MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM COMPUTACIONAL

SISTEMA MULTIAGENTE APLICADO EM SIMULAÇÃO DA MOVIMENTAÇÃO DE CARGA DE PORTOS BASEADO EM ANÁLISE DE REDES

por

Elísio Bender de Leon

Tese para obtenção do Título de
Doutor em Modelagem Computacional

Rio Grande, janeiro, 2023

Ficha Catalográfica

L576s Leon, Elísio Bender de.
Sistema multiagente aplicado em simulação da movimentação de carga de portos baseado em análise de redes / Elísio Bender de Leon. – 2023.
92 f.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, Rio Grande/RS, 2023.
Orientadora: Dra. Diana Francisca Adamatti.

1. Sistema multiagente 2. Análise de redes 3. Simulador 4. Portos 5. Movimentação de cargas 6. Geoprocessamento I. Adamatti, Diana Francisca II. Título.

CDU 004:656.615

Catalogação na Fonte: Bibliotecário José Paulo dos Santos CRB 10/2344

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM COMPUTACIONAL
Av. Itália, km 8 s/nº - Campus Carreiros - CEP 96201-900 –Rio Grande/RS
E-mail: ppgmc@furg.br -Telefone: (53) 3293-5055

ATA DE DEFESA DE TESE

ATA Nº 02/2023

Ao décimo terceiro dia do mês de fevereiro de dois mil e vinte e três, por videoconferência, realizou-se a 23ª sessão de defesa de tese do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional. O doutorando **Elisio Bender de Leon** apresentou e defendeu a tese **"SISTEMA MULTIAGENTE APLICADO EM SIMULAÇÃO DA MOVIMENTAÇÃO DE CARGA DE PORTOS BASEADO EM ANÁLISE DE REDES"** como requisito parcial para a obtenção do grau de Doutor em Modelagem Computacional. A sessão foi aberta às nove horas pela Profa. Dra. Diana Francisca Adamatti, orientadora da tese e presidente da Comissão de Avaliação. A referida Comissão esteve integrada, além da presidente e orientadora, pelo Prof. Dr. Adriano Velasque Werhli da FURG, Prof. Dr. Leonardo Ramos Emmendorfer da UFSM (PPGMC/FURG), Profa. Dra. Raquel de Miranda Barbosa do IFRS e Prof. Dr. Tiago Borges Ribeiro Gandra do IFRS. Após cada integrante da Banca ter arguido o doutorando, e este ter tido a oportunidade de responder a cada um, os examinadores atribuíram os seguintes conceitos ao trabalho:

Prof. Dr. Adriano Velasque Werhli: conceito C

Prof. Dr. Leonardo Ramos Emmendorfer: conceito C

Profa. Dra. Raquel de Miranda Barbosa: conceito C

Prof. Dr. Tiago Borges Ribeiro Gandra: conceito C

Tendo sido o candidato Aprovado, com alterações no texto, com conceito C, neste requisito parcial para a obtenção do grau de Doutor em Modelagem Computacional.

gov.br Documento assinado digitalmente
ADRIANO VELASQUE WERHLI
Data: 16/02/2023 10:35:07-0300
Verifique em https://verificador.iti.br

Prof. Dr. Adriano Velasque Werhli
Membro Interno

gov.br Documento assinado digitalmente
RAQUEL DE MIRANDA BARBOSA
Data: 14/02/2023 14:40:09-0300
Verifique em https://verificador.iti.br

Profa. Dra. Raquel de Miranda Barbosa
Membro Externo

gov.br Documento assinado digitalmente
LEONARDO RAMOS EMMENDORFER
Data: 16/02/2023 13:47:23-0300
Verifique em https://verificador.iti.br

Prof. Dr. Leonardo Ramos Emmendorfer
Membro Interno

gov.br Documento assinado digitalmente
TIAGO BORGES RIBEIRO GANDRA
Data: 16/02/2023 08:12:45-0300
Verifique em https://verificador.iti.br

Prof. Dr. Tiago Borges Ribeiro Gandra
Membro Externo

gov.br Documento assinado digitalmente
DIANA FRANCISCA ADAMATTI
Data: 13/02/2023 11:49:50-0300
Verifique em https://verificador.iti.br

Profa. Dra. Diana Francisca Adamatti
Orientadora

Dedico com muita satisfação,
a minha amada e querida mulher Arlete Storch Rutz,
que sempre me deu força e me incentivou a fazer o Doutorado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mulher Arlete Storch Rutz, pelo incentivo, dedicação, apoio em todas as horas. Por ter sido a principal pessoa a me incentivar a realizar o Doutorado.

Agradeço também a Profª. Drª. Diana Francisca Adamatti pela confiança e excelente orientação e amiga durante essa trajetória da minha vida pela FURG.

RESUMO

Este trabalho tem como intuito desenvolver uma ferramenta que possa simular movimentação de cargas em portos, utilizando sistemas multiagente e análise de redes com geoprocessamento. Possibilitar a identificação de “gargalos” na movimentação de navios no porto e atracação nos terminais, no caso de acidentes de vazamento de cargas em uma região do porto, isolando áreas e, assim, permitindo simular novas rotas para não comprometer o desempenho da movimentação de cargas no porto. A aplicação foi desenvolvida em Java, utilizando o ambiente de simulação multiagente Mason (2020) e denomina-se PortSimulator. A ferramenta desenvolvida visa simular a movimentação de navios de qualquer porto, sem necessidade de conhecimento de programação pelos usuários. O simulador recebe uma imagem geoprocessada e um arquivo CSV dos dados dos agentes, informa o total de navios nos terminais, carga total do período, acompanhando em tempo real da simulação. Com a ferramenta multiagente desenvolvida com utilização de geoprocessamento, pode-se realizar a análise do fluxo dos navios, identificando melhores horários para a distribuição da movimentação dos navios e melhores rotas, diminuindo assim a espera em áreas de fundeio e menores rotas e menos fluxo de navios. Como estudo de caso para testes e validação, foram utilizados dados reais do porto de Rio Grande. Após a validação do modelo comparando com dados passados, foi possível realizar uma previsão e identificar que o tempo que o porto do Rio Grande ainda suporta de movimentação de navios, neste ritmo de crescimento, será nos primeiros meses de 2032.

Palavras-chaves: sistema multiagente, análise de redes, simulador, portos, movimentação de cargas, geoprocessamento.

ABSTRACT

This work aims to develop a tool that can simulate cargo movement in ports, using multi-agent systems, network analysis with geoprocessing. In this way, enabling the identification of “bottlenecks” in the movement of ships in the port and berthing at the terminals, in the case of cargo leakage accidents in a region of the port, isolating areas and, thus, allowing the simulation of new routes so as not to compromise performance. of cargo handling in the port. The application was developed in Java, using the Mason multi-agent simulation environment and called PortSimulator. The developed tool aims to simulate the movement of ships from any port without the need for programming knowledge by the users. The simulator receives a geoprocessing image and a CSV file of the agents' data, as well as in the simulator it is possible to inform the total number of ships in the terminals, total load of the period following the simulation in real time. With the multi-agent tool developed using geoprocessing, it is possible to analyze the flow of ships, identifying better times for the distribution of the movement of ships and better routes, thus reducing the wait in anchorage areas and smaller routes and less flow of ships. As a case study for testing and validation, real data from the port of Rio Grande were used. After validating the model by comparing it with past data, it was possible to make a prediction and identify that the time that the port of Rio Grande still supports the movement of ships, at this rate of growth, will be in the first months of 2032.

Keywords: multiagent systems, simulator, ports, cargo handling, geoprocessing.

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO **14**
1.1 Objetivos **15**
1.2 Estrutura do Texto **16**
2 EMBASAMENTO TEÓRICO E APLICADO **17**
2.1 Sistemas Multiagente **17**
2.2 Análise de Redes **19**
2.3 Geoprocessamento **20**
2.4 Portos no Mundo **21**
2.4.1 Porto de Xangai 22
2.4.2 Porto de Singapura 24
2.4.3 Porto de Roterdã 27
2.4.4 Porto de Santos 29
2.4.5 Porto do Rio Grande 31
2.5 Fluxo do Processo de Chegada/Saída de Navios em um Porto **37**
2.5.1 Aplicação das regras e fluxos em sistemas multiagente 39
2.6 Trabalhos Relacionados **40**
3 SIMULADOR DE PORTOS **47**
3.1 Método de Pesquisa **47**
3.2 Tecnologias utilizadas **50**
3.3 Roteiro da simulação **50**
3.3.1 Regras do porto na simulação 51
3.3.2 Arquivos utilizados na simulação 51
3.3.3 Modelo de agentes na simulação 52
3.4 Características do código desenvolvido **53**
3.5 Interface do sistema desenvolvido **55**
4 VALIDANDO O SIMULADOR: ESTUDO DE CASO NO COMPLEXO PORTUÁRIO DO RIO GRANDE **57**
4.1 Configuração dos dados no simulador **57**
4.2 Dados reais obtidos **62**
4.3 Análise comparativa entre dados reais e dados simulados **63**
4.4 Simulação para a identificação do limite máximo de movimentação de carga que o porto suporta **66**
4.4.1 Para a construção do cenário. 66
5 CONCLUSÕES **70**
6 APÊNDICES **73**

7 Referências **86**

8 Glossário **91**

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Localização do Porto de Xangai. 22
Figura 2.2 – Porto de Xangai na foz do rio Yangtze. 23
Figura 2.3 – Localização do porto de Singapura. 25
Figura 2.4 – Porto de Singapura. 26
Figura 2.5 – Localização do porto de Roterdã. 29
Figura 2.6 – Porto de Roterdã. 29
Figura 2.7 – Localização do porto de Santos. 30
Figura 2.8 – Porto de Santos. 31
Figura 2.9 – Localização do porto do Rio Grande. 32
Figura 2.10 – Porto do Rio Grande. 33
Figura 2.11 – Terminais portuários do porto do Rio Grande. 34
Figura 2.12 – Localização das bacias de evolução do porto do Rio Grande. 36
Figura 2.13 – Localização das áreas de fundeio do porto do Rio Grande. 36
Figura 2.14 – Fluxo da movimentação de carga do porto do Rio Grande. 37
Figura 3.1 – Passos das etapas de um trabalho de modelagem computacional. 48
Figura 3.2 – Camada shape com suas rotas do porto do Rio Grande. 51
Figura 3.3 – Estrutura da aplicação Simulador de Portos. 53
Figura 3.4 – Interface do Simulador de Portos. 56
Figura 4.1 – Interface da janela de execução do Simulador. 62
Figura 4.2 – Portos e terminais do complexo portuário do Rio Grande. 63
Figura 4.3 – Movimentação de cargas de navios de 2019. Um comparativo entre dados reais e dados simulados. 63
Figura 4.4 – Quantidade de embarques/desembarques no ano de 2019. 64
Figura 4.5 – Gráfico da simulação da movimentação de cargas do complexo portuário do Rio Grande no período de 2022 até 2032. 66
Figura 4.6 – Gráfico da simulação da quantidade de navios atracados no complexo portuário do Rio Grande no período de 2022 até 2032. 67
Figura 4.7 – Gráfico da simulação do percentual de navios atracados no complexo portuário do Rio Grande no período de 2022 até 2032. 68

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Dados Gerais do Canal de Acesso Marítimo ao Porto do Rio Grande. Fonte: SUPRG (2017). 34

Tabela 2.2 – Dados gerais das bacias de evolução do porto do Rio Grande. Fonte: SUPRG (2017). 35

Tabela 2.3 – Dados sumarizados de todos os trabalhos estudados. 46

Tabela 4.1 – Taxa de erro encontrada na comparação dos dados reais com dados simulados no complexo portuário do Rio Grande no ano de 2019, onde a carga está em Toneladas. 65

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACL	*Agent Communication Language*
AM/FM	*Automated Mapping/Facilities Management*
ANTAQ	Agência Nacional de Transportes Aquaviários
CADD	*Computer-Aided Drafting and Design*
CAP/RG	Conselho de Autoridade Portuária do Porto do Rio Grande
CPRS	Capitania dos Portos do Rio Grande do Sul
CSV	É um formato de arquivo que significa "*comma-separated-values*" (valores separados por ponto e vírgulas).
DTA	Documento de Trânsito Aduaneiro
DUKC	*Dynamic Under Keel Clearance*
GIS	*Geographic Information Systems*
GPS	Sistema de Posicionamento Global
IMO	*International Maritime Organization*
ISPS-CODE	*International Ship and Port Facility Security (ISPS) Code*
JADE	*Java Agent DEvelopment Framework*
LIS	*Land Information Systems*
MPA	Autoridade Marítima e Portuária de Singapura
PoRA	Autoridade do Porto de Roterdã
PUMA	*Projeto Uitbreiding Maasvlakte*
QGIS	Um software de Informação Geográfica livre e aberto.
SIGs	Sistemas de Informação Geográficas
SIPG	*Shanghai International Port (Group) Company Limited*
SMA	Sistemas Multiagentes
SPA	Santos *Port Authority*
SUPRG	Superintendência do Porto do Rio Grande
TEU	*Twenty-foot Equivalent Unit* Unidade equivalente a 20 pés (20 ft ou 20') - Unidade de medida de contêiner, tendo como unidade base o contêiner de

20 pés. Por exemplo, um contêiner de 40’ equivale a 2 TEU, e um de 30’ equivale a 1,5 TEU. Razzak, 2010.

1 INTRODUÇÃO

Seria possível identificar quantos anos necessários para um porto alcançar seu limite de movimentação de cargas (gargalo)? Com esta informação seria possível um investimento prévio necessário, no sentido de ampliar sua capacidade antes de atingir seu limite de movimentação de cargas. Com planejamento de menores investimentos anuais, em vez de grandes investimentos só quando for identificada a capacidade máxima portuária.

Conforme Weiss (1999), um agente é um sistema de computador situado em algum ambiente, e que seja capaz de ação autônoma nesse ambiente, a fim de atingir seus objetivos. Um Sistema Multiagente é definido como uma rede fracamente acoplada de entidades de resolução de problemas (agentes), que trabalham juntos para encontrar respostas para problemas que estão além dos recursos ou conhecimentos individuais de cada entidade (agente) (Rocha, 2017).

Os agentes desenvolvidos foram agentes reativos, dependentes da alteração do ambiente e com a utilização da ferramenta Mason, uma biblioteca de simulação multiagente de evento discreto desenvolvido em Java. No simulador cada agente foi constituído com características distintas e isso possibilita uma flexibilidade que outras ferramentas de simulação não teriam, se não utilizassem a abordagem multiagente. Tornaria mais difícil a construção de uma simulação com instâncias tão heterogêneas com o paradigma de orientação a objetos por exemplo. Com a utilização de agentes e a construção atual, onde possibilita estender demais recursos de multiagentes.

Diversos trabalhos apresentam o uso de sistemas multiagente para simulação, com uso de georreferenciamento. Algumas contribuições, como Abreu (2012), com a ferramenta *Java Agent DEvelopment Framework* (JADE), com uma aplicabilidade na área ambiental. Também Araújo Júnior (2016), em seu trabalho, propõe implementar um sistema multiagente em ambiente georreferencial. Farias (2009) contribuiu com metodologia de desenvolvimento de sistemas multiagente aplicados à região portuária da cidade de São Luís, no estado do Maranhão. Velasco (1999), que realizou um estudo sobre a dinâmica do transporte marítimo mundial e seus reflexos sobre a evolução dos portos, com aplicabilidade também aos sistemas multiagente.

A utilização de sistemas multiagente com geoprocessamento em uma simulação tem como inovação proporcionar o acompanhamento visual em tempo real dos agentes em um simulador. No trabalho de Leon (2013) foi proposto um estudo sobre a integração das duas técnicas, no contexto

de portos, de forma a auxiliar o agendamento do melhor período para a manutenção do calado do canal do porto, movimentação de cargas críticas de forma mais segura, prever o melhor aproveitamento das áreas de fundeio e identificar pontos de maior necessidade de investimento e quando deve ser feito, para não ocorrer futura sobrecarga em algum terminal. Neste trabalho foram destacadas algumas vantagens de uma simulação de multiagente com geoprocessamento e análise de redes para gestão de portos:

- Possibilidade de simular o aumento de fluxo, redimensionando as áreas de fundeio;
- Organizar melhor o agendamento prévio de chegada e atracamento de navios em terminais;
- Isolar um terminal onde houve acidente, simulando o fluxo dos navios para os demais terminais;
- Prever quando haverá a necessidade de investir em mais infraestruturas, para acompanhar o crescimento da movimentação de cargas no porto.

1.1 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é a integração do sistema multiagente com geoprocessamento e análise de redes em uma ferramenta de simulação com aplicabilidade em portos, para responder a questão, se é possível através de uma modelagem computacional da movimentação de cargas de um porto, identificar o em quanto tempo ocorre a capacidade máxima de cargas e navios em um porto. Quantos anos faltam para o porto chegar na sua capacidade máxima de movimentação de cargas? Esta ferramenta possibilita o acompanhamento em tempo real dos navios na simulação, para identificar o tempo limite da movimentação de cargas e navios no porto e extração de gráficos da movimentação de cargas dentro do período simulado, sua carga total e identificando os limites viáveis de usabilidade, carga/descarga e limite de áreas de fundeio.

Para atingir o objetivo principal, tem-se os seguintes objetivos específicos:

- Estudo sobre a dinâmica de portos e modelagem dos agentes para o sistema;
- Escolha de ferramentas para desenvolvimento do simulador proposto;
- Validação dos dados gerados a partir de dados reais.

1.2 Estrutura do Texto

No segundo capítulo é apresentado o embasamento teórico e aplicado, envolvendo sistemas multiagente dentro do contexto apresentado neste trabalho, o que é geoprocessamento, análise de redes, seus benefícios aplicados à simulação dos portos. Nesse mesmo capítulo são detalhados cinco portos, sendo os três mais movimentados do mundo: porto de Xangai, porto de Singapura e de Roterdã; e dois portos nacionais, o porto de Santos e do Rio Grande. No subcapítulo de fluxo do processo de chegada/saída de navios em um porto, onde são apresentadas todas as etapas do fluxo que um navio envolvido na movimentação de carga no terminal deve passar.

No terceiro capítulo é apresentada a proposta propriamente dita deste trabalho, o método de pesquisa empregado, tecnologias e desenvolvimento do sistema, detalhamento do roteiro da simulação, algoritmos de busca envolvidos no código do sistema multiagentes, características dos agentes (navios) aplicados na simulação e a interface da aplicação Simulador de Portos.

No quarto capítulo são apresentados os dados reais obtidos para a simulação e dados simulados gerados pela aplicação Simulador de Portos, e consequentemente, uma análise comparativa entre os dados reais e dados simulados.

No quinto capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho, bem como uma proposta de trabalhos futuros.

2 EMBASAMENTO TEÓRICO E APLICADO

2.1 Sistemas Multiagente

Conforme Weiss (1999), um agente é um sistema de computador situado em algum ambiente, e que seja capaz de ação autônoma nesse ambiente, a fim de atingir seus objetivos. Agentes são entidades autônomas que não estão sujeitas à influência de fora do ambiente. Os agentes possuem a capacidade de processar informações, enquanto as compartilham com os demais agentes. Quando um novo agente entra na simulação, suas ações podem ser condicionadas por normas preexistentes, instituídas através de interações anteriores com agentes e que persistiu através do tempo. Essas interações podem ser expressas pela troca de dados entre agentes (Rocha, 2017).

Um agente pode se referir a diferentes componentes, pois os aplicativos têm objetivos diferentes e em diferentes paradigmas. Pode-se ver um agente como parte de um programa (por exemplo, modelo, sistema ou subsistema) ou qualquer tipo de entidade independente (por exemplo, organização ou indivíduos). Cada agente é programado para reagir a outros agentes e ao seu ambiente computacional, com relação às regras de comportamento, desde decisões primitivas de reação até a Inteligência Artificial adaptativa complexa. Segundo Wooldridge (1995), um agente é uma peça de hardware ou um sistema de computador baseado em software que inclui as seguintes propriedades:

- Reatividade, no sentido em que os agentes têm a percepção de seu ambiente e respondem rapidamente às alterações que possam ocorrer;
- Pró-atividade, não se limita a agir em resposta ao meio ambiente, os agentes são capazes de tomar a iniciativa e mostrar comportamento orientado por objetivos;
- Habilidades sociais. Os agentes são capazes de interagir / se comunicar (modelo cognitivo) com outros agentes (e possivelmente humanos) através de uma linguagem, como ACL (*Agent Communication Language*), e estabelecer conexões entre seus objetivos autônomos e o contexto espacial;

Um modelo baseado em agentes também consiste em agentes interagindo dentro de um

meio ambiente. Russell e Norvig (1995) sugerem a seguinte classificação de propriedades do ambiente:

- *Acessível versus inacessível*. Um ambiente acessível é aquele em que o agente pode obter informações completas, precisas e atualizadas sobre o estado do ambiente. A maioria dos ambientes do mundo real (incluindo, por exemplo, o mundo físico cotidiano e a Internet) não é acessível nesse sentido.

- *Determinístico versus não determinístico*. Um ambiente determinístico é aquele em que uma ação tem um único efeito garantido – não há incerteza sobre o estado que resultará da execução de uma ação.

- *Estático versus dinâmico*. Um ambiente estático é aquele que pode ser assumido como permanente inalterado, exceto pelo desempenho das ações do agente. Por outro lado, um ambiente dinâmico é aquele que possui outros processos operando nele, e portanto, muda de maneira além do controle do agente. O mundo físico é um ambiente altamente dinâmico, assim como a Internet.

- *Discreto versus contínuo*. Um ambiente é discreto se houver um valor fixo, finito número de ações e percepções nele.

