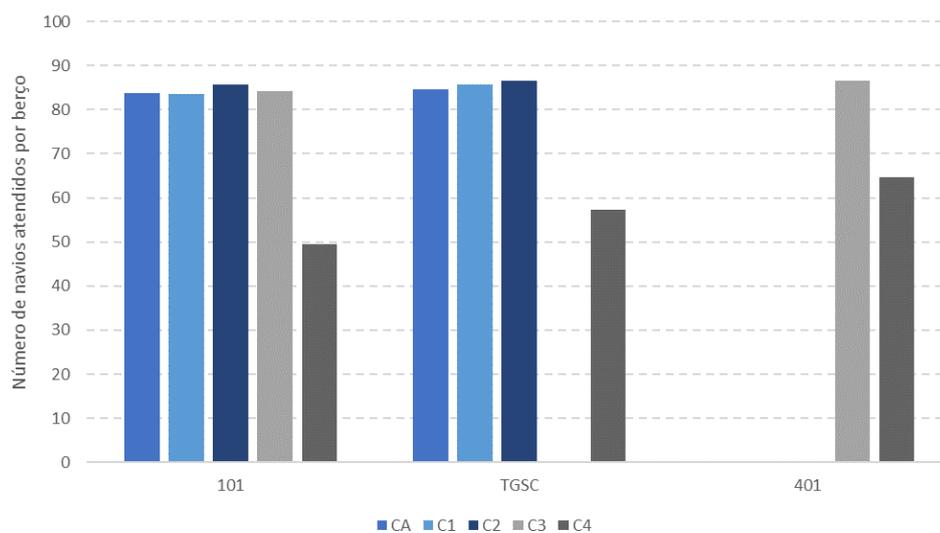
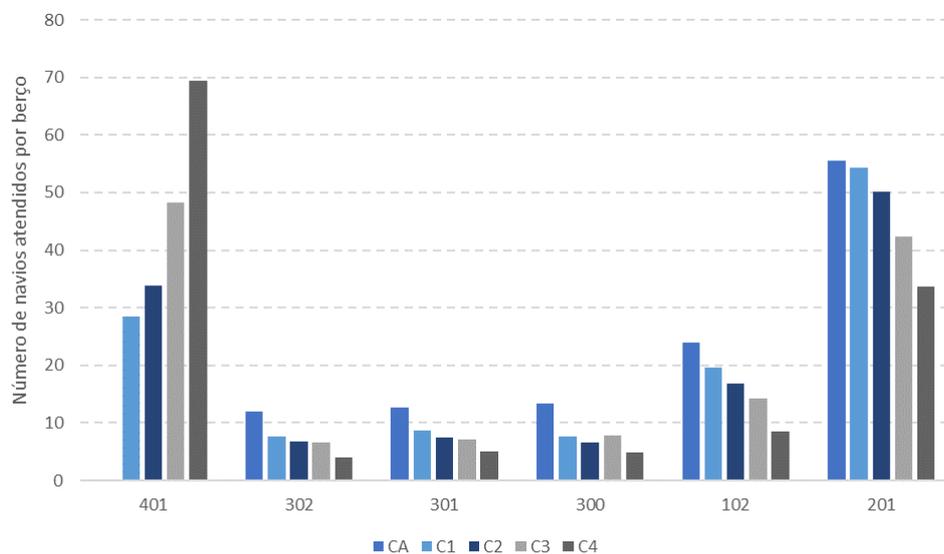


Figura 49 - Número de navios atendidos de Soja e Milho - 2030



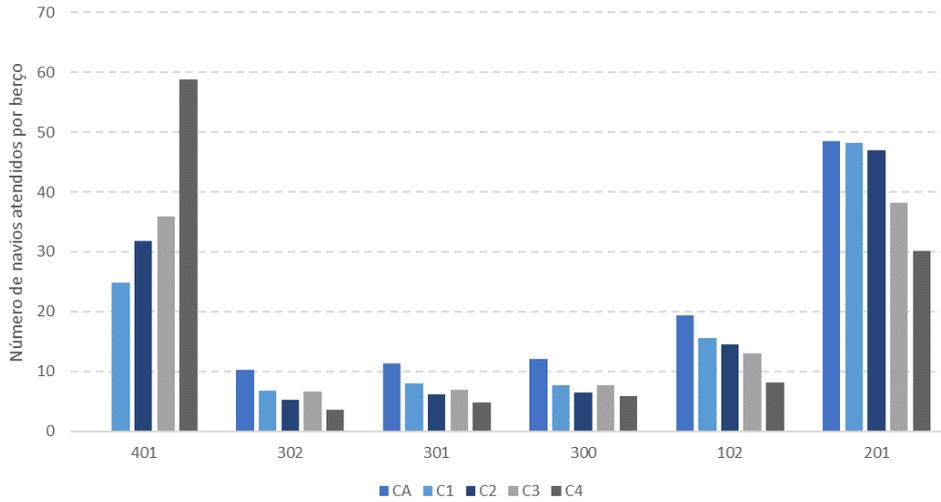
A Figura 50 ilustra para o ano de 2025 a movimentação de adubos e fertilizantes nos berços que realizam essa operação. Comparando-se os resultados da simulação com o cenário atual, observa-se que ocorre uma migração dos navios dos berços atuais para o 401. O aumento ainda mais considerável no cenário 4 se dá em função da entrada do TGSC para movimentação de soja e milho, dividindo assim essa carga com o 101 e o 401, e tornando-o esse último mais disponível para adubos e fertilizantes. É importante lembrar que, com exceção no cenário 1, a produtividade do 401 para o fertilizantes é maior do que dos outros berços, tornando-o com o menor tempo de processamento e portanto, maior número de navios atendidos.

Figura 50 - Número de navios atendidos de Fertilizantes - 2025



Essa situação também se mostra em 2030. No entanto, cabe lembrar que, de acordo com o Plano Mestre, haverá uma queda na movimentação de fertilizantes no complexo, e assim, há também um número menor de navios atendidos em 2030 do que em 2025 em todos os berços, como mostra a Figura 51.

Figura 51- Número de navios atendidos de Fertilizantes – 2030



Em relação aos produtos siderúrgicos, o berço 401 deixa de movimentar nos cenários 3 e 4, em função de que nesses cenários, a sua operação acaba sendo focada em granéis vegetais exportação e fertilizantes, deixando a operação de siderúrgicos principalmente para os berços 301 e 302, que atualmente são especializados nessa movimentação. Os números de navios atendidos por berço para os produtos siderúrgico são apresentados para 2025 e 2030 através da Figura 52 e Figura 53, respectivamente.

Figura 52- Número de navios atendidos de siderúrgicos - 2025

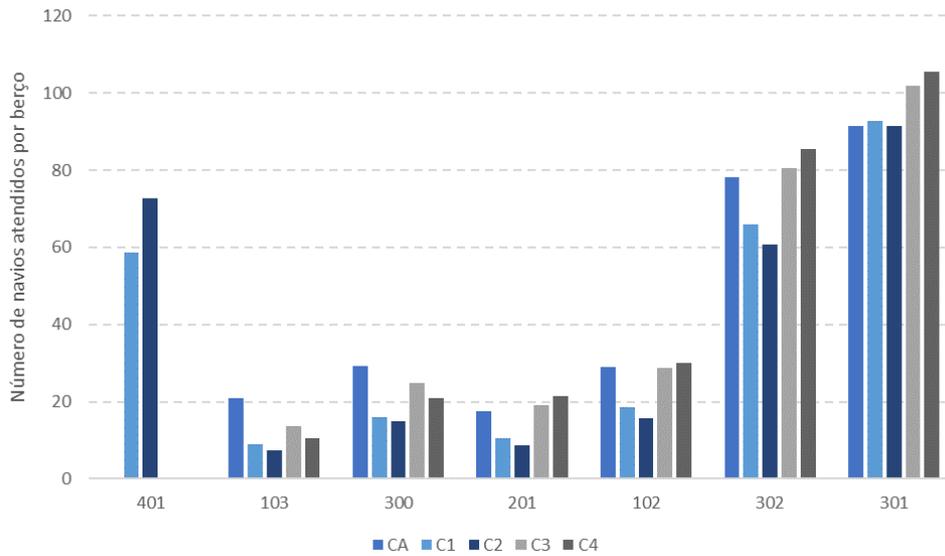
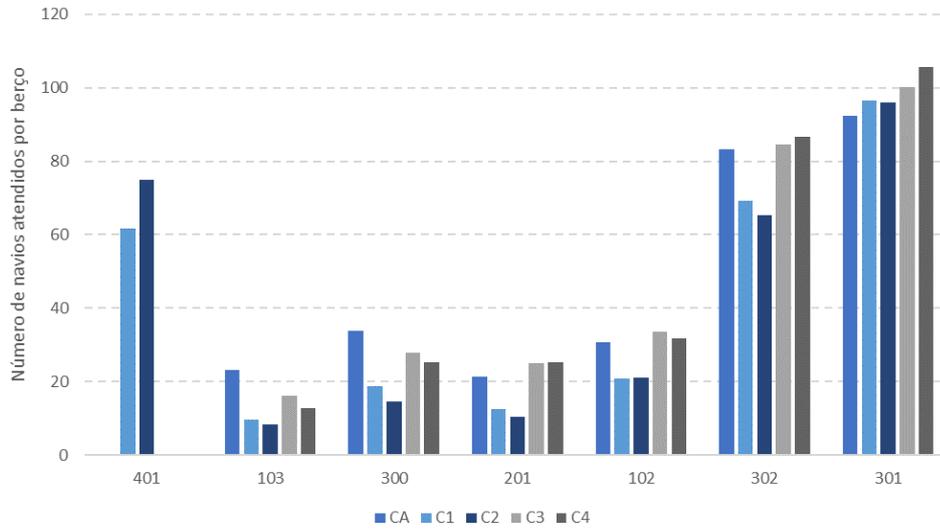


Figura 53- Número de navios atendidos de siderúrgicos – 2030



Essa situação ocorre também na movimentação de outras cargas, mas tendo como berço principal o 102, como pode ser observado através da Figura 52 para o ano de 2025 e através da Figura 53 para o ano de 2030.

Figura 54- Número de navios atendidos de outras cargas - 2025

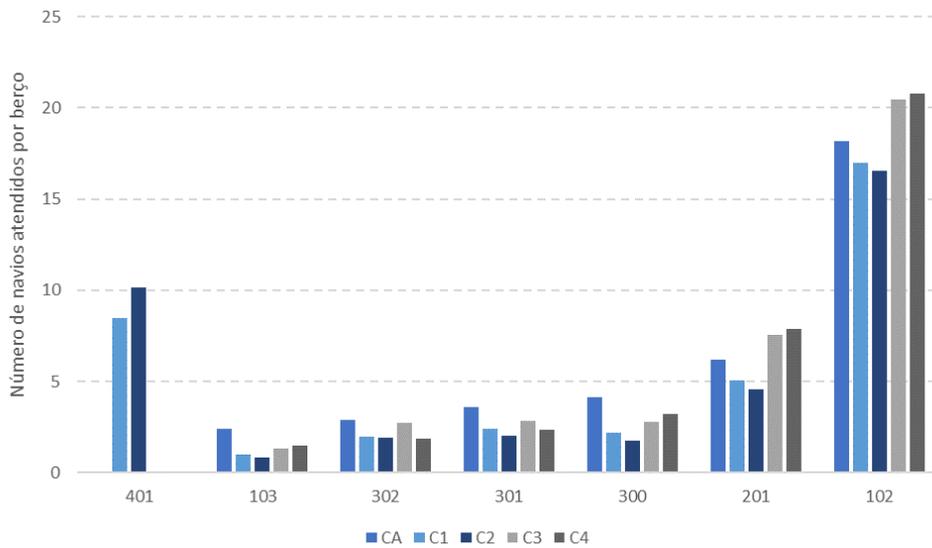
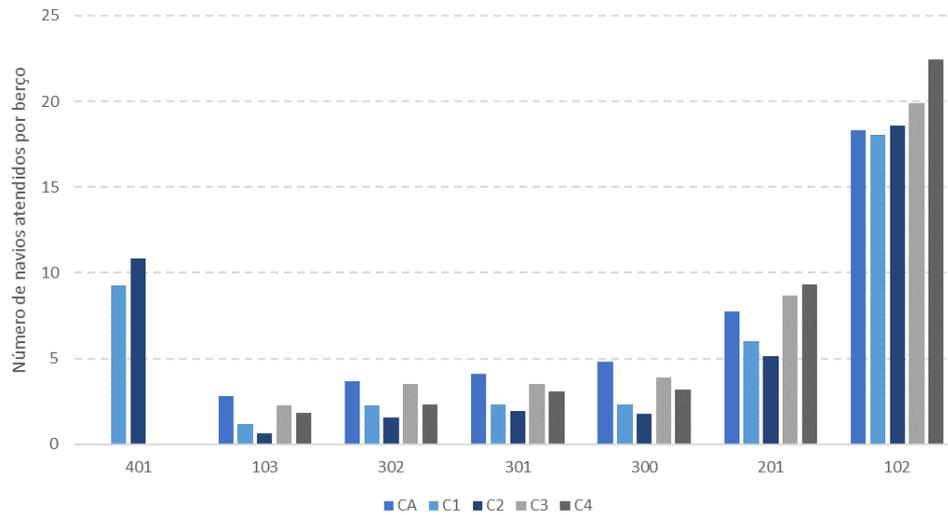