Uma tipologia é uma classificação por tipos de agentes que possuem atributos em comum. Rocha (2017) propõe uma tipologia de agentes, identificando sete dimensões distintas de classificação:

1. *Mobilidade*. Agentes estáticos ou móveis. Os agentes móveis podem residir na máquina de origem ou temporariamente em outra.

2. *Modelo de raciocínio*. Presença ou não de um tipo de raciocínio simbólico, isto é, um agente pode ser reativo ou puramente deliberativo.

3. *Função do agente*. A principal função assumida pelo agente, como um agente de busca de informações (procurando informações para um determinado usuário na Internet) ou interface (que facilita a interação homem-máquina de um determinado

aplicativo).

4. *Autonomia*. Os agentes operam sem qualquer intervenção direta humana ou de outros agentes, eles têm algum tipo de controle sobre suas ações e estado interno e são capazes de trocar informações com outros agentes. Os agentes não estão sujeitos à influência de agentes externos.

5. *Cooperação*. Realização de ações cooperativas com outros agentes.

6. *Aprendizado*. Inclusão ou não de recursos de aprendizado no agente (individual, evolucionário e social).

7. *Recursos híbridos*. Eles combinam duas ou mais filosofias de comportamento diferentes no mesmo agente.

Um sistema multiagente é definido como uma rede fracamente acoplada de entidades de resolução de problemas (agentes), que trabalham juntos para encontrar respostas para problemas que estão além dos recursos ou conhecimentos individuais de cada entidade (agente) (Rocha, 2017). É um modelo constituído por agrupamento de entidades autônomas de tomadas de decisão chamadas de agentes (Bonabeau, 2002; Adamatti, 2011).

Em Farias (2009), é apresentada uma metodologia de desenvolvimento de SMAs aplicado à região portuária da cidade de São Luís, no estado do Maranhão. Em Velasco (1999), realizou-se um estudo sobre a dinâmica do transporte marítimo mundial e seus reflexos sobre a evolução dos portos, com aplicação de sistemas multiagentes.

2.2 Análise de Redes

Uma rede é um conjunto de itens, denominados de vértices ou de nós, com conexões entre eles, chamadas de arestas. Os exemplos incluem a Internet, redes sociais, redes organizacionais, redes de relações comerciais entre empresas, redes neurais, redes metabólicas, teias alimentares, redes de distribuição, redes de transporte ou rotas de entrega postal e muitos outros (Newman, 2003).

O estudo de redes tem sido principalmente o domínio de um ramo da matemática discreta conhecido como teoria dos grafos. Quando o suíço matemático Leonhard Euler, em 1736, publicou a solução para a ponte Konigsberg, onde o problema era encontrar uma viagem de ida e volta que atravesse cada uma das pontes da cidade prussiana de Königsberg apenas uma vez (Holthoefer, 2011).

O estudo de redes, redes biológicas, sociais, de transportes ou de computadores, é um campo interdisciplinar que recebe contribuições da matemática, física, biologia, ciência da computação, ciências sociais entre outras. Esse estudo tem se beneficiado muito com a ampla gama de perspectivas trazidas por praticantes de diversas disciplinas (Newman, 2010).

Conforme Wasserman (1994), existem vários conceitos-chave no cerne da análise de rede como compreender as ligações entre as entidades e as implicações dessas ligações. As entidades são chamadas de atores. Os atores são unidades distintas, individuais. Os atores podem apresentar-se em grupos e subgrupos. Os atores podem ser também de tipos de níveis diferentes ou de diferentes conjuntos, havendo a possibilidade de classificá-los de acordo com suas propriedades.

Vários sistemas podem ser representados como redes. Se pudermos coletar dados sobre a estrutura de uma rede, eles podem apresentar a forma e função do sistema que representam e quais propriedades da rede pode-se medir ou modelar e como essas características estão relacionadas com as questões práticas (Newman, 2010).

Encontram-se avançados estudos sobre métodos e aplicações da análise de redes do comportamento do transporte de carga pelo modal aquaviário, proporcionando auxílio aos gestores, para obter respostas nas tomadas de decisões e planejamentos mais assertivos como, por exemplo, a escolha de uma melhor roteirização para a navegação marítima com o auxílio da Teoria de Redes (Santos, 2018).

2.3 Geoprocessamento

Geoprocessamento é o processamento informatizado de dados georreferenciados. É todo o pacote de técnicas, metodologias e ferramentas que podem contar com valiosos recursos associados como, aerofotos, imagens orbitais, sistemas de posicionamento por satélites, sistemas de informações geográficas, sensoriamento remoto entre outros e dessa forma, possibilitando a rápida disponibilização das informações coletadas. Geoprocessamento então é um conjunto de tecnologias de coleta, tratamento, manipulação e apresentação de informações espaciais voltados para um

objetivo específico (Silva, 2012).

Segundo Piroli (2010), geoprocessamento consiste no ramo da ciência que estuda o processamento de informações georreferenciadas através de aplicativos (normalmente SIGs - Sistemas de Informação Geográficas), equipamentos (computadores e periféricos) e dados de diversas fontes. Dessa forma, permitir a manipulação, avaliação e geração de cartográficos relacionados a uma localização de informações e para um objetivo.

Geoprocessamento utiliza-se de quatro categorias de técnicas relacionadas ao tratamento da informação espacial (Silva, 2012):

- Técnicas para coleta de informação espacial (cartografia, sensoriamento remoto, GPS, Topografia, convencional, fotogrametria, levantamento de dados alfanuméricos);
- Técnicas de armazenamento de informação espacial (bancos de dados relacionais, não relacionais, orientado a objeto, objeto relacional e geoespaciais);
- Técnicas para tratamento e análise de informação espacial, como Modelagem de dados, geoestatística, funções topológicas, redes; e
- Técnicas para o uso integrado de informação espacial, como os sistemas GIS – *Geographic Information Systems* (SIG em português), LIS – *Land Information Systems*, AM/FM – *Automated Mapping/Facilities Management*, CADD – *Computer-Aided Drafting and Design*.

Um SIG é, fundamentalmente, uma ferramenta para trabalhar com informações georreferenciadas, incluindo diversos elementos tecnológicos para esse fim (Olaya, 2014).

2.4 Portos no Mundo

Nesta seção foram selecionados alguns portos no mundo, onde foi levado em consideração sua modernidade em processos na movimentação portuária, tecnologias e que possuem grande movimentação de carga. Já para os portos brasileiros, foram selecionados dois que possuem grande movimentação de cargas: o porto de Santos, no estado de São Paulo, e o porto do Rio Grande, no estado do Rio Grande do Sul. Este último será utilizado como estudo de caso do trabalho e será apresentado em detalhes.

2.4.1 Porto de Xangai

A cidade de Xangai é a cidade mais populosa da China, o porto de Xangai é o segundo porto mais movimentado do mundo e uma das maiores cidades do mundo em área. Localizado na foz do rio Yangtze, no leste da China, próximo ao Mar da China Oriental. A cidade de Xangai, onde encontra-se o porto de Xangai, é o principal centro comercial e financeiro da China conforme as Figuras 2.1 e 2.2. O porto de Xangai rivaliza com o porto de Hong Kong como o coração econômico do subcontinente chinês, mas Xangai tem laços mais fortes com o continente e com o governo central. A cidade de Xangai também possui uma base mais sólida nos setores de manufatura e tecnologia, refletindo esses setores nos serviços do porto de Xangai. Em 1991, houve no porto de Xangai importantes ampliações. Isso começou a era atual de crescimentos econômicos e de construção, conforme (World Port Source, 2020).



Figura 2.1 – Localização do Porto de Xangai. Fonte: OpenStreetMap. Disponível em: <https://www.openstreetmap.org/>. Acessado em: abr/2020.



Figura 2.2 – Porto de Xangai na foz do rio Yangtze. Fonte: OpenStreetMap. Disponível em: <https://www.openstreetmap.org/>. Acessado em: abr/2020.

A *Shanghai International Port* (Group) *Company Limited* (SIPG)[1] é a única operadora dos terminais públicos no porto de Xangai. O SIPG foi incorporado em 2003, quando a antiga Autoridade Portuária de Xangai foi reorganizada. Em 2006, a SIPG tornou-se uma companhia limitada com participação acionária cujos principais acionistas incluem o governo municipal de Xangai, a *China International Terminals Company Limited* e a *Shanghai Tongsheng Investment Group Corporation*. A *Shanghai State-Assets Operation Company* e a *Shanghai Dasheng Assets Company* são acionistas minoritários no SIPG do porto de Xangai, conforme (Port of Shanghai, 2020).

O SIPG do porto de Xangai é responsável pela:

- Movimentação de carga;
- Transporte de cargas domésticas e internacionais por terra e água;
- Descarte, manutenção, fabricação e locação de contêineres;
- Gerenciamento de informações sobre armazenagem, processamento, distribuição e logística portuária;
- Fornecimento de instalações para passageiros internacionais;
- Embarcações de pilotagem e reboque;

[1] *Shanghai International Port* (Group) *Company Limited* (SIPG). Disponível em: <http://www.portshanghai.com.cn/en/>. Acessado em: abr/2020.

- Encaminhamento de frete;
- Prestação de serviços no porto;
- Equipamentos e instalações portuárias de leasing;
- Construção, gerenciamento e operação de instalações portuárias e terminais.

O SIPG opera 125 berços no porto de Xangai, com um comprimento total de cais de cerca de 20 quilômetros. Do total, 82 berços do porto de Xangai podem acomodar navios de 10 mil DWT ou acima. A SIPG possui terminais públicos de granel, *breakbulk* (carga a granel ou carga geral), *roll-on/roll-off* especializado e cruzeiros no porto de Xangai. Opera um total de 293 mil metros quadrados de armazéns e mais de 4,7 milhões de metros quadrados de pátios de armazenamento. Também possui 5.143 unidades de equipamentos de movimentação de carga. O porto de Xangai ocupa uma localização geográfica invejável, goza de condições naturais quase ideais, possui amplas instalações e infraestrutura de distribuição. O delta do rio Yangtze contém uma coleção de algumas das cidades economicamente mais ativas da China. A estratégia do porto de Xangai tem como objetivo desenvolver operações de transbordo de navio a navio, estabelecer o porto de Xangai como um centro de expedição internacional e desenvolver rapidamente o SIPG. A estratégia envolve focar as funções e serviços do porto de Xangai fornecidos pelo porto de águas profundas Yanghsan e as áreas portuárias Waigaoqiao e Wusongkou para aumentar a eficiência, estabelecer um sistema de barcaças eficaz e integrar as operações portuárias. O SIPG desenvolverá uma rede de alimentadores públicos de coleta de carga no porto de Xangai para a região do nordeste da Ásia e desenvolverá conexões perfeitas entre o Yangtze e o transbordo costeiro e internacional. O tema do esforço de marketing é o conceito de "O porto de Xangai, sua melhor escolha", conforme (Port of Shanghai, 2020).

2.4.2 Porto de Singapura

O porto de Singapura é o centro de transbordo de contêineres mais movimentado e o maior porto de propriedade pública do mundo. Localizado no extremo sul da Península Malaia, a 30 km a sudoeste do Porto de Johor, na Malásia conforme Figura 2.3. O Porto de Singapura oferece conectividade a mais de 600 portos em 123 países. A MPA – *Maritime and Port Authority of Singapore*[2] possui e é responsável pelo crescimento e desenvolvimento do porto. O porto

[2] MPA - *Maritime and Port Authority of Singapore*. Disponível em:

movimentou 37,2 milhões de unidades equivalentes de vinte pés (TEUs) de contêineres e 626,2 milhões de toneladas de carga em 2019. Atrai aproximadamente 130.000 chamadas de navios por ano, em média atualmente. O porto passou por um projeto de US $3,5 bilhões no terminal *Pasir Panjang* para adicionar 15 Mega berços de contêineres, que foram concluídos em junho de 2015. O terminal é capaz de lidar com navios porta-contêineres de 130.000 TEUs ou mais, Figura 2.4.

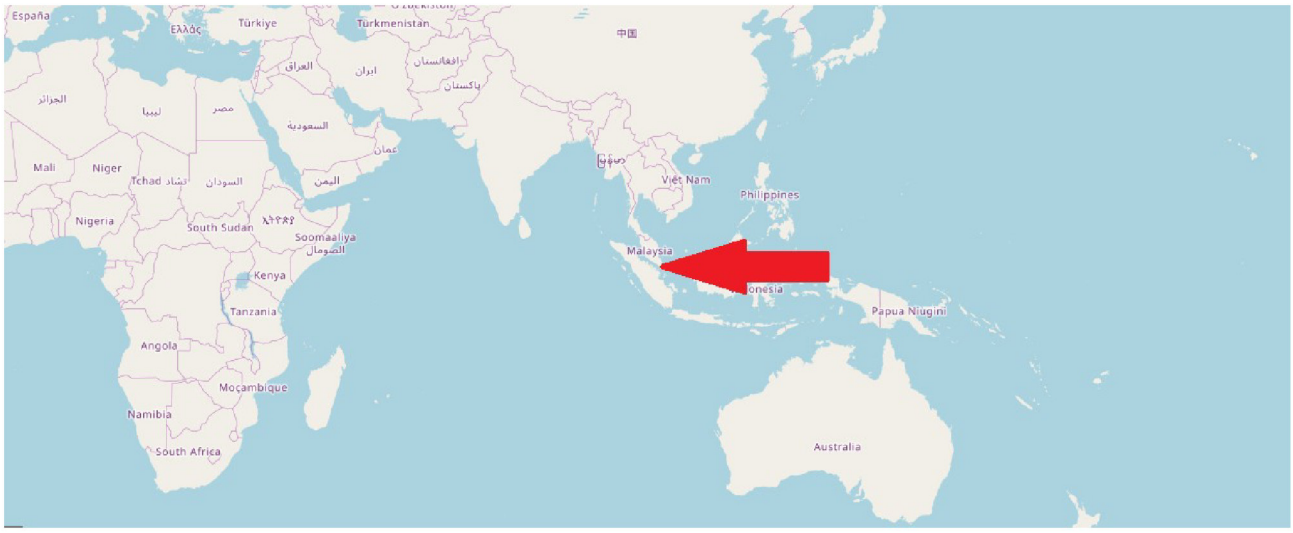


Figura 2.3 – Localização do porto de Singapura. Fonte: OpenStreetMap. Disponível em: <https://www.openstreetmap.org/>. Acessado em: abr/2020.

<https://www.mpa.gov.sg/web/portal/home>. Acessado em: abr/2020.

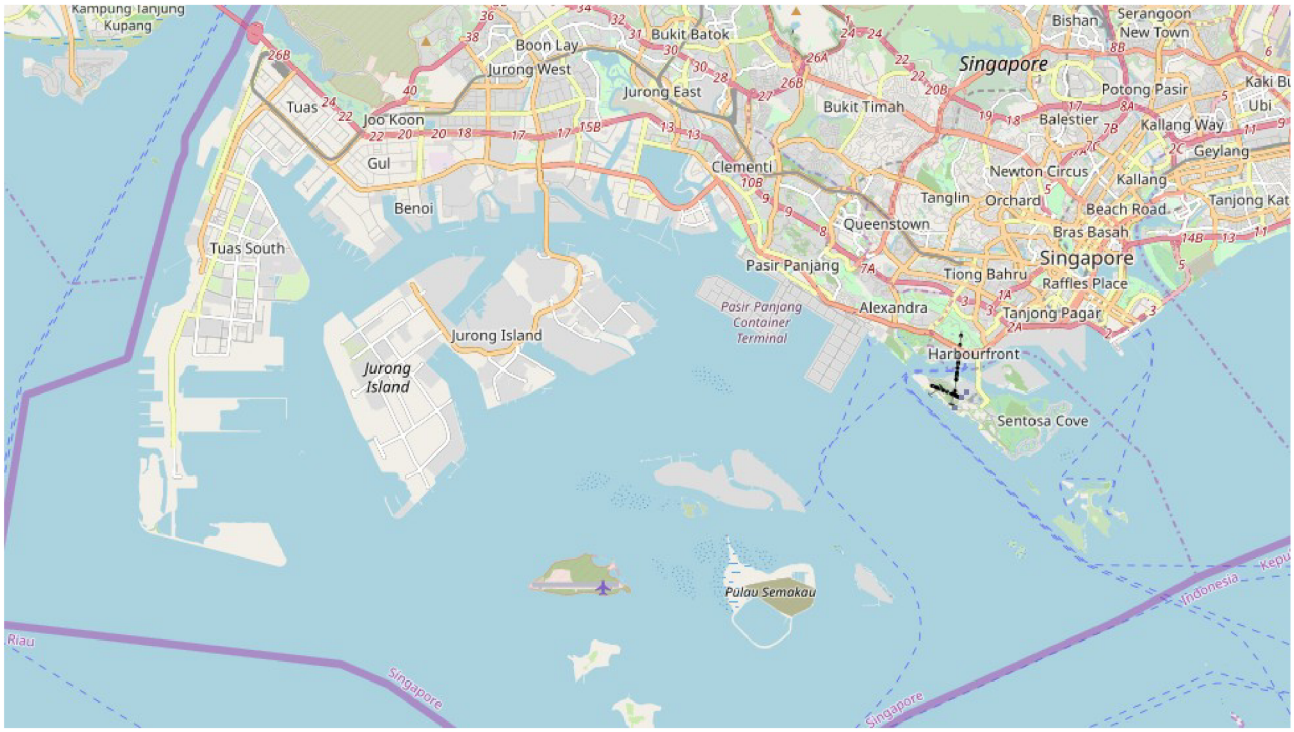


Figura 2.4 – Porto de Singapura. Fonte: OpenStreetMap. Disponível em: <https://www.openstreetmap.org/>. Acessado em: abr/2020.

Um grande terminal automatizado de contêineres, chamado Tuas Port, está atualmente em construção no porto e terá capacidade para lidar com 65 milhões de TEUs após a conclusão em 2040. Espera-se que o porto de Tuas seja o maior terminal automatizado do mundo quando concluído. O porto de Tuas terá tecnologias inovadoras, como automação de pátio e veículos guiados automatizados totalmente elétricos. Todos os terminais de contêineres de Singapura existentes serão fundidos e realocados com o terminal de Tuas, após sua conclusão (MPA, 2020).

O porto de Singapura oferece uma gama de serviços para fretes a granel e cargas especializadas. As instalações e serviços permitem que o porto manuseie contêineres e carga, incluindo carga a granel. Os armazéns e espaços de pátio aberto são utilizados para armazenamento, embalagem, consolidação e distribuição de carga. Aproximadamente 80% dos contêineres que chegam a Singapura são transbordados para outros portos. O porto de Singapura possui terminais convencionais e de finalidade específica para lidar com produtos de petróleo e gás natural, além de produtos de cimento e aço. Também possui um terminal de automóveis dedicado, que é um dos principais centros de transbordo automotivo da região (MPA, 2020).

As instalações do porto de Singapura incluem terminais de contêineres, berços, guindastes, instalações de armazenamento, um sistema de transporte intermodal. O porto de Singapura possui

terminais em *Brani, Keppel, Tanjong Pagar, Pasir Panjang, Jurong* e *Sembawang*. Os terminais podem lidar com cargueiros, navios *RO-RO* (navios de operação por rolamento *Roll-On/Roll-Off*), graneleiros e navios porta-contêineres. *Brani, Keppel* e *Tanjong Pagar* estão planejados para serem transferidos para o Porto de Tuas até 2027, seguidos pelos terminais *Pasir Panjang* até 2040. As áreas de ancoragem no porto incluem o Setor Leste, o Setor Jurong e o Setor Oeste. As áreas de desembarque público, *West Coast Pier*, *Marina South Pier* e *Changi Point Ferry Terminal*, têm restaurantes, lojas, serviços de imigração e balsa (MPA, 2020).

A *PSA International Pte Ltd*[3] é uma das maiores operadoras portuárias do mundo, opera os principais terminais do porto por meio de seu terminal principal *PSA Singapore Terminals*. Os quatro terminais de contêineres, *Brani, Keppel, Tanjong Pagar, Pasir Panjang* e um terminal multiuso, *Sembawang*, são operados exclusivamente pelos Terminais da PSA em Singapura. Um terminal, *Jurong*, é operado pelo Porto de Jurong, que lida principalmente com aço, cimento e escória de cobre. A Autoridade Portuária Marítima de Singapura cuida das funções regulatórias (MPA, 2020).

O porto está equipado com 204 guindastes de cais e guindastes de pórtico que podem lidar com navios maiores, como navios da classe UASC A7 (classe contêiner). Cada operador pode lidar com seis guindastes com a ajuda de guindastes de ponte com controle remoto. Os guindastes de cais têm capacidade de elevação dupla e podem alcançar 22 linhas de contêineres. O porto também opera guindastes portuários móveis para lidar com cargas pesadas (MPA, 2020).