Figura 55- Número de navios atendidos de outras cargas - 2030



Com base nos dados apresentados, a Tabela 11 traz o número de navios atendidos por berço em 2025 e a Tabela 12 em 2030, para cada um dos cenários. De forma geral, observa-se um aumento em torno de 2% a 3% no número de navios atendidos considerando o cenário de infraestrutura atual (sem o 401) e os outros cenários.

Tabela 11. Número de navios atendidos por berço e cenário - 2025

Berço	CA	C1	C2	C3	C4
101	73	75	74	71	40
102	70	54	48	63	58
201	79	69	63	68	62
300	46	26	23	35	29
302	92	75	69	89	91
301	107	103	100	111	112
103	23	10	8	15	12
TGSC	72	74	74	0	51
401	0	95	116	125	126
<i>Total</i>	<i>562</i>	<i>581</i>	<i>576</i>	<i>577</i>	<i>581</i>

Tabela 12. Número de navios atendidos por berço e cenário - 2030

Berço	CA	C1	C2	C3	C4
101	83	83	85	84	49
102	67	54	53	66	61

Berço	CA	C1	C2	C3	C4
201	77	66	62	71	64
300	50	28	23	39	34
302	97	77	72	94	92
301	107	106	103	110	113
103	26	11	9	18	14
TGSC	84	85	86	0	57
401	0	95	117	122	123
<i>Total</i>	<i>590</i>	<i>604</i>	<i>608</i>	<i>602</i>	<i>606</i>

Outro indicador a ser analisado são os tempos médios de espera para operar, ou seja, o tempo de fila. A Tabela 13 traz os tempos médios de fila por berço e cenário, para os anos de 2025 e de 2030.

Tabela 13. Tempos médios de fila por berço e cenário (em horas)

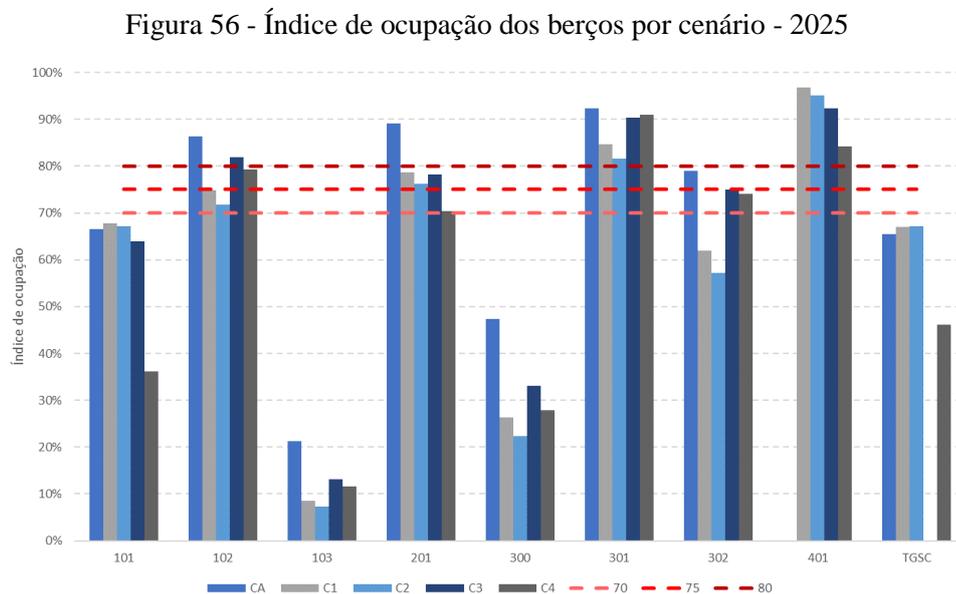
2025					
Berços	CA	C1	C2	C3	C4
101	93	85	85	42	24
102	72	70	74	72	74
103	33	25	25	27	28
201	65	57	61	60	54
300	45	41	38	40	41
301	54	45	44	49	49
302	46	38	37	43	41
401	x	72	56	44	32
TGSC	79	86	91	x	37
2030					
Berços	CA	C1	C2	C3	C4
101	130	114	119	49	30
102	79	76	67	71	72
103	39	29	24	28	28
201	66	57	57	58	56
300	47	37	35	44	39
301	56	45	43	52	49
302	47	40	38	45	43
401	x	72	56	50	35
TGSC	127	132	126	x	43

Em relação aos berços que movimentam soja e milho, de acordo com os dados apresentados na Tabela 13, observa-se que ocorre uma queda considerável nos tempos de fila nos cenários 3 e 4, enquanto que essa queda é menor para os cenários 1 e 2. Esse resultado era esperado principalmente para o cenário 4, onde são considerados 3 berços em operação, diferentemente dos outros cenários, onde operam apenas 2.

O tempo de fila do cenário 3 também é menor em relação aos cenários atuais, 1 e 2, mesmo que os quatro cenários possuam dois berços operando com a mesma produtividade. Isso se explica em função da forma mercadológica no qual o modelo foi concebido (apresentado em 4.3.2).

Nos outros berços observa-se também uma queda no tempo de fila, mas de forma mais suave. Nos cenários 1 e 2, quando o berço 401 também opera carga geral (siderúrgicos e outras cargas), a diferença com o cenário atual é maior do que nos cenários 3 e 4, quando ele opera apenas fertilizantes e granéis vegetais.

Por fim, os indicadores de ocupação dos berços estão apresentados na Figura 56 para o ano de 2025.



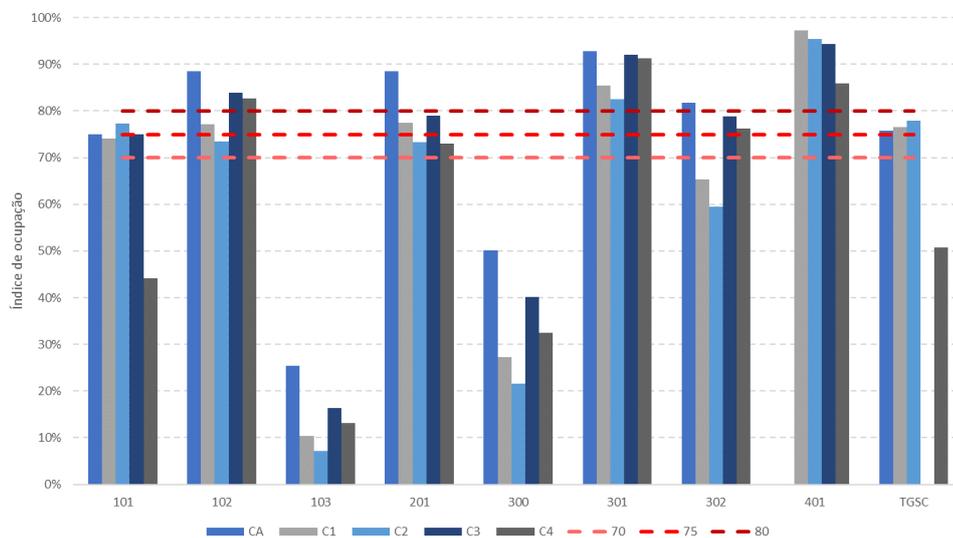
As linhas tracejadas indicam os índices de ocupação tolerados para 2 berços (70%), 3 berços (75%) e 4 ou mais berços (80%) que operam a mesma carga, de acordo com a metodologia adotada nos Planos Mestres. Por essas linhas observa-se que com o cenário atual,

dos 6 berços que movimentam carga geral, 4 deverão operar acima do limite ou bem próximo a ele. Essa situação se ameniza nos outros cenários, com a inclusão do 401, embora mesmo assim alguns berços devem operar acima do índice máximo indicado, como o 301, que movimenta um número elevado de navios de siderúrgicos, e o 102 e 201, que nos cenários 3 e 4 (sem movimentação de fertilizantes no 401) ficam próximos ao limite.

Torna-se importante mencionar os índices de utilização do berço 401, que são superiores ao máximo recomendado. Isso acontece em função da premissa adotada, de que o berço é “prioritário” na escolha dos navios, e assim dificilmente ele ficará ocioso. Na prática, isso pode não ocorrer, cabendo aos técnicos do porto a gestão das operações, bem como as escolhas do mercado.

Os dados de 2030 estão apresentados na Figura 57, e como era de se esperar, os índices de ocupação se tornam ainda superiores em função da maior demanda. No entanto, esse aumento não é tão expressivo uma vez que ocorre uma diminuição na movimentação de fertilizantes, como já mencionado.

Figura 57- Índice de ocupação dos berços por cenário - 2030



4.3.6 Etapa de conclusões e recomendações

Ao longo do desenvolvimento da etapa anterior, diversas conclusões foram sendo apresentadas. De forma geral, o modelo gerou resultados esperados e condizentes com a realidade observada.

Através dos resultados das simulações, destacaram-se os seguintes pontos:

- O número de navios de fertilizantes atendidos é maior nos cenários no quais a operação é mais eficiente, ou seja, quando opera com moega, esteira e armazém;
- Com a operacionalização do berço 401 ocorre um aumento do número de navios atendidos de 2% a 3%. Considerando o cenário 4, esse número corresponde a 19 navios em 2025, que aparentemente dá a impressão de ser um número pequeno. No entanto, se for considerado que esses 19 navios seriam de granel sólido, com um lote de 65.000 toneladas, isso representa uma receita de R\$1.766.050,00, apenas para a Tabela I (acesso aquaviário) da tarifa portuária (APSFS, 2019). Além da Tabela I, há diversas outras receitas atreladas a movimentação dessa carga: Tabela II (uso do cais), Tabela III (uso da estrutura terrestre), e as próprias receitas vinculadas às operações de apoio e da importância do comércio exterior dessas operações;
- A diminuição dos tempos médios de fila é o principal ganho observado com a implantação do berço 401, principalmente para os graneis vegetais de exportação. O berço 101 passa de 93 horas de espera média (quase 4 dias) para 1 dia no cenário 4. O custo de *demurrage*, que é o valor pago por atraso do navio, é em torno de US\$ 15 mil por dia (PNLP, 2015), ou seja, nesse caso, para cada navio com destino ao berço 101 há um custo extra de aproximadamente US\$ 45.000, que é repassado ao produto, aumentando o custo logístico e o valor final do produto;
- Para os outros berços não ocorre uma diminuição tão significativa nos tempos de fila, pois no cenário 1 e 2, embora o 401 movimente carga geral e fertilizantes, a produtividade é a média observada atualmente e o berço se divide entre diversas cargas. Já nos cenários 3 e 4, não é considerada a movimentação de carga geral por ele, apenas de graneis e de forma mecanizada, esse sim com produtividades elevadas;
- Os índices de ocupação do berço 401 se mostraram elevados. Isso porque a forma no qual o modelo foi concebido prioriza a atracação dos navios no mesmo, e assim ele dificilmente ficaria ocioso;

- Se analisados os índices de ocupação do berço 101, com exceção do cenário 4, quando há três berços movimentando soja e milho, eles também se mostram próximo ou levemente superior aos índice recomendado pela literatura da área. Os dados observados de 2016 mostram que nesse ano o valor já era de 70%, lembrando que o TGSC ainda não está em operação (Brasil, 2017).