2.4.3 Porto de Roterdã

O porto de Roterdã é um dos maiores e mais antigos portos da Europa, Figuras 2.5 e 2.6. Foi o porto mais movimentado do mundo entre 1962 e 1986, agora foi ofuscado por portos asiáticos como Singapura e Xangai. O porto de Roterdã é considerado um ponto de distribuição estrategicamente importante na Europa, pois é cercado pelos centros industrializados e altamente populosos da Europa – o distrito alemão do Ruhr, Paris e Londres. O porto e a área industrial de Roterdã são gerenciados e operados pela Autoridade do Porto de Roterdã (PoRA[4]). É uma sociedade anônima de capital aberto, com ações detidas pelo Município de Roterdã (75%) e pelo Estado Holandês (25%). A autoridade portuária é responsável pelo tráfego marítimo e pelo desenvolvimento de infraestrutura pública, áreas portuárias existentes e novos locais portuários. O

---

3 PSA *International Pte Ltd*. Disponível em: <https://www.globalpsa.com/>. Acessado em: abr/2020.

4 Porto de Roterdã. Disponível em: <https://www.portofrotterdam.com/en>. Acessado em: abr/2020.

principal objetivo da empresa é fortalecer a posição competitiva do porto em termos de tamanho e qualidade. Em 2009, a autoridade portuária investiu 34 milhões de euros, enquanto o volume de negócios foi de cerca de 500 milhões de euros. A empresa possui cerca de 1.200 funcionários. O porto de Roterdã ocupa 10.500 ha, com instalações industriais cobrindo uma área de 5.300 ha, e infraestrutura e superfície da água cobrindo a área restante. O comprimento do porto é de 40 km, enquanto o comprimento do cais é de 89 km. O porto também inclui 1.500 km de gasodutos. O porto de Waal, em Roterdã, construído entre 1906 e 1930, é um dos maiores portos dragados do mundo. O território portuário do porto foi ampliado com a construção do complexo Europort ao longo da foz do Nieuwe Waterweg. A construção do porto de Maasvlakte 2 foi concluída em 2008, pois o porto existente ficou sem espaço em 2014. O contrato para a construção do primeiro local de Maasvlakte 2 foi concedido a um consórcio contratante PUMA (Projeto *Uitbreiding Maasvlakte*). O consórcio é composto por *Koninklijke Boskalis Westminster* e *Van Oord*. O consórcio também foi responsável pela manutenção dos paredões por cinco anos. A Autoridade do Porto de Roterdã financiou o Maasvlakte 2. O porto de Roterdã possui capacidade de armazenamento de tanques de mais de 30 metros cúbicos, capacidade de armazenamento de petróleo bruto de 12 metros cúbicos e capacidade de armazenamento de produtos de óleo mineral de 6,7 metros cúbicos. Também facilita o armazenamento independente de produtos de óleo mineral, produtos químicos e óleos e gorduras vegetais. O porto inclui 122 molhes e possui seis barcos-piloto e 29 rebocadores. Existem mais de 90 terminais, 35 reservados para granéis líquidos, 15 para granéis secos e 17 para uso multiuso. O porto possui nove terminais de contêineres para lidar com o transporte marítimo de curta distância, alto-mar e interior. Outros terminais do porto incluem sete roll-on/roll-off, dois terminais de frutas e um para aço e papel, carros e navios de cruzeiro. O porto também possui um hospital único, com acomodações especiais para marinheiros de todas as nacionalidades (Porto de Roterdã, 2020).

O equipamento de manuseio de carga no porto de Roterdã inclui dez guindastes, 12 guindastes de contêineres, 22 guindastes granel de navio para terra, 25 guindastes flutuantes, 103 guindastes de pórtico para contêineres e 162 guindastes multifuncionais. O porto possui três estaleiros, sete docas flutuantes e uma rampa de lançamento para embarcações do interior (Porto de Roterdã, 2020).

O PoRA planejou investir cerca de € 25 milhões para desenvolver um local de cinco hectares para acomodar a futura expansão do Terminal de Tanques de Botlek. Cerca de 600.000 m³ de areia serão preenchidos no canto sudoeste da doca de Botlek (Porto de Roterdã, 2020).

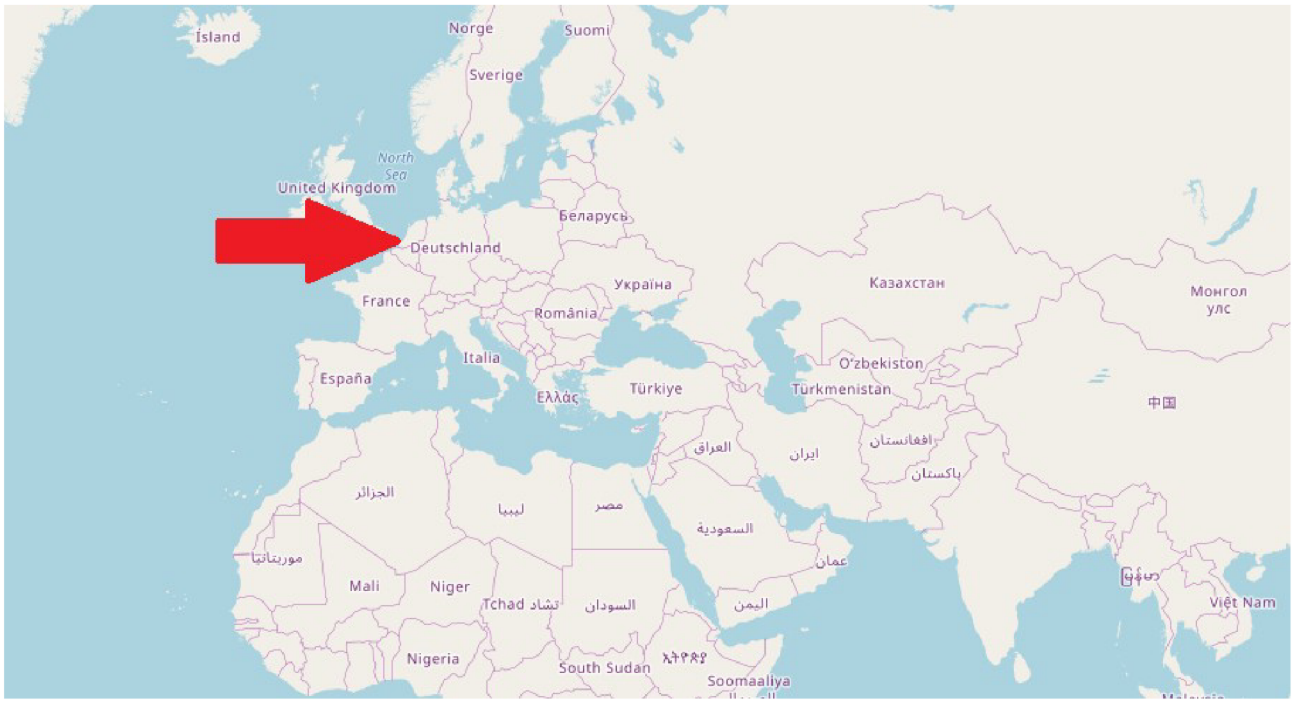


Figura 2.5 – Localização do porto de Roterdã. Fonte: OpenStreetMap. Disponível em: <https://www.openstreetmap.org/>. Acessado em: abr/2020.

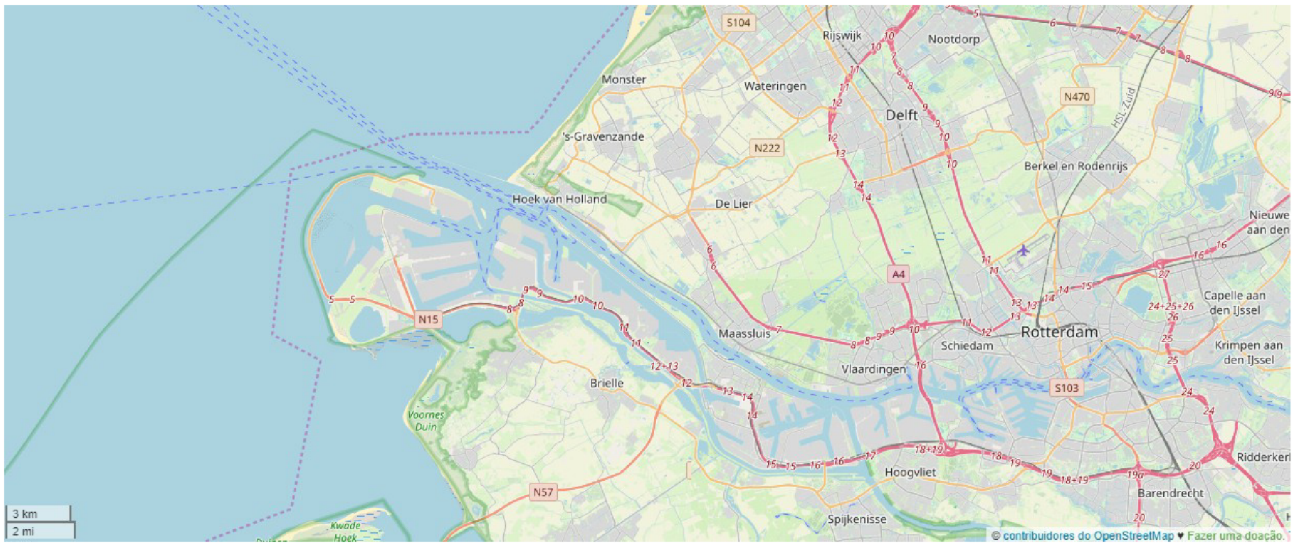


Figura 2.6 – Porto de Roterdã. Fonte: OpenStreetMap. Disponível em: <https://www.openstreetmap.org/>. Acessado em: abr/2020.

2.4.4 Porto de Santos

O porto de Santos é o maior complexo portuário da América Latina e responde pela movimentação de quase um terço das trocas comerciais brasileiras. Encontra-se localizado

estrategicamente, a 70 km do maior centro produtor e consumidor da América Latina, a cidade de São Paulo, onde desfruta de uma ampla rede de infraestrutura de transportes que viabiliza a movimentação anual de milhões de toneladas de bens e mercadorias (SPA, 2020). Algumas características:

- O porto de Santos possui 770 ha;
- 13 km de extensão;
- 61 berços de atracação;
- 850 mil m3 de tanques para derivados químicos;
- 1,3 M toneladas de silos para açúcar, grãos, farelos e fertilizantes.



Figura 2.7 – Localização do porto de Santos. Fonte: OpenStreetMap. Disponível em: <https://www.openstreetmap.org/>. Acessado em: abr/2020.

Conforme SPA (2020), um estudo de aumento de calado foi feito para o porto de Santos, permitindo 14 metros na baixa-mar e de 15 metros na preamar. Essa mudança possibilitará uma redução no tempo de espera dos navios na área de fundeio de um aumento médio de cerca de 3 horas na janela de operação do porto. Maior agilidade no uso do canal de navegação e ganhos significativos para todos. Atualmente, portos relevantes no comércio marítimo mundial como Lisboa, Montreal, Port Hedland, Fremantle, Newcastle e Melbourne, dentre outros, já utilizam a

ferramenta Dynamic Under Keel Clearance (DUKC)[5] para se mitigar os riscos de se operar com um calado maior (Figura 2.8).

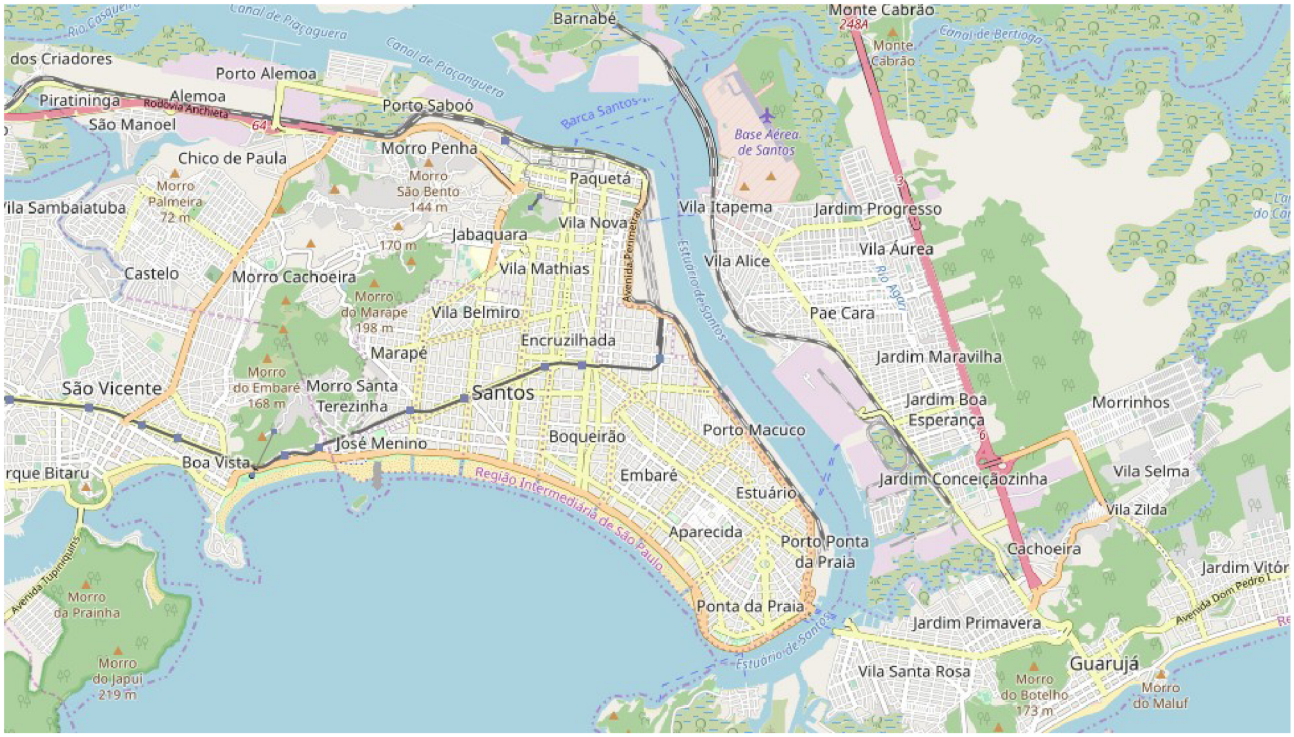


Figura 2.8 – Porto de Santos. Fonte: OpenStreetMap. Disponível em: <https://www.openstreetmap.org/>. Acessado em: abr/2020.

2.4.5 Porto do Rio Grande

O complexo portuário do Rio Grande é constituído pelo Porto Velho, Porto Novo, Superporto e Porto de São José do Norte. Com uma forte atuação no extremo sul do Brasil, encontra-se entre os maiores importantes do continente americano em produtividade (SUPRG, 2020).

Conforme Figura 2.9, o Superporto da cidade do Rio Grande localiza-se no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. Um dos 5 portos hubs, o Superporto do Rio Grande dispõe de uma área de expansão junto ao canal de acesso ao porto, onde estão localizados os terminais especializados para granéis sólidos, granéis líquidos e contêineres, com profundidade variável de 11 a 14 metros. Com extensão de 10 km paralelos ao canal do Rio Grande e ocupa uma área de 1.868 ha junto ao Distrito

5 *Dynamic Under Keel Clearance* (DUKC) Disponível em: <https://omcinternational.com/products/dukc-series-5/>. Acessado em: abr/2020.

Industrial (SUPRG, 2020).

O Complexo portuário do Rio Grande que além do Superporto inclui o porto Velho, o porto Novo, e o porto da cidade de São José do Norte possuem um bom sistema rodoferroviário. O porto Novo e o Superporto se interligam a todas as regiões do Estado do Rio Grande do Sul, pela malha rodoferroviária e pelo sistema navegável da Laguna dos Patos e Lagoa Mirim, com seus rios tributários. Através das cidades fronteiriças de Chuí - Chuy, Jaguarão - Rio Branco, Santana do Livramento - Rivera, o sistema rodoviário do Estado se interliga com o do vizinho país Uruguai, além da ligação ferroviária Santana do Livramento - Rivera. Com a Argentina, a ligação do modal rodoviário se faz por Uruguaiana - Paso de los Libres e São Borja - Santo Tomé, e do modal ferroviário por Uruguaiana - Paso de los Libres. Com os demais Estados do Brasil, o porto está interligado através de Santa Catarina, pelas BRs 116, 101 e 153, e pelas ligações ferroviárias de Marcelino Ramos e Vacaria. Todas as rodovias que chegam ao Porto do Rio Grande tem pavimentação asfáltica e boa conservação. Os ramais ferroviários, possuem todas bitolas métricas. O acesso lacustre, através da Laguna dos Patos, possui profundidade de 6 metros (SUPRG, 2020).



Figura 2.9 – Localização do porto do Rio Grande. Fonte: OpenStreetMap. Disponível em: <https://www.openstreetmap.org/>. Acessado em: abr/2020.

O Superporto está situado dentro do complexo industrial-portuário da cidade do Rio Grande, conforme Figura 2.10. Também existem: o Porto Velho, o Porto Novo e o Porto de São José do Norte (SUPRG, 2020).

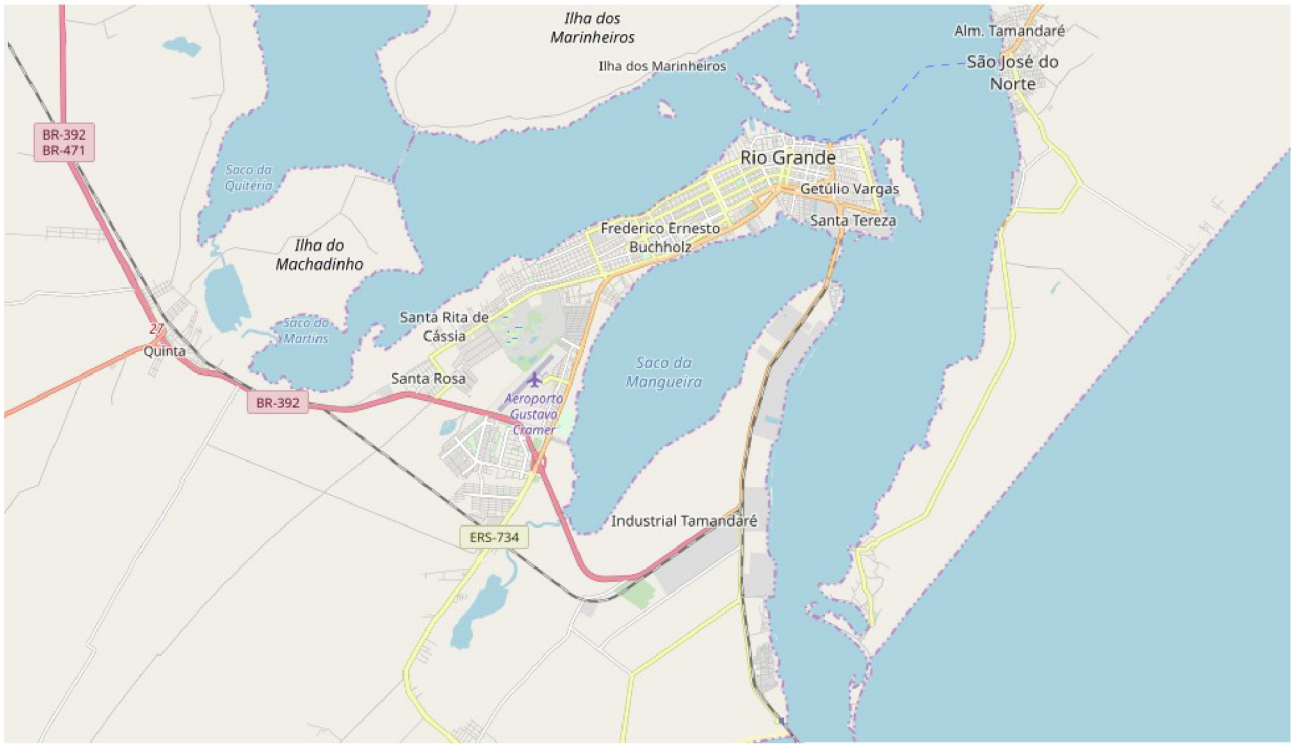


Figura 2.10 – Porto do Rio Grande. Fonte: OpenStreetMap. Disponível em: <https://www.openstreetmap.org/>. Acessado em: abr/2020.

Os produtos que passam pelo Superporto provêm dos seguintes complexos industriais existentes hoje na economia do estado do Rio Grande do Sul: o Complexo Agroindustrial (fumo, arroz, carnes, frangos, pescados e soja); o Complexo Químico (produtos petroquímicos, combustíveis, tanino, borracha sintética e fertilizantes); o Complexo Metalmecânico (autopeças, cutelaria, implementos agrícolas e máquinas agrícolas); o Complexo Têxtil e Calçados (tecidos, lã sintética, calçados e couros); o Complexo Papel e Gráfica (papel e celulose); e o Complexo da Construção Civil (blocos de pedras e pedras semipreciosas) (LabTrans, 2013).

O segmento industrial sediado hoje na cidade do Rio Grande está diretamente ligado à expansão das atividades de dois importantíssimos complexos industriais para a economia do estado do Rio Grande do Sul: o complexo agroindustrial de um lado, e o complexo químico de outro, este

último fornecendo insumos (fertilizantes) ao primeiro (LabTrans, 2013).

O complexo portuário do Rio Grande é dividido nos terminais portuários: Porto Novo, BRASKEM, Terminal Petroleiro, YARA Adubos Trevo, Terminal de Granéis, Estaleiro Rio Grande, BUNGE – Terminal de Granéis, BIANCHINI – Terminal de Granéis, TERGRASA – Terminal de Granéis, TERMASA – Terminal de Granéis, TECON – Terminal de Containers, Terminal Leal Santos Alimentos, Terminal da Marinha e Porto São José do Norte (SUPRG, 2020).



Figura 2.11 – Terminais portuários do porto do Rio Grande. Fonte: Adaptado da (SUPRG, 2017).

Para os navios trafegarem nos canais de acesso, é necessário respeitar suas larguras, extensões, calado operacional, profundidade e velocidade máxima (SUPRG, 2017).