Dentro desse contexto, o cenário 4 apresenta os melhores ganhos em termos de diminuição do tempo de fila, em especial se analisada a exportação de graneis vegetais, principal carga de movimentação atualmente no porto. Como sugestões, recomenda-se o desenvolvimento de um estudo de viabilidade, como forma de analisar em termos de benefícios e custos qual o melhor cenário para implantação. Além disso, podem ser realizados diferentes cenários, alterando as divisões das cargas entre os berços ou ainda utilizando cenários mais longevos, nos quais as movimentações apresentem valores ainda maiores, e testando como se comporta o sistema quando a demanda for acima de sua capacidade.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho abordou o desenvolvimento de uma análise de configuração de um novo berço no Porto de São Francisco do Sul, utilizando a técnica da simulação. Inicialmente houve a necessidade de se realizar uma ampla pesquisa bibliográfica como forma de identificar os conceitos de modelagem e simulação, as limitações dessa técnica e as aplicações. Além disso, o *software* Arena, utilizado para a aplicação de caso, foi estudado, e as principais ferramentas utilizadas foram apresentadas.

Com base nessa pesquisa, foi possível a definição de um método, que pode ser utilizado em diversas aplicações, não apenas de terminais portuários. Tal método foi aplicado para a análise geral do Porto de São Francisco do Sul caso um novo berço (401) seja implantado em área a ser arrendada. Nesse contexto, foram adotados quatro cenários de simulação, como forma de se identificar as alterações em termos de movimentação portuária e tempos de fila que cada um dos cenários traria ao sistema.

Em dois desses cenários foi considerada a movimentação apenas de carga geral e fertilizantes, enquanto que nos outros dois, o berço 401 movimentaria soja, milho e fertilizantes. Os resultados mostraram que os ganhos foram superiores nos cenários 3 e 4, e principalmente em relação a diminuição do tempo de espera para atracação. No caso dos cenários 1 e 2 houve também ganhos, mas eles foram mais sutis, uma vez que as cargas são movimentadas em diversos berços do porto, e em volumes menores do que os granéis vegetais.

Em todos os cenários não houve para os anos de análise (2025 e 2030) ganhos muito significativos em termos de quantidade movimentada, em função de que para a demanda prevista, os berços ainda possuem capacidade para atendimento. No entanto, caso melhorias não sejam realizadas, com o aumento das movimentações em horizontes mais distantes, a tendência é de que o porto chegue à estagnação da quantidade movimentada em função do atingimento de sua capacidade operacional, principalmente na movimentação de granéis vegetais exportação, mas também com sérias restrições operacionais e custos elevados para movimentar cargas gerais e granéis de importação pelo porto público e o terminal arrendado do TESC.

Para trabalhos futuros, são feitas as seguintes recomendações:

- Realizar o estudo de viabilidade técnica, econômica e ambiental para determinar o melhor cenário econômico e financeiro, tendo em vista que os

cenários possuem estruturas de cais em diferentes configurações, e que essas estruturas possuem valores de obras diferenciadas. De forma geral, a configuração que utiliza esteiras (cenários 2, 3 e 4) possuem maiores custos com equipamentos, no entanto, para os cenários 3 e 4, pode ser utilizado cais com *dólfins*, o que diminui os custos com a infraestrutura de acostagem;

- Realizar novas execuções de simulação, abordando previsões de demanda mais atualizadas. Para o presente estudo foram abordadas as previsões do Plano Mestre, apresentado em 2016, e assim, previsões mais atuais e compatíveis com os dados observados podem ser interessantes. Isso fica mais evidenciado ao analisar os dados previstos da movimentação de fertilizantes, cujo Plano Mestre previu uma queda, diferentemente do que vem se observando;
- Realizar novas rodadas de simulação, abordando horizontes de médio e longo prazo, onde as demandas esperadas são bem superiores aos valores atuais, e buscar o ponto onde há estrangulamento do sistema, ou seja, quando o porto não consegue mais aumentar sua movimentação em função de ter atingido sua capacidade máxima. Nesse ponto podem ser analisadas as filas geradas e os custos oriundos dessa situação;
- Realizar simulação também do acesso aquaviário, uma vez que ele também é um recurso, e de acordo com o Plano Mestre, ele está no seu limite de capacidade. Assim, analisar como se comportará o acesso com a implantação de mais um berço é outro estudo que deve ser realizado, caso se opte pela implantação do 401.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALFREDINI, Paola; ARASAKI, Emilia. **Engenharia Portuária**. 2ª Edição. Editora Blucher, 2018.

ALTIOK, Tayfur; ALMAZ, Ozhan Alper; GHAFoori, Amir. *New Jersey Department of Transportation Maritime Resources Center for Advanced Infrastructure and Transportation (CAIT) Rutgers, The State University of New Jersey. Modeling and Analysis of the Vessel Traffic in the Delaware River and Bay Area Risk Assessment and Mitigation*. Janeiro de 2012.

ANTAQ. Agência Nacional de Transportes Aquaviários. **Anuário Estatístico**. Disponível em: <http://web.antaq.gov.br/Anuario/>

APSFS. Porto de São Francisco do Sul. **Tarifas Portuárias**. Disponível em: <https://www.apsfs.sc.gov.br/wp-content/uploads/2014/12/TARIFASCPARPSFS.pdf> Acesso em: novembro de 2019

ARRUDA, Ciro Marques; NOBRE JÚNIOR, Ernesto Ferreira; MAGALHÃES, Petronio Sá Benevides. **Método dos indicadores de desempenho proposto pela ANTAQ: uma aplicação ao terminal portuário do Pecém**. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 18., 2008, Rio de Janeiro: Abepro, 2008. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2008_tn_sto_069_496_11018.pdf>. Acesso em: 28 jul. 2019.

BRASIL. Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil. **Plano Mestre Complexo Portuário de Santos**. Abril de 2019. Disponível em: https://www.infraestrutura.gov.br/images/SNP/planejamento_portuario/planos_mestres/versao_completa/VC-SSZ.zip Acesso em: outubro de 2019

BRASIL. Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil. **Plano Mestre Complexo Portuário de Paranaguá**. Outubro de 2018. Disponível em: https://www.infraestrutura.gov.br/images/SNP/planejamento_portuario/planos_mestres/versao_completa/pm22.pdf Acesso em: setembro de 2019

BRASIL. Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil. **Plano Mestre Complexo Portuário de São Francisco do Sul**. Fevereiro de 2017. Disponível em: <http://infraestrutura.gov.br/images/planos-mestres-versao-completa/pm30.pdf> Acesso em: julho de 2019

BRASIL. Secretaria de Portos. **PNLP 2015. Plano Nacional de Logística Portuária. Relatório de Metodologias**. Disponível em: https://infraestrutura.gov.br/images/SNP/planejamento_portuario/arquivos_pnlp/RelatoriodeMetodologiasPNLP.pdf Acesso em: agosto de 2019

BRITO, Thiago Barros. **Modelagem e Simulação de um Terminal Regulador de Contêineres**. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação). Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Engenharia de Produção. São Paulo, 2008.

CALDEIRA, Lais Kimie Oshiro; ALMEIDA, Luiza Lavocat Galvao; BARBALHO, Sanderson Cesar Macedo. **Metodologia para cálculo da capacidade de movimentação de uma carga em um porto: aplicação no terminal de cargas Tecar em Itaguaí**. XXXV Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Fortaleza, CE, Brasil, 13 a 16 de outubro de 2015. Disponível em: http://www.abepro.org.br/biblioteca/TN_STO_206_222_27850.pdf Acesso em: agosto de 2019

CHANG, Young-Tae; LUO, Meifeng; TONGZON, Jose; LEE, Paul Tae-Woo. *Hong Kong Polytechnic University. Estimation of Optimal Handling Capacity of a Container Port: An Economic Approach, Transport. Reviews: A Transnational Transdisciplinary Journal*, 32:2, 241-258. Janeiro de 2012. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01441647.2011.644346> Acesso em: outubro de 2019

FILHO, Paulo José de Freitas. **Introdução à Modelagem e Simulação de Sistemas com Aplicações em Arena**. 2ª ed. Florianópolis: Visual Books, 2008.

FRAGA, Admilson; CONCEIÇÃO, Alexandre Cabral; SAID, Gabriel Alvarenga; CERQUEIRA, Moisés J. Bernardes. Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza. Faculdade de Tecnologia da Baixada Santista. Curso Superior de Tecnologia em Gestão Portuária. **Relatório Técnico de Simulação de Operações Portuárias**. Santos, Junho de 2017.

GOOGLE EARTH. **Software**

IGNACIO, Anibal Alberto Vilcapoma; NEVES, Cesar das. **Análise de capacidade de terminais portuários através da técnica de simulação**. In: XXIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2009, Salvador: Enegep, 2009. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2009_tn_sto_096_652_12778.pdf>. Acesso em: 02 maio 2019.

KELTON, W. David; SADOWSKI, Randall P.; ZUPICK, Nancy B. *Simulation with Arena*. 6 Ed. Mc Graw Hill Education. 2015.

KOTACHI, Mariam; RABADI, Ghaith; OBEID, Mohammad F. *Simulation Modeling and Analysis of Complex Port Operations with Multimodal Transportation*. Procedia Computer Science 20. Missouri University of Science and Technology, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050913010661> Acesso em: outubro de 2019

LAW, Averill M.; KELTON, W. David. **Simulation Modeling and Analysis**. 2 ed. McGraw-Hill Book Co. 1991

MARTINGO, Jerónimo Daniel Amorim. **Elementos geométricos para o planeamento físico de terminais portuários**. Universidade do Porto. Faculdade de Engenharia.

PAIXÃO, A. C.; MARLOW, P. B. **Fourth generation ports--a question of agility?** International Journal Of Physical Distribution & Logistics Management, v. 33, n. 4, p. 355-376. Bradford, 2003.

PIANC. *Masterplans for the development of existing ports*. The World Association for Waterborne Transport Infrastructure. PIANC Report n° 158: Maritime Navigation Commission. 2014

PORTUGAL, Licinio da Silva. **Simulação de Tráfego: Conceitos e Técnicas de Modelagem**. Rio de Janeiro: Interciência, 2005.

PRADO, Darci Santos do. **Usando o ARENA em simulação**. 5ª ed. Nova Lima: Falconi Editora, 2014.

PROMODEL CORPORATION. **User Guide: Promodel for Windows**. 2011. Disponível em: <https://www.monografias.com/trabajos-pdf2/user-guide-pro-model-version/user-guide-pro-model-version.pdf> Acesso em: setembro de 2019

ROSSETTI, Manuel D. **Simulation modeling and Arena**. 2 ed. Wiley Editora, 2016.

SARNAGLIA, Vinicius de Martin. **Modelagem da operação portuária aplicada à quantificação de emissões atmosféricas**. Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2014. Disponível em: <http://www.coc.ufrj.br/pt/documents2/mestrado/2014/2536-vinicius-de-martin-sarnaglia-mestrado/file> Acesso em: setembro de 2019

SCPAr. Complexo Portuário de São Francisco do Sul. **Situação Atual e Perspectivas**. Disponível em: <http://fiesc.com.br/pt-br/file/12138/download?token=HYnF4XF7> Acesso em: setembro de 2019

SEABRA, Luis Antonio Moreira. **Simulação de uma linha de montagem de veículos: uma aplicação em veículos militares**. Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Industrial, 2006. Disponível em: https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/9327/9327_1.PDF Acesso em: outubro de 2019

SILVA, André Luís Ludolfo. **Análise da capacidade operacional de um terminal portuário de importação de fertilizantes por meio da simulação. Simulação de uma linha de montagem de veículos: uma aplicação em veículos militares**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Transportes, 2011.

TRIMAK. **Reach Stacker**. Disponível em: <https://www.trimak.com.br/reach-stacker.php> Acesso em: novembro de 2019.

TRISKA, Yuri. **Cálculo de Capacidade de Movimentação de Cais Portuário: Aplicação Para Terminal de Granéis Sólidos**. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis, 2015.