DADOS GERAIS DO CANAL DE ACESSO					
Local	**Largura do canal (m)**	**Extensão (milhas náuticas)**	**Calado Operacional (pés)**	**Profundidade (m)**	**Velocidade Máxima (nós)**
Barra	230	9	42	14	8
Superporto	230	5	42	14	8
Porto Novo	200	2	31	10,5	5
Porto Velho	100	2	15	5	5

Tabela 2.1 – Dados Gerais do Canal de Acesso Marítimo ao Porto do Rio Grande. Fonte: SUPRG (2017). Fonte: autor.

Conforme ANTAQ, bacia de evolução é um local no espaço aquático nas proximidades do cais, dotado de dimensão e profundidades adequadas, para manobrar as embarcações. No Porto do Rio Grande existem quatro bacias de evolução, que são destinadas para as manobras efetuadas pelas embarcações que navegam em seus canais (CPRS, 2021).

DADOS GERAIS DAS BACIAS DE EVOLUÇÃO	
1. Bacia de Manobra do Porto Velho	
Localização	Área fronteira ao cais
Calado	15 pés
Restrição ao giro de manobra	Navios de até 100 metros de comprimento
2. Bacia de Manobra do Porto Novo	
Localização	Área fronteira ao cais
Calado	31 pés
Restrição ao giro de manobra	Navios de até 150 metros de comprimento
3. Bacia de Manobra do Superporto nº1	
Localização	Entre terminais da COPESUL e YARA
Calado	42 pés
Restrição ao giro de manobra	Sem restrições
4. Bacia de Manobra do Superporto nº2	
Localização	Entre terminais da Bunge e TECON
Calado	42 pés
Restrição ao giro de manobra	Sem restrições

Tabela 2.2 – Dados gerais das bacias de evolução do porto do Rio Grande. Fonte: SUPRG (2017).



Figura 2.12 – Localização das bacias de evolução do porto do Rio Grande. Fonte: Adaptado da CPRS (2021).

O porto do Rio Grande possui 7 áreas de fundeio, com o objetivo de facilitar a administração do canal. Na Figura 2.12 estão delimitadas as áreas de fundeio do porto do Rio Grande, SUPRG (2017).



Figura 2.13 – Localização das áreas de fundeio do porto do Rio Grande. Fonte: Adaptado da CPRS (2021).

2.5 Fluxo do Processo de Chegada/Saída de Navios em um Porto

De forma a mostrar o fluxo de processo de chegada e de saída de navios em um porto, foi realizado diversos encontros com pessoas da Superintendência do Porto do Rio Grande (SUPRG), análise e estudo da modelagem para o complexo portuário do Rio Grande. Desta forma, uma empresa interessada em carregar ou descarregar mercadorias no Superporto do Rio Grande por exemplo, deve passar por um fluxo, envolvendo etapas, conforme regras estabelecidas pelo Conselho de Autoridade Portuária do Porto do Rio Grande (CAP/RG), pertencente à SUPRG. Abaixo um resumo desse fluxo, conforme Figura 2.14, onde é permitido a utilização para demais portos, substituindo apenas a oringem/destino e coordenação portuária (CAP/RG, 2009, NORMAM-08/DPC, 2013 e NORMAM-01/DPC, 2005):

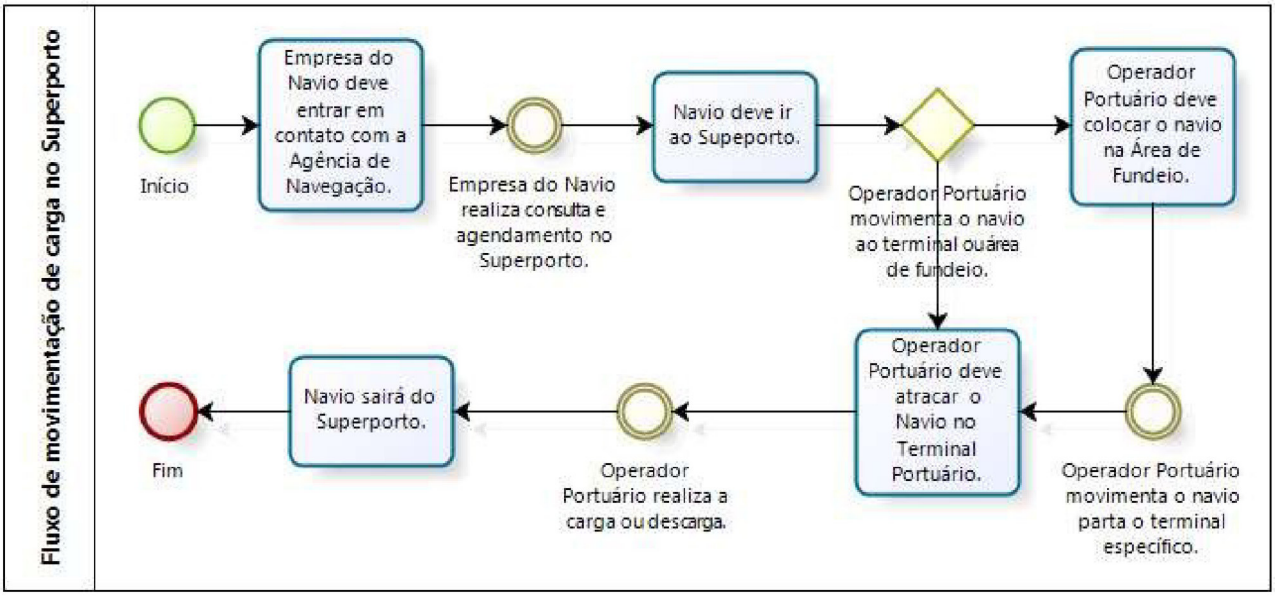


Figura 2.14 – Fluxo da movimentação de carga do porto do Rio Grande. Fonte: CAP/RG, 2009.

1. Para a empresa solicitante enviar o navio ao Superporto, é necessário entrar em

contato com alguma Agência de Navegação credenciada na SUPRG. Será essa agência que intermediará o agendamento do navio no Superporto. Alguns dos dados que a agência solicita e que serão repassados para a SUPRG e para o terminal público ou privado são: comprimento do navio, tonelagem de porte bruto, tonelagem de registro líquido, calado do navio, passageiros embarcados ou a desembarcar, mercadoria, data e hora de atracamento, qual terminal e berço, se a mercadoria é inflamável ou de alto risco ambiental, entre outras informações.

2. A empresa escolhe uma Operadora Portuária credenciada na SUPRG para a realização do serviço de atracamento, desatracamento, envio à área de fundeio e movimentação de carga do navio (carregar e/ou descarregar).
3. A Agência de Navegação realiza o agendamento na SUPRG e no terminal desejado.
4. A empresa do navio providencia o pagamento das taxas de serviços da Agência de Navegação, de utilização do Superporto, de terminal portuário e da Operadora Portuária.
5. Quando o navio chega na foz da Laguna dos Patos, em mar aberto, aguarda o funcionário prático da operadora portuária assumir o comando do navio que será levado para a área de fundeio ou atracado no terminal agendado.
6. O navio recebe auxílio de rebocadores da operadora portuária quando necessário.
7. Os papéis da alfândega são providenciados, bem como as taxas de utilização do porto e terminal.
8. A operadora portuária realiza a movimentação de carga no navio.
9. Após a conclusão da movimentação de carga, o navio é levado novamente pelo prático para fora da área do canal do porto e o comandante do navio assume o comando, finalizando o fluxo de movimentação de carga no Superporto.

Conforme SUPRG (2017), a navegação pelo canal de acesso também pode ser noturna, já que a sinalização náutica do porto. O período de funcionamento é ininterrupto, pois a Praticagem de Rio Grande presta seus serviços de forma contínua.

As rotas definidas na simulação foram baseadas pela carta náutica, regras portuárias e de praticagem NORMAM-12/DPC, 2011.

2.5.1 Aplicação das regras e fluxos em sistemas multiagente

Foram selecionadas Regras do Conselho de Autoridade Portuária do Porto do Rio Grande[6] (CAP/RG), de 18 de agosto de 2009, que devem ser seguidas pelo sistema multiagente proposto. Estas regras influenciam na simulação, bem como no entendimento do fluxo de todo o trabalho de movimentação de carga no porto (CAP/RG, 2009 e NPCP-RS, 2020). São elas:

1. O horário de trabalho dos terminais privados será fixado pela direção do Terminal (Art.7).
2. É vedado às embarcações fundeadas ou atracadas nos trechos de cais do Porto Velho, Porto Novo e Terminais Portuários, efetuarem manutenção nas máquinas que as impeçam de se movimentar, salvo em situações especiais, previamente autorizadas pela Administração do Porto ou do Terminal Privado, ouvida a Autoridade Marítima (Art. 13).
3. As áreas de espera, destinadas às embarcações que chegam ao Porto do Rio Grande, as quais aguardam autorização de fundeio nas áreas internas ou atracação em cais determinado, localizam-se em águas seguras fora da barra. As embarcações procedentes dos portos de Porto Alegre e Pelotas, bem como as embarcações da Navegação Interior, poderão fundear para espera em áreas determinadas no presente Regulamento, mediante autorização da Administração do porto, ouvida a Autoridade Marítima. (Art. 16).
4. As agências de navegação deverão encaminhar com antecedência à Administração do Porto, o "Aviso de Chegada" da embarcação, com a data estimada e as possíveis operações de carga e/ou descargas previstas (Art. 24). Algumas agências de navegação vinculadas ao Porto do Rio Grande: Agência Marítima Orion Ltda., Solaris Agenciamento Marítimo Ltda e Intermarsul Agência Marítima Ltda.
5. Com antecedência mínima de 24 horas da chegada prevista das embarcações de cabotagem e longo curso ao porto, as agências de navegação deverão encaminhar à Administração do Porto correspondência confirmando o dia e hora de chegada e anexando cópia eletrônica do manifesto, relação de embarcadores, características da embarcação, tais como: comprimento, tonelada de porte bruto, tonelada de registro líquido, calado, passageiros a embarcar ou desembarcar, se houver plano de carga e pedido de prioridade de atracação,

[6] Superintendência do porto do Rio Grande. Disponível em: <http://www.portosrs.com.br/>. Acessado em: abr/2020.

declarando as justificativas e os berços possíveis de operar, em face de necessidade de uso de equipamentos especiais, bem como atender os requisitos das normas do ISPS Code[7] (Art. 25).

6. Os pedidos de atracação e a definição das prioridades serão examinados e julgados nas reuniões de programação que são realizadas diariamente na Administração do Porto (Art. 26).

7. No caso de incêndio a bordo, as embarcações deverão desatracar imediatamente do cais, rumando para a margem oposta do canal, onde fundearão para combate ao fogo (Art. 31).

8. A atuação do Operador Portuário compreende a direção e coordenação de todas as atividades inerentes à movimentação de mercadorias, além dos serviços de conserto de carga, conferência e vigilância das embarcações (Art. 58).

9. As mercadorias em trânsito são incluídas na quantidade de movimentação de carga da Simulação, conforme Art. 91. É considerada mercadoria em trânsito:

    a. A descarregada em Porto que não o manifestado, para posterior embarque ao seu destino;

    b. A descarregada em Porto que não o manifestado com posterior transporte por via terrestre ou aquaviário para o seu destino, com utilização do Documento de Trânsito Aduaneiro - DTA;

    c. A destinada a País que mantenha convênio com o Brasil, descarregada para posterior transporte por via terrestre ou aquaviário e vice-versa.

2.6 Trabalhos Relacionados

Esta seção apresenta alguns trabalhos que tentam relacionar as áreas de sistemas multiagente, geoprocessamento, gerenciamento e simulação de fluxo portuário e análise de redes. O

[7] IMO - *International Maritime Organization*. Disponível em: <http://www.imo.org/en/About/Pages/FAQs.aspx>. Acessado em: abr/2020.

trabalho de Abreu (2012) trata sobre as mudanças na cobertura e no uso da terra, através de uma modelagem que contribua para a investigação de cenários ambientais mais favoráveis no uso da terra. O trabalho propõe uma ferramenta de simulação computacional denominada MASE[8]. Trata-se de um sistema multiagente para simulação ambiental. A contribuição do trabalho de Abreu (2012) está na abordagem de sistemas multiagente desenvolvido em *Java Agent DEvelopment Framework* (JADE[9]), permitirem representar os processos de transformação do uso e cobertura da terra por meio de agentes autônomos com comportamentos heterogêneos, que competem e interagem entre si e com o ambiente. Ambiente obtido através de imagens de satélites de sensoriamento remoto. Os resultados obtidos foram muito positivos, com boa representação espacial, representando dessa forma, mais uma contribuição. A aderência deste trabalho está na utilização do framework Java JADE e imagens de satélites de sensoriamento remoto.

Em Grigoletti (2007) um aspecto pouco explorado, porém muito importante, é a modelagem e representação do ambiente em que os agentes estão situados e através de que forma irão interagir. O geoprocessamento sempre representou os fenômenos espaciais de forma estática, mesmo sabendo que alguns fenômenos espaciais são dinâmicos e as representações estáticas não os capturam de forma adequada. Esse trabalho contribui com uma arquitetura baseada em sistemas multiagente, para a criação e execução de simulações na área de geoprocessamento. Essa arquitetura permite a representação de fenômenos espaço-temporais dinâmicos, uma necessidade da área de geoprocessamento. Neste trabalho é apresentado o protótipo implementado, no qual foram realizados estudos de caso de diferentes cenários, objetivando avaliar e demonstrar o uso das funcionalidades desenvolvidas. A contribuição deste trabalho está na implementação de um protótipo de SMA com geoprocessamento.

Em Araújo Júnior (2016), o trabalho propõe implementar um sistema multiagente em ambiente georreferencial, para determinação do dimensionamento de frotas de transporte florestal. O modelo proposto considera a utilização do mapeamento de plantios (talhões) e estradas florestais, além de informações acerca das capacidades de transporte de diferentes veículos. Para a implementação do sistema, utilizou-se linguagem de programação Java[10] associada a biblioteca LPSolve[11], para cálculos de otimização, o framework JADE para desenvolvimento dos agentes, e ao

---

8 MASE - Ferramenta de SMA, Abreu (2012).

9 *Java Agent DEvelopment Framework*. Disponível em: <https://jade.tilab.com/> Acessado em: abr/2020.

10 Java | Oralce Disponível em: <https://www.java.com/> Acessado em: abr/2020.

11 LPSolve Disponível em: <http://lpsolve.sourceforge.net/5.5/> Acessado em abr/2020.

ArcGis[12] para determinação das rotas ótimas de transporte. Foram modelados 5 agentes: agente transportador, que representa os veículos de transporte, agente controlador que faz o gerenciamento do sistema, agente roteador que calcula as rotas entre talhões e pátio de estocagem, agente carregador que realiza o controle do carregamento da madeira e agente descarregador responsável por receber a madeira no pátio de estocagem. O modelo permite identificar a quantidade de caminhões, dentre os veículos disponíveis. Esse trabalho contribui com a aplicabilidade de uma solução de um sistema multiagente, com a utilização do framework JADE sobre imagens georreferenciadas.

Em Siegel (2011b) apresenta uma análise da movimentação de cargas em uma operação portuária. Destacando-se os elementos que configuram uma operação portuária e os principais conceitos associados a sua produtividade, detalhamento do ciclo das cargas e dos veículos associados, onde aprofunda-se nos determinantes do fluxo de cargas. Uma análise da forma pela qual um porto particular opera, com ênfase na movimentação de cargas. Este trabalho contribui no detalhamento do fluxo da movimentação de cargas portuárias, beneficiando no detalhamento de regras envolvidas na construção dos agentes.

Em Zelaya (2015) foi realizado um estudo sobre a logística portuária brasileira, levando em consideração a escolha do modal hidroviário. Uma análise do modelo da infraestrutura portuária e de suas deficiências e limitações. Abordado os tipos de portos, os equipamentos de movimentação de navios, onde relata-se a vital importância de melhoria contínua em termos de tecnologias e modernização das partes integradas do sistema portuário, bem como a valorização do transporte marítimo de cargas. Com ênfase na contribuição em um modelo de infra-estrutura portuária e de suas deficiências e limitações.

Verificou-se em Spiegel (2011a), um estudo das operações portuárias, conceitos associados à logística e cadeia de suprimentos, onde foi apresentadas as funções dos portos e destacadas as questões logísticas inerentes ao desempenho da operação portuária. Com a caracterização e análise da forma pela qual um porto particular opera, com ênfase nas decisões que orientam a movimentação de cargas e a alocação dos recursos necessários para o atravessamento das mesmas. Contribuindo no entendimento e domínio das operações portuárias e movimentação de cargas.

Em Farias (2009) contribuiu com metodologia de desenvolvimento de SMAs aplicado à região portuária da cidade de São Luís, no estado do Maranhão. Um estudo de ferramentas,

[12] ArcGis Disponível em: <https://www.arcgis.com/> Acessado em abr/2020.

frameworks e modelagem de agentes e sistemas multiagente para uma região que possui movimentação de cargas de um porto.

Em Velasco (1999), realizou-se um estudo sobre a dinâmica do transporte marítimo mundial e seus reflexos sobre a evolução dos portos. Após realizar uma descrição dos principais problemas que estão sendo colocados para os portos mundiais, são apresentados em linhas gerais, os riscos a que estão expostos os portos brasileiros frente a seus competidores argentinos, buscando demonstrar que há a necessidade de uma profunda revisão das prioridades de todos os agentes envolvidos, caso se pretende aumentar o tamanho das participações das exportações brasileiras no mercado mundial. Esse estudo vem reforçar a necessidade de maiores investimentos em infraestrutura nos portos, para acompanhar o crescimento econômico do país. As problemáticas de infraestrutura e logísticas nos portos brasileiros vem contribuir para reforçar no atual estudo da elaboração de uma ferramenta que contribua na tomada de decisão, no que se refere a movimentação de navios e de cargas na região dos portos brasileiros.

Os estudos de Lu (2018) foram sobre pequenos portos e portos médios que possuem um comércio de pequeno volume. Através de análise de redes a proposta foi identificar novas rotas de portos próximos para analisar a descentralização do transporte do porto de Incheon na Coreia do Sul. Cinco portos foram identificados como candidatos após combinarem o método de análise de redes.

Verificou-se em Song (2019) o estudo do Porto de Gwangyang, onde foi construído com o objetivo de reduzir o congestionamento no Porto de Busan, atuando como porto sub-hub (consiste em um porto concentrador de cargas e de linhas de navegação). Muitos estudos têm discutido a construção do novo porto e porto dual-hub (um sistema no qual dois portos adjacentes competem entre si em uma região com um interior sobreposto) para resolver a demanda crescente e problemas de congestionamento portuário; no entanto, não há muitas pesquisas discutindo o sistema portuário sub-hub. Como tal, o principal objetivo deste artigo é analisar a estrutura da rede de transporte marítimo do porto de Gwangyang orientado a sub-hub usando análise de redes. Em termos de número de conexões entre os portos, Busan é o porto mais importante na rede de Gwangyang. No entanto, quando se trata de considerar a influência dos portos que usam como porto hub, Busan cai para a quinta posição mais influente. Na rede do Porto de Gwangyang, Xangai e Hong Kong têm papéis mais importantes em comparação com os do porto de Busan.

Conforme estudos realizados por Nguyen (2020), o setor sul do Vietnã é uma região

econômica importante: possui o transporte marítimo mais dinâmico no país. A área portuária de Ho Chi Minh - Ba Ria Vung Tau (HCM-BRTV) contribuiu mais do que 99,24% da movimentação total de carga movimentada no setor sul. É também o mais moderno e terminal ativo no Vietnã. O objetivo deste artigo é analisar a rede de conexão com outros portos e sugerir algumas estratégias de melhoria a fim de promover o transporte marítimo na área portuária de HCM-BRVT. Para tanto, foi aplicado o método de análise de redes. Isso mostrou que a porta HCM-BRVT foi conectada com 118 portos em todo o mundo. Além disso, os portos de Xangai, Ningbo-Zhoushan, Hong Kong e Cingapura foram considerados os portos mais influentes de conexão com o HCM-BRVT. Portanto, foi identificado que a área portuária HCM-BRVT deve construir mais conexões de rota marítima com esses portos de hub para melhorar seu papel na rede de portos da região.

Conforme estudo realizado por Jeon (2016), foi examinado a estrutura da rede de transporte marítimo nas regiões asiáticas e a centralidade de portos usando análise de rede social (SNA). Para análise de rede de transporte marítimo asiáticos, uma rede de transporte marítimo foi construída usando dados sobre cursos de navios de transporte marítimo operando na Ásia, dados de portos coletados a partir dos relatórios das Cruise Lines International Associations. Existem 249 nós ou portos de companhias marítimas que oferecem transporte marítimo para a Ásia entre outubro de 2015 a junho 2016, e esses nós conectam 545 portos. A análise de densidade com base nos portos onde as empresas de navios de transporte marítimo operavam mostrou que, de outubro de 2015 a junho de 2016, a densidade foi de 0,009, que era inferior à média da densidade da rede portuária global (2006 a 2011) e da densidade da rede ferroviária. A conexão com todos os portos foi possível através de 2.180 etapas. Na análise da centralidade da rede de transporte marítimo asiáticos, o porto de Cingapura ficou em primeiro lugar em grau superior e superior em centralidade de conexão, seguido pelos portos de Hong Kong, Xangai, Ho Chi Minh e Keelung. O porto de Cingapura também ficou em primeiro lugar na intermediação de resultados de análise de centralidade, seguido pelos portos de Penang, Dubai e Hong Kong. De outubro de 2015 a junho de 2016, o porto com a maior centralidade de vetor autônomo era o porto de Hong Kong, seguido pelo porto de Ho Chi Minh, Cingapura, Xangai e Danang. No caso dos portos domésticos de Incheon, Busan e Jeju, levando em consideração a centralidade de conexão, centralidade de intermediação e centralidade de vetor próprio, todos classificados abaixo de seus portos chineses concorrentes.

Em estudos realizados por Ducruet (2010), apresentou-se de uma investigação empírica na análise de redes de portos e fluxos de tráfego. Com base em um banco de dados de movimentos de embarcações, aplicou técnicas convencionais de análise de rede para o gráfico de redes marítimas

do nordeste asiático entre 1996 e 2006. Tal abordagem se mostra particularmente útil para analisar a mudança de posição dos principais portos hubs e por revelar suas respectivas áreas tributárias na região. Apesar do crescimento rápido dos portos chineses no período em estudo, este último parece se manter polarizado por hubs estabelecidos, como portos coreanos e Hong Kong. Esta pesquisa revela a forte relação entre as políticas portuárias locais e a evolução do desenho da rede de navegação nos portos asiáticos.

Conforme Ryu (2018), a indústria portuária afeta significativamente as importações e exportações da Coreia, que são centralizadas na estrutura econômica. Por exemplo, o Porto de Busan, que movimenta 75% do volume de frete de contêineres domésticos, deve se tornar cada vez mais crítica para as rotas de linha de contêiner. Por este motivo, tem havido esforços contínuos para expandir o serviço de frete para atrair volume de frete internacional. Este estudo analisa as características estruturais da rede portuária conectada ao Porto de Busan para analisar o padrão da rota do transporte marítimo de contêiner de 2012 a 2016 usando a análise de rede social. De acordo com dados da administração do Porto de Busan, o porto com o maior grau de centralidade, centralidade de proximidade e centralidade de intermediação foi considerado o Porto de Cingapura. Como resultado, foi estabelecido que o Porto Leste da China, que ocupa uma alta porcentagem da volume de carga manuseada pelo Porto de Busan, não é um porto hub de Busan quando visto na análise de rede do terminal de contêineres de Busan. Além disso, mesmo que aumente o número de serviços de contêineres do Porto de Busan, estima-se que os navios sejam adicionados da frota será limitado aos pequeno e de médio porte, ou seja, que o porto de Busan tenha característica de porto alimentador para o Porto de Cingapura.

A Tabela 2.3 apresenta de forma sumarizada todos os trabalhos estudados, com autores dos trabalhos relacionados com sistema multiagente, geoprocessamento, fluxo portuário e análise de redes. A ferramenta proposta, PortSimulator, atende todos os requisitos estudados e é apresentada no próximo capítulo.

Trabalho	SMA	Geoprocessamento	Fluxo Portuário	Análise de Redes	Estudo de gargalo
Abreu (2012)	X	X			
Grigoletti (2007)	X	X			
Araújo Júnior (2016)	X	X			X
Siegel (2011b)	X		X		X
Zelaya (2015)			X	X	X
Spiegel (2011a)			X	X	X
Farias (2009)	X		X		X

Velasco (1999)	X		X		X
Lu (2018)			X	X	
Song (2019)			X	X	X
Nguyen (2020)			X	X	
Jeon (2016)			X	X	X
Ducruet (2010)			X	X	X
Ryu (2018)			X	X	
PortSimulator	X	X	X	X	X

Tabela 2.3 – Dados sumarizados de todos os trabalhos estudados.

3 SIMULADOR DE PORTOS

Este capítulo apresenta o simulador de portos desenvolvido, denominado *PortSimulator*. De forma a desenvolver um software para a simulação da movimentação de cargas de um porto, utilizando multiagente com análise de redes e geoprocessamento, que propicie o acompanhamento em tempo real dos navios na simulação e permita a extração de gráficos da movimentação de cargas dentro de um período e carga total de navios em terminais, algumas etapas foram definidas e são detalhadas a seguir.

3.1 Método de Pesquisa

O trabalho foi realizado seguindo os critérios de pesquisa tipo bibliográfico, pesquisa laboratorial e método quantitativo, na qual um ambiente fechado simulado, onde se pode controlar as condições ideais para o desenvolvimento da pesquisa, aplicado em um estudo de caso (PRAÇA 2015). Por consequência da grande quantidade de variáveis em um estudo que deve ser considerado em uma análise aleatória, o modelo foi definido através de um método de simulação computacional que permite simular a movimentação de cargas, de forma que se assemelha ao funcionamento de um fluxo real de navios e suas cargas. A construção do modelo de simulação possibilita simular períodos de tempo arbitrários num tempo de simulação pequeno, viabilizando um grande número de experimentos e dessa forma, diferentes políticas de condução do sistema podem ser comparados e repetidos quantas vezes for necessários para garantir uma análise e tomada de decisão mais segura.

O modelo é classificado como um modelo dinâmico, por possuir variáveis se modificando na medida em que o tempo evolui, é probabilístico porque o comportamento das variáveis podem ser descritos em termos de probabilidade e pode ser classificado como um modelo discreto, já que as mudanças de estado ocorrem em tempos discretos no tempo e não de forma contínua.

O fluxo utilizado no método de pesquisa, segue o modelo apresentado por Law e Kelton (1991), utilizado para gerenciar etapas de um trabalho de simulação computacional.

Na Figura 3.1 é apresentada a sequência de etapas a serem consideradas.

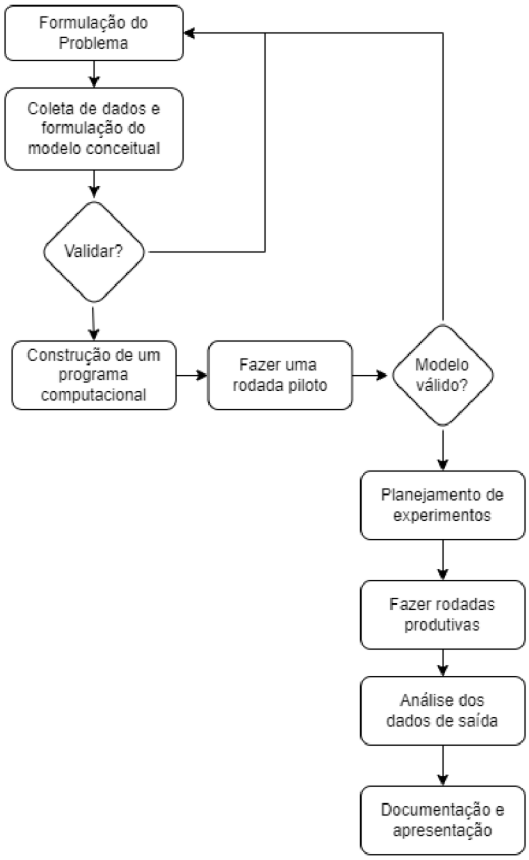


Figura 3.1 – Passos das etapas de um trabalho de modelagem computacional. Fonte: Law e Kelton (1991).

1. Formulação do problema: é a etapa onde se define o objetivo principal do estudo, as alternativas a serem testadas. Onde o objetivo será o estudo de caso de movimentação de cargas de navios;
2. Coleta de dados e formulação do modelo conceitual: coleta de dados que serão utilizados na simulação. Todas as informações que devem ser coletadas para serem aplicadas na simulação. Informações referentes à caracterização dos navios envolvidos, tais como tipo de carga, quantidade, IMO, rota inicial e rota final. Todos os dados em um arquivo de extensão CSV;
3. Validar: é onde o usuário verifica o processo intimamente para verificar se o seu modelo é válido em termos conceituais e nos dados coletados;

4. Construção de um programa computacional: nesta etapa é onde deve-se construir um software e transformar o modelo teórico em um modelo computacional. Nesse caso é onde deve-se construir os arquivos de imagem geoprocessadas do tipo Shapefile e os arquivos de configuração do software de simulação;
5. Fazer uma rodada piloto: uma rodada piloto torna-se necessária para validar o programa na fase seguinte. Para verificar se o que foi desenvolvido está de acordo com o modelo teórico proposto;
6. Planejamento de experimentos: é necessário planejar o experimento definitivo, onde é importante definir o período de tempo para que os parâmetros e os agentes envolvidos estejam em condições apropriadas para simulação naquele instante;
7. Fazer rodadas produtivas: após definir o cenário é o momento de fazer rodadas produtivas para a geração de dados. Serão nessas rodadas produtivas que sairão os dados e gráficos da simulação;
8. Análise dos dados de saída: etapa de geração de mais gráficos, quando necessário, e análise dos dados gerados pela simulação;
9. Documentação e apresentação: momento de documentar todo o estudo, incluir resultados da análise dos dados e concluir o trabalho.

3.2 Tecnologias utilizadas

Para o desenvolvimento do software, foi utilizada a linguagem de programação Java[13], na versão 8, na ferramenta de desenvolvimento Eclipse[14] para a implementação do código. Não é utilizado banco de dados, apenas arquivos com extensão CSV para os dados dos agentes e arquivos para leitura de configuração. Para as regras que envolvem sistemas multiagente é utilizada a biblioteca Mason[15], em uma arquitetura desktop Java Swing. Mason é uma biblioteca multiagente desenvolvida em Java, onde proporciona o desenvolvimento de classes de agentes e construção de métodos para seus objetivos autônomos e seu contexto espacial. Um SIG é, fundamentalmente, uma ferramenta para trabalhar com informações georreferenciadas, incluindo diversos elementos tecnológicos para esse fim (Olaya, 2014). A ferramenta SIG utilizada para a criação dos arquivos Shapefiles foi QGIS (QGIS 2020).

3.3 Roteiro da simulação

Simulador desenvolvido em *Java desktop*, utilizando as funcionalidades da biblioteca Mason. Permite a simulação de movimentação de cargas de qualquer porto sem qualquer conhecimento de programação. Para a realização da simulação é necessário a criação de três arquivos *shapefiles*, um arquivo de imagem de extensão PNG do porto, um arquivo de dados e um arquivo de configuração contida dentro da aplicação.

A simulação é baseada na construção de um modelo GIS do porto e seus dados da movimentação de cargas. Inicialmente deve-se desenvolver as imagens georreferenciadas do porto e de seus terminais a ser simulado. Essas imagens podem ser desenvolvidas na ferramenta GIS chamada de QGIS[16] e salvo na extensão Shapefile. O arquivo de geoprocessamento tipo Shapefile, é gerado a partir de cartas náuticas fornecidas pela Marinha do Brasil, conforme Figuras 3.2.

Na Figura 3.2 é apresentado um exemplo de uma carta náutica no formato de um arquivo Shapefile do porto do Rio Grande, onde em preto é o contorno do solo, em vermelho as rotas e polígonos marrons são os terminais.

---

13 Linguagem de programação Java. https://java.com/

14 Ferramenta de desenvolvimento IDE Eclipse. https://www.eclipse.org/

15 MASON é uma biblioteca de simulação multiagente de evento discreto desenvolvido em Java. https://cs.gmu.edu/~eclab/projects/mason/

16 QGIS - Um Sistema de Informação Geográfica livre e aberto. https://qgis.org/pt_BR/site/

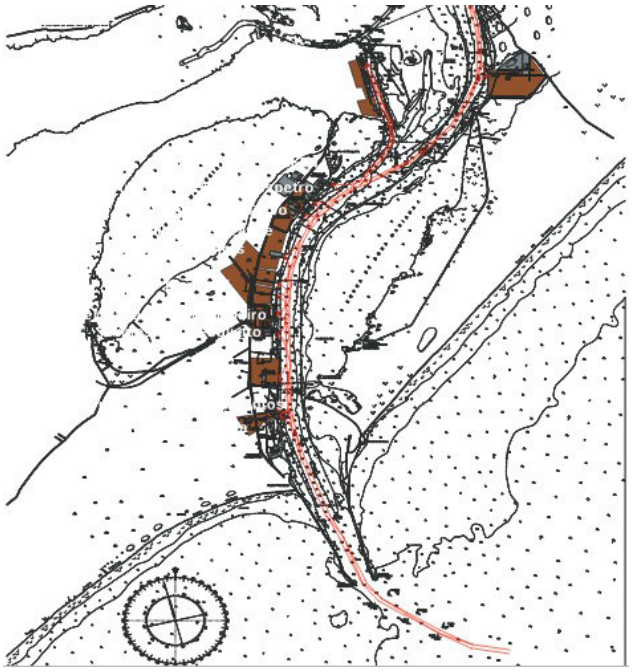


Figura 3.2 – Camada shape com suas rotas do porto do Rio Grande.

3.3.1 Regras do porto na simulação

Os navios em mar aberto terão o objetivo de chegar no terminal específico, ficar o tempo médio de desembarque/embarque e sair para mar aberto. Se por acaso todos os berços do terminal alvo estiverem ocupados, então o navio deve permanecer em mar aberto. Não foram consideradas as áreas de fundeios internas (*ALFA, BRAVO, CHARLIE, DELTA, ECHO, FOXTROT, GOLF I, GOLF II* e *GOLF III*) nas regras de simulação, conforme Praticagem da Barra do Rio Grande, são utilizados apenas em situações de emergência. Assim, a área de maior utilização para fundeio é localizada próximo ao ponto de embarque do prático nas Zonas de Praticagem do Rio Grande (ZP-19), porém não apresenta demarcação oficial, estão localizadas em mar aberto, logo após a foz do canal da lagoa dos Patos, (BRASIL, 2020). A rota dos navios ocorre seguindo regras de análise de redes em um canal onde ocorre fluxo de navios.

3.3.2 Arquivos utilizados na simulação

O arquivo com os dados reais da movimentação do porto vai permitir validar o modelo e dessa forma, gerar futura simulação da movimentação de cargas. Os dados podem ser fictícios ou

podem ser dados reais da movimentação de carga do porto a ser simulado. Se o porto for brasileiro, os dados estatísticos dos últimos anos estão disponíveis pela ANTAQ[17].

Quando executada a simulação, é gerado um gráfico em linha dinâmico, construído em tempo real da movimentação de carga dos navios, onde é somada em toneladas a carga quando o navio chega no terminal específico e uma janela de controle dos terminais e berços ocupados e desocupados, com o percentual de ocupação e percentual máximo de ocupação alcançado em toda a simulação. Com esses gráficos é possível validar a simulação, quando comparado aos dados reais extraídos dos dados estatísticos disponibilizados pela ANTAQ, 2020. Os agentes usam análise de redes, o algoritmo do caminho mais curto. Navios (agentes) não vão aleatoriamente para qualquer terminal. O simulador identifica o tipo de navio e encaminha para o terminal específico, onde permanece em um tempo médio de embarque/desembarque da carga.

3.3.3 Modelo de agentes na simulação

Quando a simulação é executada, a ação do agente navio é condicionada por norma preexistente no ambiente. Cada agente tem sua rota preexistente e um objetivo, estabelece conexões entre seus objetivos autônomos e o contexto espacial: entrar no porto para atracar no terminal certo, desatracar e sair do porto, se o terminal estiver com todos os berços ocupados, então o agente não deve entrar no canal permanecendo em mar aberto.

O agente tem a percepção do ambiente e determina a rota mais curta para chegar no seu objetivo, que é o terminal de acordo com o seu tipo de carga. O agente possui comportamento orientado por objetivos, se o terminal estiver ocupado por outro navio, o agente deve esperar em mar aberto. O agente estará atuando em um ambiente acessível, não determinístico, porque poderá esperar em mar aberto em vez de parar no terminal, em um ambiente estático e discreto.

Os agentes possuem a seguinte tipologia:

- O agente possui uma mobilidade;
- O agente pode ser reativo, havendo a necessidade de uma tomada de decisão, quanto encontrar o terminal ocupado e deverá esperar em mar aberto;
- A função do agente é movimentação de carga até o terminal específico;
- Os agentes possuem autonomia, não estão sujeitos à influência de agentes externos ou de qualquer intervenção direta humana;

[17] ANTAQ – Agência Nacional de Transportes Aquaviários. http://web.antaq.gov.br/ANUARIO/

- Os agentes não possuem cooperação;
- O agente não possui recursos de aprendizado.

3.4 Características do código desenvolvido

O simulador de portos é uma aplicação Java Desktop, que utiliza a biblioteca Mason como sua estrutura básica de simulação. Para a simulação de movimentação de cargas de um porto, é necessário agrupar todos os arquivos necessários em uma pasta. Os arquivos serão todos citados dentro do arquivo de configuração, chamado de *config.properties*. É possível ter uma pasta para cada porto onde encontram-se seus arquivos, permitindo assim, a simulação de movimentação de cargas e de navios de outros portos, conforme Figura 3.3.

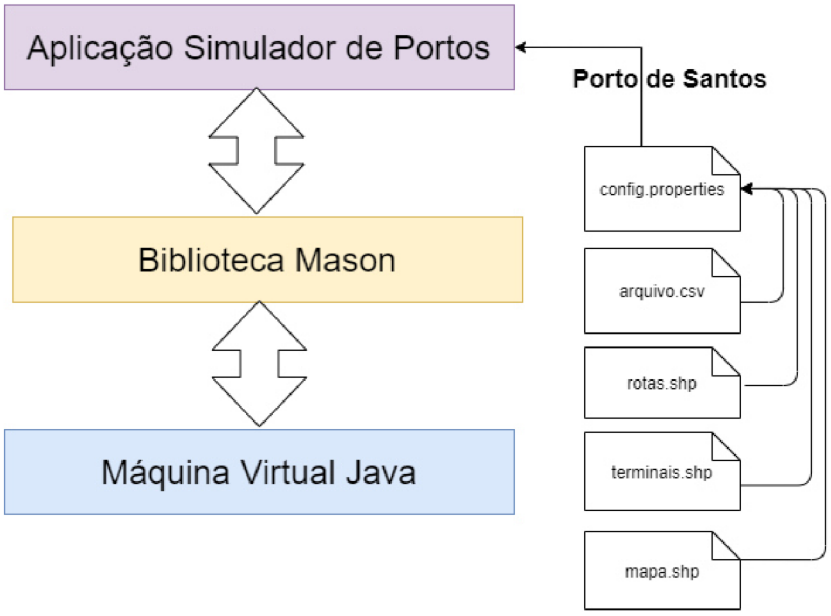


Figura 3.3 – Estrutura da aplicação Simulador de Portos. Fonte: autor.

Para a análise de redes, foi implementada a busca pela menor rota entre dois pontos geoprocessados, utiliza-se o algoritmo de busca A* (a estrela), muito utilizado em sistemas SIG, GPS e em jogos. Esse algoritmo aplica uma função de avaliação a cada nó na fronteira do espaço de estados e essa função estima o custo de caminho do nó atual até o objetivo mais próximo utilizando uma função heurística (Russell, 1995).

Neste algoritmo, o nó de menor custo "aparente" na fronteira do espaço de estados é

expandido primeiro:

$$f(n) = g(n) + h(n)$$

Onde:

g(n) = custo do caminho do nó inicial até o nó n.

h(n) = custo do caminho estimado do nó n até o nó final.

f(n) = custo do caminho total estimado.

Para isso o algoritmo utiliza uma tabela heurística (neste projeto, um arquivo CSV), onde é possível o software calcular através das colunas “Inicio” e “Destino”, a distância entre o ponto de partida até o ponto de chegada do navio. Salvo na condição de mudança de rota para a área de fundeio, quando o terminal e berço de destino estiver ocupado.

Passos do algoritmo:

Dados de entrada:

C = conjunto de nós a serem pesquisados;

I = o estado inicial da busca

Etapas:

1. Inicialize C com o nó de busca (I) como única entrada;
2. Se C está vazio, interrompa. Se não, escolha o melhor elemento de C;
3. Se o estado (n) é um objetivo, retorne n. Senão remova n de C;
4. Encontre os descendentes do estado (n) que não estão em visitados e crie todas as extensões de n para cada descendente;
5. Adicione os caminhos estendidos a C e vá ao passo 2;

O fluxo do agente no seu caminho até seu destino é o seguinte:

1. Quando o agente chega a um cruzamento, ele escolhe a direção mais curta para chegar ao objetivo;
2. Identificar o nó que o agente se encontra;
3. Identificar para onde o agente está indo;
4. Definir o local a ser exibido na carta náutica;

5. Mover o agente para as coordenadas determinadas;
6. Encontrar um caminho definido pelo algoritmo A* para trabalhar;
7. Verificar se o agente encontrou ou não um caminho para trabalhar;
8. Traçar um caminho entre o nó inicial do agente e seu nó de destino;
9. Obter os nós inicial e destino aos quais este agente está associado;
10. Encontrar o caminho pelo algoritmo A* apropriado entre eles;
11. Configurar o agente para prosseguir ao longo de uma aresta;
12. Limpar a velha aresta;
13. Atualizar novo tráfego da aresta;
14. Configurar o novo segmento e informações de índice;
15. Verificar se o agente está se movendo na direção certa;
16. Mover o agente para as coordenadas fornecidas;
17. Retornar geometria que representa a localização do agente;
18. Se o agente ainda não chegou ao seu destino, então inicia novamente as regras de movimento do agente.

3.5 Interface do sistema desenvolvido

A interface divide-se em 4 janelas com funções distintas conforme Figura 3.4. A janela de controle, onde o usuário poderá iniciar, pausar ou parar a simulação a qualquer momento; as janelas de gráfico de linhas, onde o usuário poderá acompanhar em tempo real, a somatória da movimentação de cargas dos navios e quantidade de navios nos terminais. O gráfico de linhas mostra a quantidade de navios atracados em terminais e a quantidade de movimentação de cargas dos navios, respeitando o limite de berços. E a última janela, que trata da simulação propriamente dita, onde o usuário poderá acompanhar a movimentação dos agentes navios, seguindo suas rotas autônomas até seus terminais, onde o agente segue o ambiente de uma carta náutica do porto a ser simulado.