UNCTAD. *United Nations Conference on Trade and Development. The Capacity in Container Port Terminals. Ad Hoc Expert Meeting on Assessing Port Performance. Geneva, Switzerland. 12 December 2012.* Disponível em: https://unctad.org/meetings/en/Presentation/dtl_ttl_2012d10_Soberon.pdf Acesso em: setembro de 2019

ANEXO A: CURVAS DE DISTRIBUIÇÃO DE CHEGADA

Navios de soja
 Distribution:Exponential
 Expression:1 + EXPO(100)
 Square Error:0.005321

Chi Square Test

Number of intervals= 4
 Degrees of freedom = 2
 Test Statistic = 1.72
 Corresponding p-value= 0.44

Kolmogorov-Smirnov Test

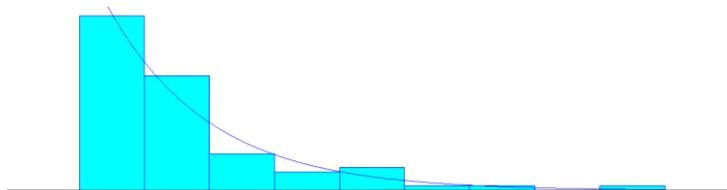
Test Statistic= 0.0668
 Corresponding p-value> 0.15

Data Summary

Number of Data Points= 83
 Min Data Value = 1.58
 Max Data Value = 578
 Sample Mean = 101
 Sample Std Dev = 105

Histogram Summary

Histogram Range = 1 to 578
 Number of Intervals= 9



Function	Sq Error
Erlang	0.00532
Exponential	0.00532
Gamma	0.0071
Weibull	0.00787
Beta	0.0221
Lognormal	0.0283
Normal	0.0898
Triangular	0.126
Uniform	0.205

Produtos siderúrgicos
 Distribution:Exponential
 Expression:-0.001 + EXPO(44.6)
 Square Error:0.001915

Chi Square Test

Number of intervals= 8
 Degrees of freedom = 6
 Test Statistic = 3.94
 Corresponding p-value= 0.686

Kolmogorov-Smirnov Test

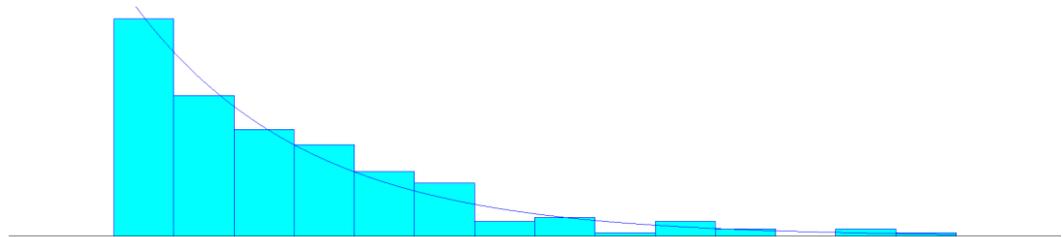
Test Statistic= 0.0598
 Corresponding p-value> 0.15

Data Summary

Number of Data Points= 196
 Min Data Value = 0
 Max Data Value = 214
 Sample Mean = 43.7
 Sample Std Dev = 40.2

Histogram Summary

Histogram Range = -0.001 to 214
 Number of Intervals= 14



Function	Sq Error
Erlang	0.00192
Exponential	0.00192
Beta	0.0028
Weibull	0.00666
Gamma	0.00739
Lognormal	0.0422
Normal	0.0435
Triangular	0.0489
Uniform	0.0986

Outras cargas
 Distribution:Weibull
 Expression:13 + WEIB(211, 1.07)
 Square Error:0.000970

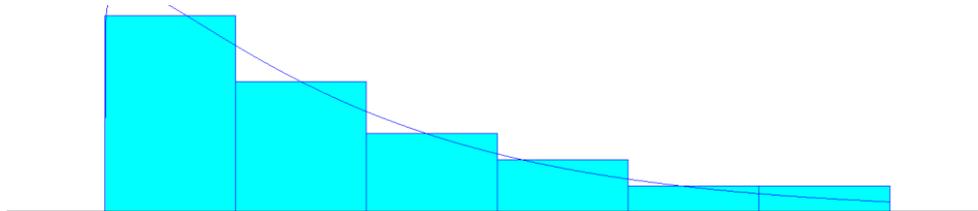
Chi Square Test

Number of intervals= 4
 Degrees of freedom = 1
 Test Statistic = 0.54
 Corresponding p-value= 0.475

Number of Data Points= 39
 Min Data Value = 13.8
 Max Data Value = 680
 Sample Mean = 219
 Sample Std Dev = 173

Histogram Summary

Histogram Range = 13 to 680
 Number of Intervals= 6



Function	Sq Error
Weibull	0.00097
Gamma	0.00143
Erlang	0.00237
Exponential	0.00237
Beta	0.00526
Lognormal	0.0188
Triangular	0.0283
Normal	0.0532
Uniform	0.0865

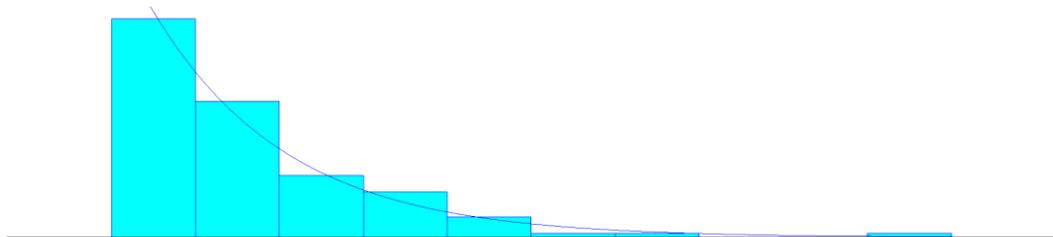
Fertilizantes
 Distribution:Exponential
 Expression:-0.001 + EXPO(71.4)
 Square Error:0.001948

Chi Square Test
 Number of intervals= 4
 Degrees of freedom = 2
 Test Statistic = 1.19
 Corresponding p-value= 0.561