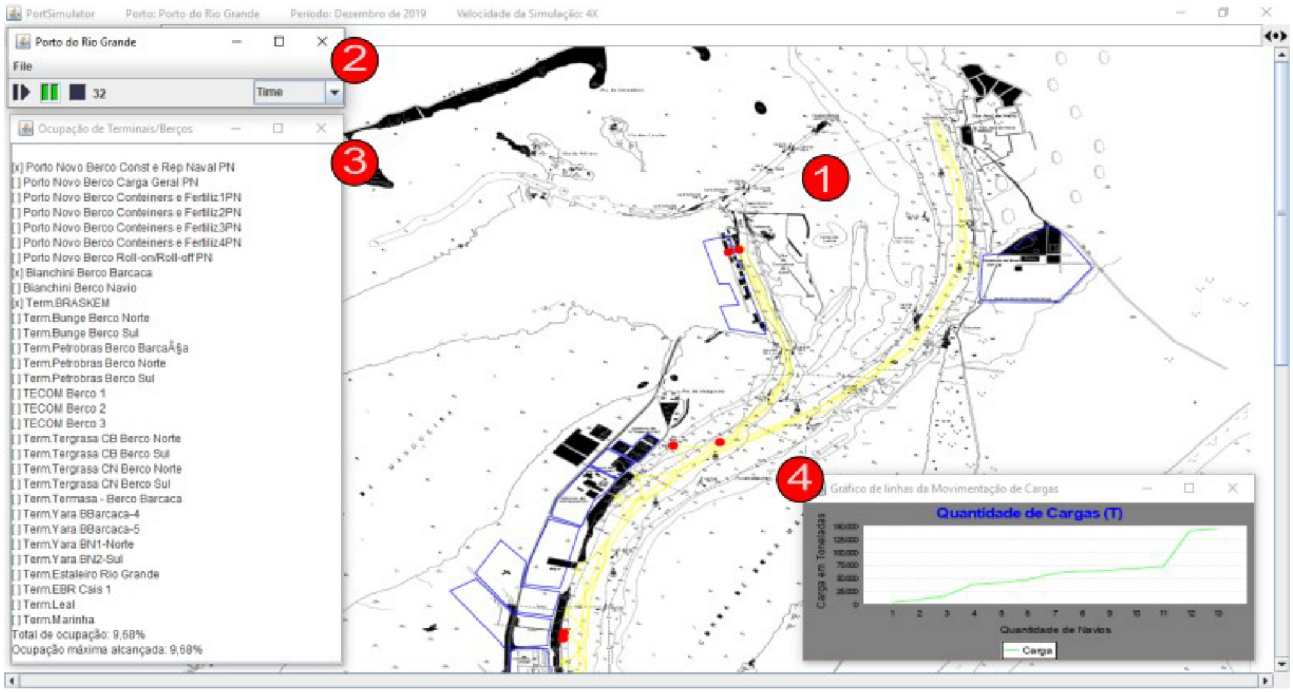


Figura 3.4 – Interface do Simulador de Portos. Fonte: autor.

1. Janela onde ocorre a simulação na carta náutica e agentes.
2. Janela de controle de play, pause e stop da simulação;
3. Janela onde é apresentado em tempo real terminais, berços ocupados e desocupados, com percentual de ocupação e percentual máxima de ocupação em todo o período de simulação;
4. Gráfico da movimentação de cargas dos navios atracados nos terminais;

4 VALIDANDO O SIMULADOR: ESTUDO DE CASO NO COMPLEXO PORTUÁRIO DO RIO GRANDE

Este capítulo apresenta um estudo de caso de utilização da ferramenta proposta, baseada em dados no complexo portuário do Rio Grande (RS). A escolha deste porto foi por inúmeras características: por ser um complexo portuário de portos de 2 municípios (Rio Grande e São José do Norte), favorecido pelas características geográficas; por ser um dos maiores portos brasileiros em movimentação de cargas (OMDN 2021); possuir diversificados terminais, proporcionando dessa forma a movimentação diversificada de navios e possui um calado de 14m, proporciona a entrada de navios de grande porte e sua movimentação dentro do complexo portuário (SUPRG 2020); é o caminho para outros 2 portos do estado do Rio Grande do Sul, portos da cidade de Pelotas e de Porto Alegre. Com todas essas características, identificar os limites de movimentação de navios poderá proporcionar oportunidades de investimentos futuros, proporcionando investimentos planejados de acordo com o crescente aumento da movimentação portuária.

4.1 Configuração dos dados no simulador

Para gerar uma simulação, devemos seguir os dois grupos de informações:

(i) Informações sobre os agentes

Extrair dados do porto do site da ANTAQ no formato Excel, para a criação dos arquivos CSV:

1. dados_navios_perido_2019-12.csv
2. bercos.csv

(ii) Informações sobre as rotas dos agentes

1. Adquirir mapa náutico da região portuária. No Brasil são adquiridos no website da Marinha do Brasil.
2. No webite do porto extrair as informações geográficas sobre terminais e berços.
3. Em uma ferramenta de geoprocessamento, construir os arquivos shapefile:
    a. rota_navios.shp
    b. carta_nautica.shp
    c. terminais.shp

Com a extração e formatação dessas informações será possível gerar simulação do porto. Para a criação dos arquivos CSVs, baseados nas informações extraídas da ANTAQ, devem seguir o seguinte formato:

Arquivo dados_navios_perido_2015-02.csv com dados dos navios no período a simular:

```
INICIO;DESTINO;Terminal;IMO;DataAtracacao;DataDesatracacao;Carga
1;306;Terminal Bunge Alim.;-;01/02/2015 12:23:00;03/02/2015 13:00:00;1756.51
2;306;Terminal Bunge Alim.;9225512;01/02/2015 14:35:00;04/02/2015 17:15:00;25443.65
3;253;Rio Grande;-;01/02/2015 15:52:00;03/02/2015 05:50:00;2579.74
4;133;Rio Grande;9349198;31/01/2015 04:18:00;01/02/2015 09:10:00;2581.57
5;131;Rio Grande;-;31/01/2015 11:10:00;01/02/2015 06:45:00;3071.35
6;130;Rio Grande;9452139;01/02/2015 13:20:00;04/02/2015 14:50:00;4504.13
7;253;Rio Grande;-;02/02/2015 08:40:00;04/02/2015 13:00:00;1924.39
8;133;Rio Grande;9490296;05/02/2015 11:20:00;06/02/2015 09:35:00;1111.5
```

```
9;131;Rio Grande;-;05/02/2015 16:55:00;06/02/2015
07:55:00;3075.54
10;130;Rio Grande;-;08/02/2015 12:10:00;09/02/2015
06:45:00;3491.89
```

Onde é necessário desenvolver um arquivo com extensão CSV com os dados da movimentação de cargas do porto com as seguintes colunas:

- Início: Código de identificação de uma linha do arquivo Shapefile rotas.shp para o início de onde o agente/navio começa seu percurso;
- Destino: Código de identificação de uma linha do arquivo Shapefile rotas.shp para o destino do agente/navio.
- Terminal: Nome do terminal e do berço;
- IMO[18]: O número internacional de identificação do navio (Organização Marítima Internacional);
- DataAtracacao: Data e hora que o navio atracou no berço do terminal, seguindo o formato "dd/mm/aaaa hh:mm:ss";
- DataDesatracacao: Data e hora que o navio desatracou no berço do terminal, seguindo o formato "dd/mm/aaaa hh:mm:ss";
- Carga: a quantidade de carga em toneladas do navio. Aceita valores com vírgula.

Arquivo bercos.csv com dados do berço de navios:

```
ID;TERMINAL;VALOR
253;Porto Novo Berco Const e Rep Naval PN;false
709;Porto Novo Berco Carga Geral PN;false
710;Porto Novo Berco Conteiners e Fertiliz1PN;false
711;Porto Novo Berco Conteiners e Fertiliz2PN;false
712;Porto Novo Berco Conteiners e Fertiliz3PN;false
713;Porto Novo Berco Conteiners e Fertiliz4PN;false
714;Porto Novo Berco Roll-on/Roll-off PN;false
307;Terminal Bianchini Berco Barcaca;false
718;Terminal Bianchini Berco Navio;false
302;Terminal BRASKEM;false
```

[18] IMO (Organização Marítima Internacional) é a agência da ONU responsável por garantir a regulamentação do transporte marítimo internacional, regulamentando questões que envolvem desde construção de navios, equipamento, tripulação, suas operações e o seu descarte. https://imo.org/

```
306;Terminal Bunge Berco Norte;false
717;Terminal Bunge Berco Sul;false
303;Terminal Petrobras Berco Barcaca;false
715;Terminal Petrobras Berco Norte;false
716;Terminal Petrobras Berco Sul;false
311;TECOM Berco 1;false
706;TECOM Berco 2;false
707;TECOM Berco 3;false
309;Term. Tergrasa CB Berco Norte;false
719;Term. Tergrasa CB Berco Sul;false
720;Term. Tergrasa CN Berco Norte;false
721;Term. Tergrasa CN Berco Sul;false
310;Term. Termasa - Berco Barcaca;false
708;Terminal Yara BBarcaca-4;false
304;Terminal Yara BBarcaca-5;false
722;Terminal Yara BN1-Norte;false
723;Terminal Yara BN2-Sul;false
305;Term. Estaleiro Rio Grande;false
301;Terminal EBR Cais 1;false
312;Term. Leal Santos;false
313;Term. Marinha;false
```

Onde:

1. ID: Código da linha do berço no arquivo ShapeFile rota_navios.shp
2. TERMINAL: Descrição do terminal e berço.
3. VALOR: verdadeiro ou falso true/false, para indicar quando o berço está sendo ocupado/desocupado por um navio naquele momento.

Para a criação dos arquivo do tipo ShapeFile, foi utilizada a ferramenta de geoprocessamento QGIS Desktop na versão 3.20.2, onde sobre o arquivo de carta_nautica.shp, foram desenhadas as linhas para os arquivos rota_navios.shp e terminais.shp.

Após a criação de todos arquivos, foi colocado na pasta \PortSimulator\src\main\java\porto\data\rio-grande do Simulador.

A seguir e última etapa, configurar o arquivo config.properties, conforme modelo a seguir:

```
prop.port=Porto do Rio Grande
prop.shpfile=rio-grande/rota_navios.shp
prop.shparea=rio-grande/CartaNauticaRioGrande.shp
prop.shpterminal=rio-grande/terminais.shp
prop.csvfile=rio-grande/2019-12.csv
```

```
prop.csvberco=rio-grande/bercos.csv
prop.larguraPainel=1300
prop.alturaPainel=1300
prop.periodo=Dezembro de 2019
prop.velocidade=4
```

Onde:

- pop.port: deve ser informado em forma de título, o nome do porto a ser simulado;
- pop.shpfile: informar a pasta e o nome do arquivo shapefile das rotas dos navios na região portuária;
- pop.shparea: informar a pasta e o nome do arquivo shapefile da carta náutica da região portuária;
- pop.shpterminal: informar a pasta e o nome do arquivo shapefile dos terminais do porto;
- pop.csvfile: informar a pasta e o nome do arquivo CSV onde terão os dados dos navios;
- pop.csvberco: informar a pasta e o nome do arquivo CSV onde terão os dados dos berços dos terminais;
- prop.larguraPainel: informar a largura da janela de apresentação da simulação. Deve ser em pixel.
- prop.alturaPainel: informar a altura da janela de apresentação da simulação. Deve ser em pixel.
- prop.periodo: informar o período que será realizada a simulação.
- prop.velocidade: informar a velocidade da simulação.

Com esses arquivos gerados e com as informações configuradas será possível executar o simulador para gerar a simulação e seus gráficos de dados.

Quando executar a aplicação será apresentada a tela de play/pause/stop da simulação, janela com a área a ser simulada, conforme Figura 4.1.

Conforme determinação da CAP/RG, a velocidade máxima de navios dentro do canal é de 8 nós. Para criar o parâmetro de tempo e velocidade foi utilizado o tempo que um navio leva para atravessar todo o Superporto em uma velocidade de 8 nós, que é de 57 minutos. Com esse parâmetro com a devida proporcionalidade foi identificado o ciclo de TIME necessário na simulação e dessa forma apresentar dados mais realistas e dentro de um período esperado de tempo, onde TIME de 57 ciclos na simulação está representando 57 minutos.

Na tela de execução, após clicar em play, é iniciado o Time que na Figura 4.1 o Time está mostrando 19 minutos.



Figura 4.1 – Interface da janela de execução do Simulador. Fonte: autor.

4.2 Dados reais obtidos

A simulação foi realizada no complexo portuário do Rio Grande, incluindo o Porto Novo, Superporto e o Estaleiro Brasil EBR na cidade de São José do Norte. Os dados reais foram obtidos em um período de 12 meses do ano de 2019, onde foram identificadas as quantidades de navios, movimentação de cargas e de quantidade de navios em áreas de fundeio.

Porto e terminais envolvidos na simulação realizada no complexo portuário do Rio Grande, conforme Figura 4.2:

1. Estaleiro Brasil - EBR
2. Porto Novo
3. Terminal Braskem
4. Terminal Petrobras (TERIG) Transpetro
5. Terminal Yara Adubos Trevo
6. Estaleiro Rio Grande
7. Terminal Bunge Alimentos
8. Terminal Bianchini
9. Terminal Tergrasa
10. Terminal Termasa Luiz Fogliatto
11. TECON
12. Terminal Leal Santos Alim.
13. Terminal da Marinha



Figura 4.2 – Portos e terminais do complexo portuário do Rio Grande. Fonte: autor.

4.3 Análise comparativa entre dados reais e dados simulados

A seguir, são apresentados os resultados, mês a mês, dos valores simulados. A Figura 4.3 apresenta o comparativo entre dados reais e dados simulados do complexo portuário do Rio Grande no ano de 2019. Percebe-se que a simulação acompanhou as curvas dos dados reais, permitindo assim a validação da simulação, juntamente com as baixas taxas de erros apresentados na Tabela 4.1.

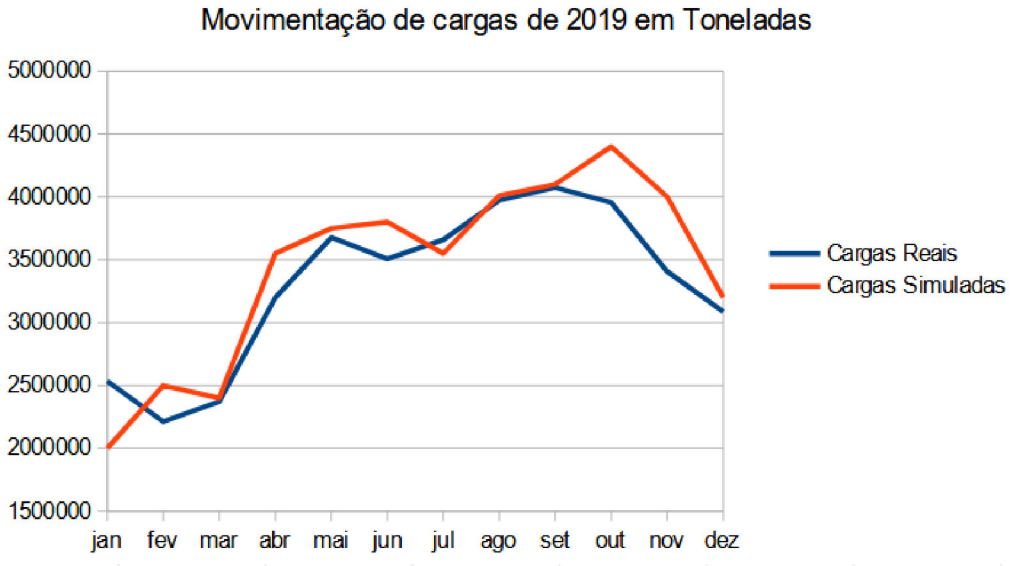


Figura 4.3 – Movimentação de cargas de navios de 2019 em toneladas. Um comparativo entre dados reais e dados simulados. Fonte: autor.

Conforme Figura 4.3, o gráfico da movimentação de cargas de 2019 em toneladas, identificou-se um aumento gradativo nos primeiros meses do ano de 2019 e uma queda na movimentação de cargas nos últimos meses no complexo portuário do Rio Grande.

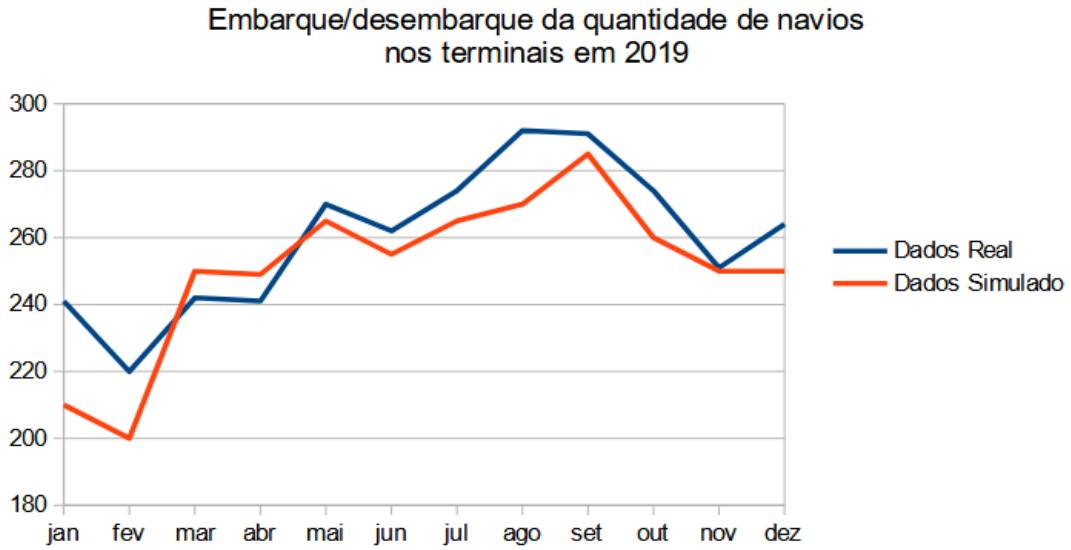


Figura 4.4 – Quantidade de embarques/desembarques de navios no ano de 2019. Fonte: autor.

Seguindo a tendência do gráfico de movimentação de cargas, na Figura 4.4 o mesmo ocorreu com o gráfico da quantidade de embarques ou desembarques nos terminais analisados, com um aumento nos primeiros meses do ano de 2019 e uma queda na quantidade de embarques ou desembarques de navios nos terminais nos últimos meses de 2019. Os gráficos resultantes das simulações realizadas.

Tabela 4.1 – Taxa de erro encontrada na comparação dos dados reais com dados simulados no complexo portuário do Rio Grande no ano de 2019, onde a carga está em Toneladas.

Ano-Mês	Movimentação de Carga	Quant.Navios	Quant.Carga Simulada	% Erro
2019-01	2.534.804	241	2.060.012	-1,03%
2019-02	2.212.786	220	2.531.151	+1,01%
2019-03	2.371.067	242	2.403.129	+1,00%
2019-04	3.198.498	241	3.551.891	+1,00%
2019-05	3.676.663	270	3.751.010	+1,00%
2019-06	3.506.811	262	3.821.109	+1,01%
2019-07	3.658.576	274	3.550.127	-1,00%
2019-08	3.973.125	292	4.010.118	+1,00%
2019-09	4.074.554	291	4.110.090	+1,00%
2019-10	3.954.835	274	4.478.991	+1,02%
2019-11	3.406.064	251	4.001.834	+1,00%
2019-12	3.086.883	264	3.201.870	+1,00%

Onde foi encontrada a média de 1,00% de taxa de erro nas simulações de 12 meses do ano de 2019.

4.4 Simulação para a identificação do limite máximo de movimentação de carga que o porto suporta

4.4.1 Construção do cenário

Para a construção do cenário de identificação do limite máximo de movimentação de navios no complexo portuário do Rio Grande foi utilizado como parâmetro a identificação do crescimento do porto proporcional ao crescimento da economia do estado do Rio Grande do Sul (Leon, 2013). Conforme Petry (2018), parâmetros utilizados na construção dos cenários, o crescimento da economia do estado do Rio Grande do Sul, cenário realista 3% de crescimento do PIB ao ano, otimista 5% de crescimento do PIB ao ano e, para um cenário pessimista 1% de crescimento do PIB ao ano dentro do período de 2019 a 2025. Com base nesses valores foram construídas simulações, gerados dados e apresentados nos gráficos a seguir.

Foram feitas simulações do complexo portuário do Rio Grande no período entre 2022 até 2032 e analisados os dados de movimentação de cargas, quantidade de navios e percentual de navios atracados nos terminais.

Conforme Figura 4.5, o gráfico da simulação da movimentação de cargas do complexo portuário do Rio Grande no período de 2022 até 2032. No cenário pessimista, houve um crescimento na movimentação de cargas de um pouco mais de 50 mil toneladas. No cenário realista, houve um crescimento na movimentação de cargas por volta de 60 mil toneladas e em um cenário otimista, um crescimento de mais de 70 mil toneladas.

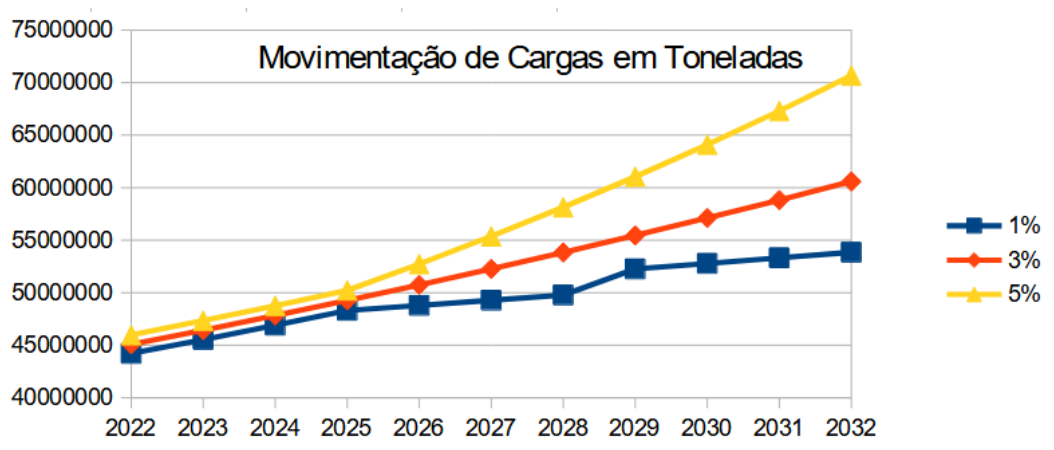


Figura 4.5 – Gráfico da simulação da movimentação de cargas em toneladas do complexo portuário do Rio Grande no período de 2022 até 2032. Fonte: autor.

Conforme Figura 4.6, o gráfico da simulação da quantidade de navios atracados no complexo portuário do Rio Grande no período de 2022 até 2032. No cenário pessimista, houve um crescimento na quantidade de navios de um pouco abaixo de 4 mil navios dentro do período de 10 anos. No cenário realista, houve um crescimento na quantidade de navios por volta de 4,5 mil navios dentro do período e em um cenário otimista, um crescimento de mais de 5 mil navios.

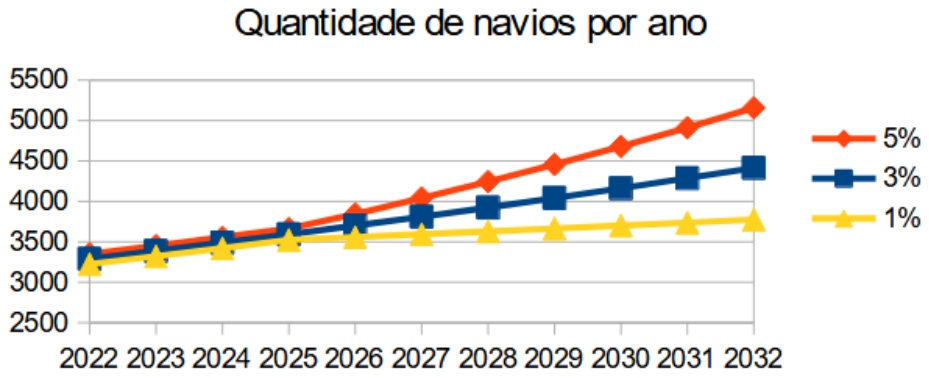


Figura 4.6 – Gráfico da simulação da quantidade de navios atracados no complexo portuário do Rio Grande no período de 2022 até 2032. Fonte: autor.

Conforme Figura 4.7, o gráfico da simulação do percentual de navios atracados no complexo portuário do Rio Grande no período de 2022 até 2032. Nas simulações realizadas nos cenários apresentados o limite de ocupação nos terminais chegará em 100% nos primeiros meses do ano de 2032. Com base no resultado apresentado na Figura 4.6, o limite máximo de movimentação de cargas que o complexo portuário do Rio Grande suporte será por volta de 10 anos. Após esse período vai gerar grandes transtornos com atrasos na logística no complexo multimodal do porto, gerando atrasos no embarque e desembarques das cargas e grande acúmulo de navios em área de fundeio em mar aberto nas proximidades do canal da Lagoa dos Patos. Quando chegar neste cenário, o escoamento da produção do estado do Rio Grande do Sul poderá ser gravemente afetada, interferindo na economia do estado, nas suas exportações e importações, bem como demais regiões do país que usufruem da infraestrutura do complexo portuário do Rio Grande. Dessa forma identificou-se data limite para o investimento prévio necessário que possa evitar este grave cenário não apenas para o complexo portuário do Rio Grande, bem como para todo o estado do Rio Grande do Sul.

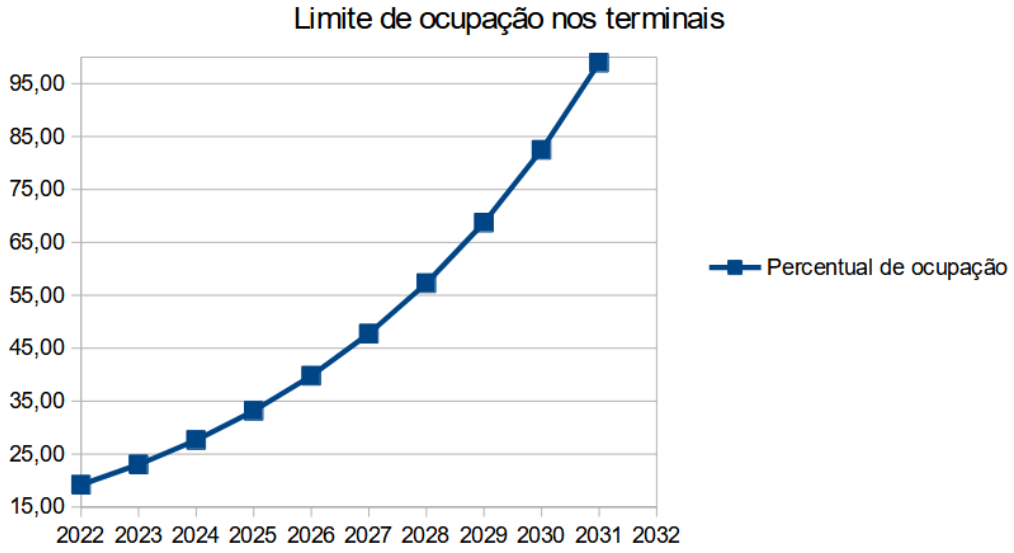


Figura 4.7 – Gráfico da simulação do percentual de navios atracados no complexo portuário do Rio Grande no período de 2022 até 2032. Fonte: autor.

Foi implementada a busca pela menor rota entre dois pontos geoprocessados, utiliza-se o algoritmo de busca A* (a estrela) em multiagentes e veio proporcionar os resultados analisados, simulações considerando carta náutica, terminais, berços e dados reais de navios, para a identificação mais precisa possível do limite de movimentação de navios no complexo portuário do Rio Grande.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como principal objetivo desenvolver uma ferramenta, PortSimulator, que possa simular movimentação de cargas em portos, utilizando sistemas multiagente, análise de redes com geoprocessamento e através de uma exploração multidisciplinar, vem buscar responder a questão de pesquisa de quando ocorre a capacidade máxima de navios em portos. O simulador PortSimulator foi desenvolvido para gerar simulações para qualquer porto. Em apêndice encontra-se artigo publicado com a simulação da movimentação de cargas do porto de Santos e neste trabalho foi desenvilvido para o complexo portuário do Rio Grande.

Como forma de validar a ferramenta desenvolvida, foi realizado um estudo de caso do Porto do Rio Grande/RS, analisados os dados simulados com dados obtidos reais do ano de 2019. Conforme dados da SUPRG (2020), problemas climatológicos ou acidentes ambientais no canal podem ocasionar atrasos nos terminais e/ou dificultar o fluxo de navios no canal, forçando navios a esperarem em mar aberto. Estes aspectos não foram analisados neste trabalho.

Este trabalho foi analisado de forma comparativa a outros trabalhos estudados, como o estudo de Lu (2018), que utilizou análise de redes para identificar novas rotas de portos, ou de Song (2019) fez um estudo para analisar a estrutura da rede de transporte marítimo. Neste trabalho, análise de redes está sendo utilizada para o agente identificar caminho mais curto para chegar no terminal ou na área de fundeio e seu retorno para mar aberto, para isso foi escolhido no algoritmo A estrela (A*).

O simulador foi desenvolvido para ser uma ferramenta de baixa complexidade para simulação portuária, permitindo o uso em qualquer porto, desde que obtenha-se dados estatísticos do período desejado, carta náutica em formato digital e a identificação de terminais, berços e áreas de fundeio. É uma ferramenta flexível, que não requer programação, permitindo a criação de arquivos onde o simulador irá ler os dados, executar sobre uma carta náutica e gerar gráficos do período solicitado.

A utilização de sistemas multiagente com análise de redes A* aplicados a portos mostrou-se uma ferramenta bastante promissora. Além de simular a movimentação dos navios, pode auxiliar na identificação do aumento da circulação de navios e suas consequências sobre o porto. Desta forma,

possibilitar investimentos antecipados na região, no sentido de minimizar os impactos, prever recursos em infraestruturas no sentido de identificar futuros “gargalos” (momento no tempo em que não será possível a circulação de navios na área do porto, por motivo de lotação de navios em terminais e áreas de fundeios), na movimentação de cargas de um terminal ou de um porto específico. Também pode-se realizar um estudo sobre fluxo de cargas com regiões portuárias isoladas em uma simulação de derramamento de cargas poluentes e de fluxo de navios em momentos de dragagens para o aumento do calado do canal, entre outras possibilidades envolvendo atividades portuárias.

Pelo estudo de caso realizado no simulador de portos PortSimulator, foram gerados os arquivos de geoprocessamentos tipo Shapefile e para a heurística dos agentes um arquivo de extensão CSV, com os dados dos navios. Dessa forma, foram geradas 12 simulações de períodos diferentes do ano de 2019 do complexo portuário do Rio Grande e comparados com dados reais, onde foram encontradas taxas de erro com percentual médio de 1,00%, uma taxa de erro considerada extremamente baixa e aceitável para a validação dos dados.

Nas simulações realizadas no período de 2022 até 2032 e nos cenários apresentados, o limite de ocupação nos terminais chegará em 100% nos primeiros meses do ano de 2032. O limite máximo de movimentação de cargas que o complexo portuário do Rio Grande suporte será por volta de 10 anos. Após esse período vai gerar grandes transtornos com atrasos na logística no complexo multimodal do porto, gerando atrasos no embarque e desembarques das cargas e grande acúmulo de navios em área de fundeio em mar aberto nas proximidades do canal da Lagoa dos Patos. A utilização de análise de redes, foi implementada a busca pela menor rota entre dois pontos geoprocessados com multiagentes, e veio proporcionar os resultados analisados, simulações com carta náutica, terminais, berços e dados reais de navios, para a identificação mais precisa possível do limite de movimentação de navios no complexo portuário do Rio Grande.

O simulador proporciona a aplicação de novas simulações em outros portos, sem a utilização de programação pelo usuário, apenas informando, em um arquivo de configuração, os arquivos de geoprocessamento e CSV que o simulador deve utilizar.

Contudo, diversos trabalhos futuros podem ser desenvolvidos, de forma a ter-se uma ferramenta ainda mais robusta e completa, como:

- Desenvolver gráfico em linha da movimentação de cargas para cada terminal;
- A geração de relatórios com os dados de resultado da simulação e exportação em Excel;
- Gerar gráfico com o tempo médio dos navios na área de fundeio.

- Tempo de parada nos terminais ser de tempo real extraído das estatísticas de anos passados e não uma média extraída dos dados estatísticos do porto;
- Substituir o arquivo de configuração por uma tela de cadastro;
- A identificação dos agentes navios por tipo de navios ou por cargas na simulação;
- Fornecer informações em tempo real dos navios quando em movimento em direção ao terminal. Informações como: IMO, terminal, tipo de carga, quantidade de carga transportada, etc;
- Desenvolver uma versão web;
- Incluir nas simulações as bacias de evolução e paradas para manutenção de terminais e berços;
- Incluir nas simulações a capacidade máxima de armazenamento nos terminais, levando em consideração a carga dos navios atracados/desatracados.

6 APÊNDICES

SIMULAÇÃO DA MOVIMENTAÇÃO DE CARGA DO PORTO DE SANTOS COM MULTIAGENTES E GEOPROCESSAMENTO

SIMULATION OF THE CARGO HANDLING OF THE PORT OF SANTOS WITH MULTIAGENTS AND GEOPROCESSING

SIMULACIÓN DEL MANEJO DE CARGA DEL PUERTO DE SANTOS CON MULTIAGENTES Y GEOPROCESAMIENTO

Elisio Bender de Leon[1]
e412581
https://doi.org/10.47820/recima21.v4i1.2581

PUBLICADO: 01/2023

RESUMO

Foi desenvolvido um simulador de movimentação de navios e cargas em portos. O software desenvolvido em Java com a biblioteca Mason, com multiagentes e geoprocessamento, onde permiti análise da movimentação, acompanhamento em tempo real em imagem geoprocessada, o fluxo da movimentação de cargas em terminais em um determinado período. Dessa forma permitir identificar melhores horários para a distribuição da movimentação dos navios e melhores rotas, diminuir a espera em áreas de fundeio e limites de fluxo no canal do porto.

PALAVRAS-CHAVE: simulador. movimentação de cargas. Porto. Multi-agentes. geoprocessamento

ABSTRACT

A ship and cargo movement simulator was developed in ports. The software developed in Java with the Mason library, with multi-agents and geoprocessing, which allowed movement analysis, real-time monitoring in geoprocessed image, the flow of cargo movement in terminals in a given period. In this way, it allows identifying better times for the distribution of ship movements and better routes, reducing waiting times in anchorage areas and flow limits in the port channel.

KEYWORDS: simulator. cargo handling. Harbor. Multi-agents. geoprocessing

INTRODUÇÃO

Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é a integração do sistema multiagente com geoprocessamento e análise de redes em uma ferramenta de simulação com aplicabilidade em portos. Esta ferramenta possibilita o acompanhamento em tempo real dos navios na simulação e extração de gráficos da movimentação de cargas dentro de um período, sua carga total e identificar os limites viáveis de usabilidade, carga/descarga e limite de áreas de fundeio.

Objetivo Específico

Para atingir o objetivo principal, tem-se os seguintes objetivos específicos:

- Estudo sobre a dinâmica de portos e modelagem dos agentes para o sistema;
- Escolha de ferramentas para desenvolvimento do simulador proposto;
- Validação dos dados gerados a partir de dados reais.

Justificativa

Foi identificado a necessidade de análise do fluxo de navios no porto, a movimentação de carga e descarga, no sentido de buscar determinar os picos máximo de navios no porto, para prever e mitigar futuros problemas de lotação dos terminais e área de fundeio do porto de Santos. Apenas a lotação dos terminais graneleiros por exemplo, já gerariam grande transtorno de congestionamento de caminhões e cargas nas proximidades do Porto.

Problema

Foi identificado no fluxo do porto, picos no fluxo de navios na espera da liberação da bacia de evolução e zonas de fundeio ocupadas, principalmente as menores. A movimentação de navios comprometidos principalmente quando ocorrem acidentes ambientais no seu canal.

1 EMBASAMENTO TEÓRICO E APLICADO

Geoprocessamento

Geoprocessamento é um conjunto de tecnologias de coleta, tratamento, manipulação e apresentação de informações espaciais voltados para um objetivo específico. Segundo Piroli (2010), geoprocessamento consiste no ramo da ciência que estuda o processamento de informações georreferenciadas através de aplicativos (normalmente GISs - Geographic Information Systems), equipamentos (computadores e periféricos) e dados de diversas fontes. Um GIS é, fundamentalmente, uma ferramenta para trabalhar com informações georreferenciadas, incluindo diversos elementos tecnológicos para esse fim (OLAYA 2014).

Sistemas Multiagentes

Conforme Weiss 1999, um agente é um sistema de computador situado em algum ambiente, e que seja capaz de ação autônoma nesse ambiente, a fim de atingir seus objetivos. Quando um novo agente entra na simulação, suas ações podem ser condicionadas por normas preexistentes que forma instituídas através de interações anteriores com agentes e que persistiu através do tempo. Essas interações podem ser expressas pela troca de dados entre agentes (Rocha 2017). Um agente pode se referir a diferentes componentes, pois os aplicativos têm objetivos diferentes e em diferentes paradigmas. Cada agente é

programado para reagir a outros agentes e ao seu ambiente computacional, com relação às regras de comportamento, desde decisões primitivas de reação até a Inteligência Artificial adaptativa complexa.

Fluxo do Processo de Chegada e Saída de Navios em um Porto

De forma a mostrar o fluxo de processo de chegada e de saída de navios em um porto, foi realizado estudo e modelagem para o porto de Santos. Desta forma, uma empresa interessada em carregar ou descarregar mercadorias no porto de Santos deve passar por um fluxo, envolvendo etapas, conforme regras estabelecidas pelas NORMA DA AUTORIDADE PORTUÁRIA, NAP.SUPOP.OPR.012, DE 03 DE OUTUBRO DE 2022, NORMAS PARA ATRACAÇÃO DE NAVIOS NO PORTO DE SANTOS.

2 PESQUISA

Foi desenvolvido um software para a simulação da movimentação de cargas de um porto, utilizando multiagentes e geoprocessamento, que propicie o acompanhamento em tempo real dos navios na simulação e permita a extração de gráficos da movimentação de cargas dentro de um período e carga total de navios, algumas etapas foram definidas e são detalhadas a seguir.

Método de Pesquisa

A construção de um modelo baseado de um método de simulação computacional que permite simular a movimentação de cargas, de forma que se assemelha ao funcionamento de um fluxo real de navios e suas cargas. A construção do modelo de simulação possibilita simular de forma repetidas quantas vezes for necessários para garantir uma análise e tomada de decisão mais segura. O modelo é classificado como um modelo dinâmico, por possuir variáveis se modificando na medida em que o tempo evolui, é probabilístico porque o comportamento das variáveis podem ser descritos em termos de probabilidade e pode ser classificado como um modelo discreto, já que as mudanças de estado ocorrem em tempos discretos no tempo e não de forma contínua. O fluxo utilizado no método de pesquisa, segue o modelo apresentado por Law e Kelton (1991), utilizado para gerenciar etapas de um trabalho de simulação computacional. Na figura 2.1 é apresentada a sequência de etapas a serem consideradas.

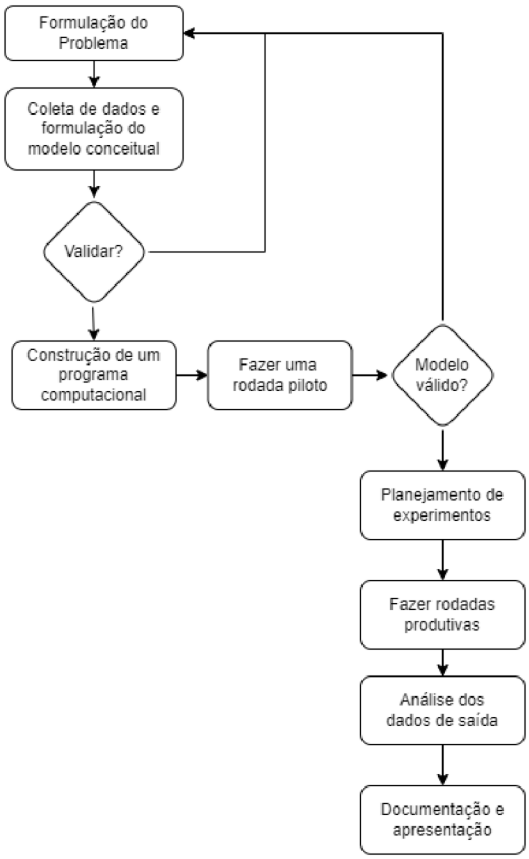


Figura 2.1 - Passos das etapas de um trabalho de modelagem computacional.
Fonte: Law e Kelton (1991).

1. Formulação do problema: é a etapa onde se define o objetivo principal do estudo, as alternativas a serem testadas. Onde o objetivo será o estudo de caso de movimentação de cargas de navios;
2. Coleta de dados e formulação do modelo conceitual: coleta de dados que serão utilizados na simulação. Todas as informações que devem ser coletados para serem aplicadas na simulação. Informações referentes à caracterização dos navios envolvidos, tais como tipo de carga, quantidade, IMO (2022), rota inicial e rota final. Todos os dados em um arquivo de extensão CSV;
3. Validar: é onde o usuário verifica o processo intimamente para verificar se o seu modelo é válido em termos conceituais e nos dados coletados;

4. Construção de um programa computacional: nesta etapa é onde deve-se construir um software e transformar o modelo teórico em um modelo computacional. Nesse caso é onde deve-se construir os arquivos de imagem geoprocessadas do tipo Shapefile e o arquivo de configuração do software de simulação;
5. Fazer uma rodada piloto: uma rodada piloto torna-se necessário para validar o programa na fase seguinte. Para verificar se o que foi desenvolvido está de acordo com o modelo teórico proposto;
6. Planejamento de experimentos: é necessário planejar o experimento definitivo, onde é importante definir o período de tempo para que os parâmetros e os agentes envolvidos estejam em condições apropriadas para simulação naquele instante;
7. Fazer rodadas produtivas: após definir o cenário é o momento de fazer rodadas produtivas para a geração de dados. Serão nessas rodadas produtivas que sairão os dados e gráficos da simulação;
8. Análise dos dados de saída: etapa de geração de mais gráficos, quando necessário, e análise dos dados gerados pela simulação;
9. Documentação e apresentação: momento de documentar todo o estudo, incluir resultados da análise dos dados e concluir o trabalho.

Tecnologias Utilizadas

Para o desenvolvimento do software, foi utilizada a linguagem de programação Java[19], na versão 8, na ferramenta de desenvolvimento Eclipse[20] para a implementação do código. Não foi utilizado banco de dados, apenas arquivos com extensão CSV para os dados dos agentes. Para as regras que envolvem sistemas multiagentes foi utilizada a biblioteca Mason[21] (2020) em uma arquitetura desktop Java Swing.