Kolmogorov-Smirnov Test
 Test Statistic= 0.0578
 Corresponding p-value> 0.15

Data Summary
 Number of Data Points= 120
 Min Data Value = 0
 Max Data Value = 446
 Sample Mean = 71.4
 Sample Std Dev = 68.1

Histogram Summary
 Histogram Range = -0.001 to 446
 Number of Intervals= 10



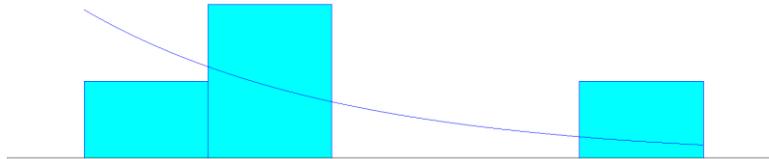
Function	Sq Error
Erlang	0.00195
Exponential	0.00195
Weibull	0.00349
Gamma	0.00384
Beta	0.014
Lognormal	0.0309
Normal	0.0683
Triangular	0.12
Uniform	0.197

Navios de milho
 Distribution:Exponential
 Expression:4 + EXPO(242)
 Square Error:0.154448

Kolmogorov-Smirnov Test
 Test Statistic= 0.291
 Corresponding p-value> 0.15

Data Summary
 Number of Data Points= 4
 Min Data Value = 4
 Max Data Value = 588
 Sample Mean = 246
 Sample Std Dev = 245

Histogram Summary
 Histogram Range = 4 to 588
 Number of Intervals= 5



Function	Sq Error
Erlang	0.154
Exponential	0.154
Triangular	0.16
Uniform	0.175
Normal	0.191
Gamma	0.231
Lognormal	0.265
Weibull	0.375
Beta	0.828

Fertilizantes São Francisco do Sul

Distribution:Triangular

Expression:TRIA(54, 267, 528)

Square Error:0.047690

Chi Square Test

Number of intervals= 7

Degrees of freedom = 5

Test Statistic = 61.5

Corresponding p-value< 0.005

Number of Data Points= 118

Min Data Value = 54.5

Max Data Value = 528

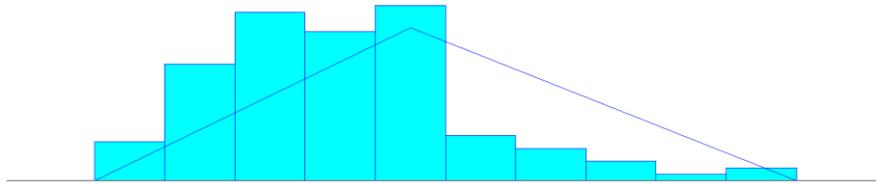
Sample Mean = 221

Sample Std Dev = 88.8

Histogram Summary

Histogram Range = 54 to 528

Number of Intervals= 10

**Milho São Francisco do Sul**

Distribution:Triangular

Expression:TRIA(446, 515, 1.13e+003)

Square Error:0.032149

Number of Data Points= 7

Min Data Value = 447

Max Data Value = 1.13e+003

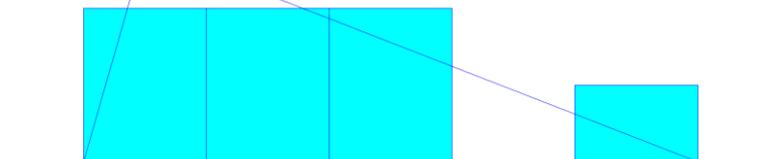
Sample Mean = 713

Sample Std Dev = 219

Histogram Summary

Histogram Range = 446 to 1.13e+003

Number of Intervals= 5



Outras cargas São Francisco do Sul

Distribution:Triangular

Expression:TRIA(9, 108, 364)

Square Error:0.013894

Chi Square Test

Number of intervals= 6

Degrees of freedom = 4

Test Statistic = 11.8

Corresponding p-value= 0.02

Number of Data Points= 89

Min Data Value = 9.35

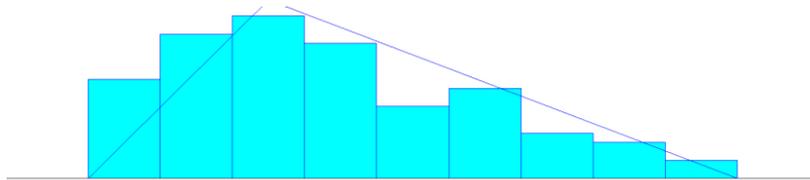
Max Data Value = 364

Sample Mean = 141

Sample Std Dev = 82.3

Histogram Range = 9 to 364

Number of Intervals= 9

**Produtos siderúrgicos São Francisco do Sul**

Distribution:Triangular

Expression:TRIA(10, 28, 479)

Square Error:0.041821

Chi Square Test

Number of intervals= 10

Degrees of freedom = 8

Test Statistic = 156

Corresponding p-value< 0.005

Number of Data Points= 188

Min Data Value = 10.2

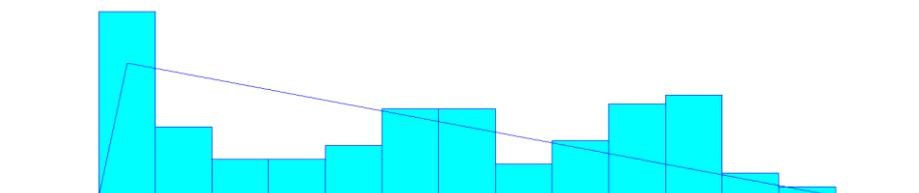
Max Data Value = 479

Sample Mean = 207

Sample Std Dev = 136

Histogram Range = 10 to 479

Number of Intervals= 13



Soja São Francisco do Sul

Distribution:Triangular

Expression:TRIA(268, 937, 1.61e+003)

Square Error:0.035475

Chi Square Test

Number of intervals= 5

Degrees of freedom = 3

Test Statistic = 19.9

Corresponding p-value< 0.005

Number of Data Points= 83

Min Data Value = 268

Max Data Value = 1.61e+003

Sample Mean = 940

Sample Std Dev = 277

Histogram Summary

Histogram Range = 268 to 1.61e+003

Number of Intervals= 9