Roteiro da Simulação

Simulador desenvolvido em Java desktop, utilizando as funcionalidades da biblioteca Mason. Permite a simulação de movimentação de cargas de qualquer porto sem programação. Para a realização da simulação será necessário a criação de três arquivos shapefiles, um arquivo de imagem de extensão PNG do porto, um arquivo de dados e um arquivo de configuração contida dentro da aplicação. A simulação é baseada na construção de um modelo GIS do porto e seus dados da movimentação de cargas. Inicialmente deve-se desenvolver as imagens georreferenciadas do porto e de seus terminais a ser simulado. Essas imagens podem ser desenvolvidas na ferramenta GIS chamada de QGIS[22] (2020) e salvo na extensão Shapefile. É necessário desenvolver um arquivo com extensão CSV com os dados da movimentação de cargas do porto com as seguintes colunas:

- Inicio: ID de identificação de uma linha do arquivo Shapefile rotas.shp para o início.

[19] Linguagem de programação Java. https://java.com/

[20] Ferramenta de desenvolvimento IDE Eclipse. https://www.eclipse.org/

[21] MASON é uma biblioteca de simulação multiagente de evento discreto desenvolvido em Java. https://cs.gmu.edu/~eclab/projects/mason/

[22] QGIS - Um Sistema de Informação Geográfica livre e aberto. https://qgis.org/pt_BR/site/

- Destino: ID de identificação de uma linha do arquivo Shapefile rotas.shp para o destino.
- Terminal: Nome do terminal e do berço;
- IMO[23]: O número internacional de identificação do navio (Organização Marítima Internacional) (2022);
- DataAtracacao: Data e hora que o navio atracou no berço do terminal, seguindo o formato "dd/mm/aaaa hh:mm:ss";
- DataDesatracacao: Data e hora que o navio desatracou no berço do terminal, seguindo o formato "dd/mm/aaaa hh:mm:ss";
- Carga: a quantidade de carga em toneladas. Aceita valores com vírgula.

Exemplo:

```
Inicio;Destino;Terminal;IMO;DataAtracacao;DataDesatracacao;Carga
148;152;Carga Geral;9259110;05/01/2020 11:35:00;06/01/2020
08:05:00;3899,363
```

O arquivo com os dados reais da movimentação do porto vai permitir validar o modelo e dessa forma, gerar futuras simulação da movimentação de cargas. Os dados podem ser fictícios ou podem ser dados reais da movimentação de carga do porto a ser simulado. Se o porto for brasileiro, os dados estatísticos dos últimos anos estão disponíveis pela ANTAQ[24] (2022).

Já arquivo de configuração necessário para a simulação deve seguir o seguinte template:

```
prop.port=Porto de Santos
prop.shpfile=santos/rotas.shp
prop.shparea=santos/mapa.shp
prop.shpterminal=santos/terminais.shp
prop.csvfile=santos/navios.csv
prop.larguraPainel=1300
prop.alturaPainel=600
prop.image=santos/porto_santos.png
```

Onde:

pop.port: deve ser informado em forma de título, o nome do porto a ser simulado;
pop.shpfile: informar a pasta e o nome do arquivo shapefile das rotas dos navios na região portuária;
pop.shparea: informar a pasta e o nome do arquivo shapefile do mapa da região portuária;
pop.shpterminal: informar a pasta e o nome do arquivo shapefile dos terminais e berços do porto;
prop.larguraPainel: informar a largura da janela de apresentação da simulação. Deve ser em pixel.
prop.alturaPainel: informar a altura da janela de apresentação da simulação. Deve ser em pixel.

[23] IMO (Organização Marítima Internacional) é a agência da ONU responsável por garantir a regulamentação do transporte marítimo internacional, regulamentando questões que envolvem desde construção de navios, equipamento, tripulação, suas operações e o seu descarte. https://imo.org/

[24] ANTAQ – Agência Nacional de Transportes Aquaviários. http://web.antaq.gov.br/ANUARIO/

prop.image: informar a pasta e o nome do arquivo de imagem do porto na extensão PNG.

Quando executada a simulação, é gerado um gráfico em linha dinâmico, construído em tempo real da movimentação de carga dos navios, onde é somada em toneladas a carga quando o navio chega no terminal específico. Com esse gráfico é possível validar a simulação, quando comparado aos dados reais. Os agentes usam o método do caminho mais curto. Navios (agentes) não vão aleatoriamente para qualquer terminal. O simulador identifica o tipo de navio e encaminha para o terminal específico.

Características do Código Desenvolvido

O simulador de portos é uma aplicação Java Desktop, que utiliza a biblioteca Mason [8] como sua estrutura básica de simulação. Para a simulação de movimentação de cargas de um porto, é necessário agrupar todos os arquivos necessários em uma pasta. Os arquivos serão todos citados dentro do arquivo de configuração, chamado de config.properties. É possível ter uma pasta para cada porto onde encontram-se seus arquivos, conforme figura 2.2.

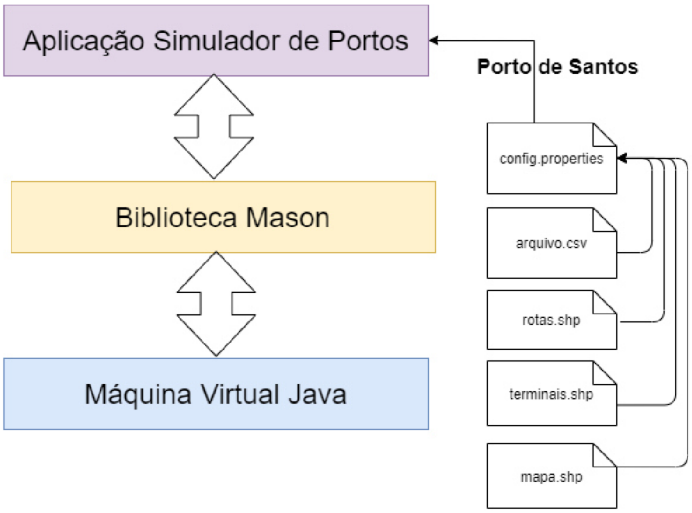


Figura 2.2 - Estrutura da aplicação Simulador de Portos. Fonte: autor.

Para a busca a menor rota entre dois pontos geoprocessados, utiliza-se o algoritmo de busca A* (a estrela), muito utilizado em sistemas de GPS e em jogos. Esse algoritmo aplica uma função de avaliação a cada nó na fronteira do espaço de estados e essa função estima o custo de caminho do nó atual até o objetivo mais próximo utilizando uma função heurística (RUSSEL 1995).

Neste algoritmo, o nó de menor custo “aparente” na fronteira do espaço de estados é expandido primeiro:

f(n) = g(n) + h(n)

Onde:

g(n) = custo do caminho do nó inicial até o nó n.

h(n) = custo do caminho estimado do nó n até o nó final.

f(n) = custo do caminho total estimado.

Para isso o algoritmo utiliza uma tabela heurística (neste projeto, um arquivo CSV), onde é possível a aplicação calcular através das colunas “Inicio” e “Destino”, a distância entre o ponto de partida até o ponto de chegada do navio.

Passos do algoritmo:

Dados de entrada:

C = conjunto de nós a serem pesquisados;

I = o estado inicial da busca

ALGORITHM 1: Busca A*

1. Inicialize C com o nó de busca (I) como única entrada; current
2. Se C está vazio, interrompa. Se não, escolha o melhor elemento de C;
3. Se o estado (n) é um objetivo, retorne n;
4. (De outro modo) Remova n de C;
5. Encontre os descendentes do estado (n) que não estão em visitados e crie todas as extensões de n para cada descendente;
6. Adicione os caminhos estendidos a C e vá ao passo 2;

Características dos Agentes Aplicados no Sistema Multi-Agent

Quando a simulação é executada, a ação do agente navio é condicionada por norma preexistente no ambiente. Cada agente tem sua rota preexistente e um objetivo, estabelece conexões entre seus objetivos autônomos e o contexto espacial: entrar no porto para atracar no terminal certo, desatracar e sair do porto. O agente tem a percepção do ambiente e determina a rota mais curta para chegar no seu objetivo, que é o terminal de acordo com o seu tipo de carga. O agente possui comportamento orientado por objetivos, se o terminal estiver ocupado por outro navio, o agente deve tomar a decisão de ir para a área de fundeio. O agente estará atuando em um ambiente acessível, não determinístico, porque poderá ir para na área de fundeio em vez de parar no terminal, em um ambiente estático e discreto.

Os agentes possuem a seguinte tipologia:

- o agente possui uma mobilidade;
- o agente pode ser reativo, havendo a necessidade de uma tomada de decisão, quanto encontrar o terminal ocupado e deverá deslocar-se para a área de fundeio;
- a função do agente é movimentação de carga até o terminal específico;
- os agentes possuem autonomia, não estão sujeitos à influência de agentes externos ou de qualquer intervenção direta humana;
- os agentes não possuem cooperação;
- o agente não possui recursos de aprendizado.

Interface do Sistema Desenvolvido

A interface divide-se em 2 janelas com funções distintas conforme figura 2.3. A janela de controle, onde o usuário poderá iniciar, pausar ou parar a simulação a qualquer momento; a janela que trata da simulação propriamente dita, onde o usuário poderá acompanhar a movimentação dos agentes navios,

seguindo suas rotas autônomas até seus terminais, onde o agente segue o ambiente de uma imagem geoprocessada do porto a ser simulado.

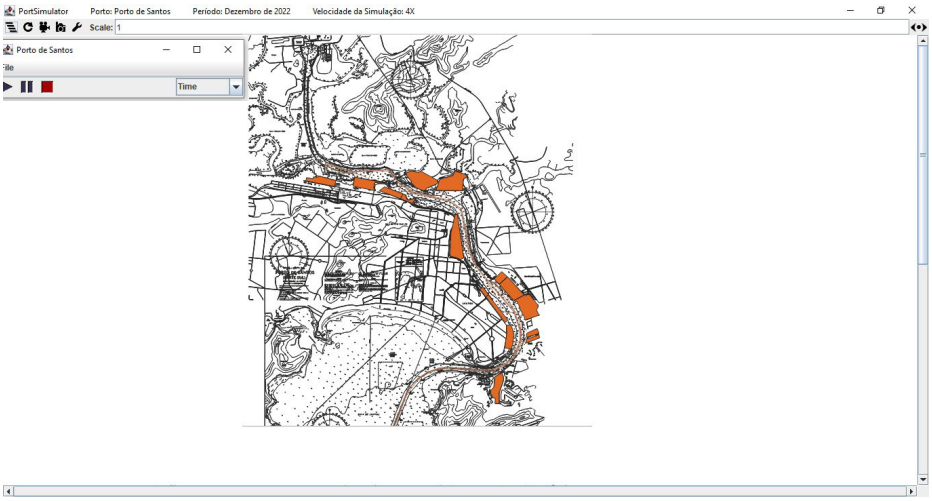


Figura 2.3 - Interface do Simulador de Portos. Fonte: autor.

3 ANÁLISE DE DADOS

Dados Reais Obtidos

A simulação foi realizada no porto de Santos, em ambas as margens. Os dados reais foram obtidos em um período de 5 anos, de 2017 até 2021, onde foram identificadas as quantidades de navios e movimentação de cargas. Porto e terminais envolvidos na simulação realizada no porto de Santos, conforme figura 3.1:

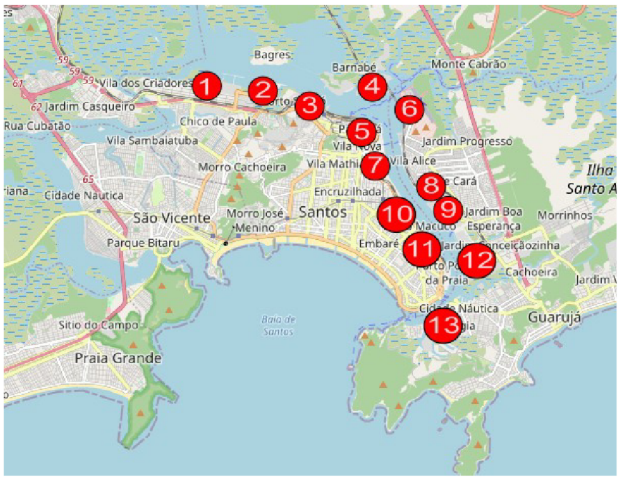


Figura 3.1 - Terminais do porto de Santos. Fonte: OpenStreetMap

1. Granéis líquidos
2. Carga geral
3. Multipropósito
4. Multipropósito
5. Granéis sólidos vegetais
6. Carga geral
7. Carga geral
8. Veículos
9. Containeres
10. Granéis líquidos
11. Celulose
12. Granéis líquidos
13. Multipropósito

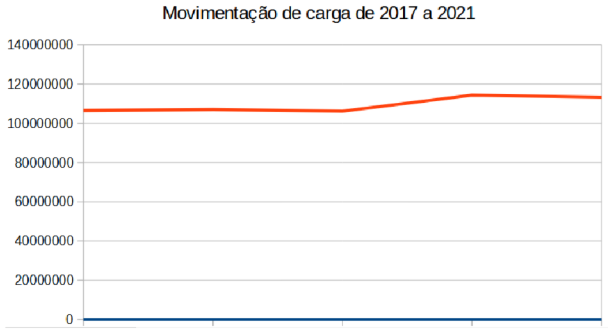


Figura 3.2 - Movimentação de cargas de 2017 a 2021. Fonte: autor

Conforme figura 3.2, o gráfico da movimentação de cargas de 2017 a 2021, identificou-se um aumento gradativo de 2017 até 2021 na movimentação de cargas no porto de Santos.

Dados Simulados Obtidos

Os dados simulados obtidos das simulações realizadas sobre os anos de 2017 a 2021. A seguir, são apresentados os resultados, mês a mês, dos valores simulados.

Tabela 3.1 – Movimentação de dados simulados do ano de 2017

Período de 2017	Carga(t)
jan	5.582.936

fev	7.346.851
mar	8.675.867
abr	8.744.380
mai	8.562.609
jun	8.884.784
jul	9.630.700
ago	8.945.494
set	9.004.620
out	9.365.054
nov	8.466.041
dez	7.796.548

Análise Comparativa entre Dados Reais e Dados Obtidos

A figura 3.3 apresenta o comparativo entre dados reais e dados simulados do porto de Santos no ano de 2017. Percebe-se que a simulação acompanhou as curvas dos dados reais, permitindo assim a validação da simulação, juntamente com as baixas taxas de erros apresentados na tabela 3.1.

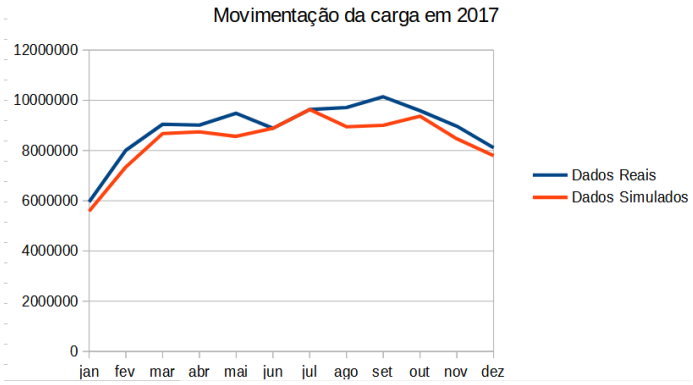


Figura 3.3 - Gráfico da movimentação de carga de 2017. Fonte: autor.

Tabela 3.2 – Taxa de erro encontrada na comparação dos dados reais com dados simulados no porto de Santos no ano de 2017.

Ano-Mês	Movimentação de Carga Real	Quant.Carga Simulada	% Erro
2017-01	5.951.958	5.582.936	6,2%
2017-02	8.011.834	7.346.851	8,3%
2017-03	9.046.786	8.675.867	4,1%
2017-04	9.014.825	8.744.380	3,0%
2017-05	9.482.402	8.562.609	9,7%
2017-06	8.884.785	8.884.784	1,9%
2017-07	9.630.701	9.630.700	5,8%
2017-08	9.712.806	8.945.494	7,9%
2017-09	10.140.338	9.004.620	11,2%
2017-10	9.585.522	9.365.054	2,3%
2017-11	8.968.264	8.466.041	5,6%
2017-12	8.112.954	7.796.548	3,9%

Onde foi encontrada a média de 5,82% de taxa de erro nas simulações de 12 meses do ano de 2017.

5- CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização de sistemas multiagentes aplicados a portos mostra uma ferramenta bastante promissora. Além de simular a movimentação dos navios, pode auxiliar na identificação do aumento da circulação de navios e suas consequências sobre o porto. Desta forma, possibilitar investimentos antecipados na região, no sentido de minimizar os impactos, prever recursos em infraestruturas no sentido de identificar futuros “gargalos” na movimentação de cargas de um terminal ou de um porto específico. Também pode-se realizar um estudo sobre fluxo de cargas com regiões portuárias isoladas em uma simulação de derramamento de cargas poluentes e de fluxo de navios em momentos de dragagens para o aumento do calado do canal, entre outras possibilidades envolvendo atividades portuárias. Até o momento, foi desenvolvido sistema Simulador de Portos, gerados os arquivos de geoprocessamentos tipo Shapefile e para a heurística dos agentes um arquivo de extensão CSV, com os dados dos navios. Dessa forma, apresentada simulação do ano de 2017 do porto de Santos e comparados com dados reais, onde foram encontradas taxas de erro com percentual médio de 5,82%, uma taxa de erro considerada aceitável para a validação dos dados. O simulador proporciona a aplicação de novas simulações em outros portos, sem a utilização de programação pelo usuário, apenas informando, em um arquivo de configuração, os arquivos de geoprocessamento e CSV que o simulador deve utilizar.

REFERÊNCIAS

ANTAQ – Agência Nacional de Transportes Aquaviários. Disponível em: <http://web.antaq.gov.br/ANUARIO/>. Acessado em: dez/2022.

IMO - International Maritime Organization; Disponível em: <https://imo.org/>. Acessado em: dez/2022.

LAW, A.M. and Kelton, W.D. Simulation Modelling and Analysis. 2nd Edition, McGraw-Hill, New York, 1991.

QGIS - Softwares de Sistemas de Informação Geográfica; Disponível em: <https://qgis.org/pt_BR/site/>. Acessado em: jan/2020.

OLAYA, Víctor. Sistemas de Información Geográfica, 2014.

MASON - Biblioteca de simulação baseado em multiagente; Disponível em: <https://cs.gmu.edu/~eclab/projects/mason/>. Acessado em: jan/2020.

PIROLI, Edson Luís; Introdução ao geoprocessamento. Ourinhos : Unesp, 2010.

ROCHA, Jorge; Boavida-Portugal, Inês; Gomes, Eduardo. Multi-Agent Systems. University of Lisbon, 2017.

RUSSEL, S. and Norvig, Artificial Intelligence: a Modern Approach. Prentice-Hall, New Jersey, USA, 1995.

WEISS, Gerhard; Multiagent Systems. MIT Press Cambridge, Massachusetts London, England, 1999.

7 Referências

Abreu, Carolina G.; **Ferramenta de Simulação com Abordagem de Sistema Multiagente para a Dinâmica de Uso da terra**; UnB, 2012.

Adamatti, Diana, F. **Simulação Baseada em Multiagentes como Ferramenta em Estudos Interdisciplinares.** CINTED-UFRGS, Novas Tecnologias na Educação, V. 9 Nº 1, Porto Alegre, julho, 2011.

Araújo Júnior, Carlos Alberto; **Um sistema multiagente para otimização do transporte florestal**. Viçosa, Minas Gerais, 2016.

ANTAQ – **Agência Nacional de Transportes Aquaviários**. Disponível em: <http://web.antaq.gov.br/ANUARIO/>. Acessado em: jan/2020.

Bonabeau, E. ***Agent-Based Modelling: Methods and Techniques for Simulating Human Systems****, Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* (PNAS), 99(3): 7280-7287, 2002.

Brasil, **Plano Mestre - COMPLEXO PORTUÁRIO DE RIO GRANDE E PELOTAS**, Ministério da Infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Laboratório de transportes e Logística (LABTRANS), Cooperação Técnica para Suporte no Planejamento do Setor Portuário Nacional e na Implantação de Projetos de Inteligência Logística Portuária, Volume 1, 2020.

CAP/RG – **Regras do Conselho de Autoridade Portuária do Porto do Rio Grande. Superintendência do Porto do Rio Grande (SUPRG)**, Rio Grande, 2009.

CPRS – **Capitania dos Portos do Rio Grande do Sul**. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/cprs/>. Acessado em: set/2021.

Ducruet, César, Lee, S.W., Koi, Yu Adolf Ng. ***Centrality and vulnerability in liner shipping networks: Revisiting the Northeast Asian port hierarchy****. Maritime Policy and Management, Taylor & Francis (Routledge)*, 2010, 37 (1), pp.17-36. ffhalshs-00458593.

Farias, Luciana Fortes. **Sistema multiagente para monitoramento ambiental do complexo portuário da Ilha de São Luís - Maranhão**, São Luís, 2009.

Grigoletti, Pablo Souza, **Uma Arquitetura Baseada em Sistemas Multiagentes para Simulações em Geoprocessamento**; Porto Alegre; PPGC da UFRGS, 2007.

Holthoefer, J.B., ***Semantic Networks and Cognitive Dynamics****, Universitat Rovira i Virgili*, Tarragona, Espanha, 2011.

IMO – ***International Maritime Organization***; Disponível em: <https://imo.org/>. Acessado em: jan/2020.

Jeon, Jun-Woo; Cha, Young-Doo; Yeo, Gi-Tae, ***An Analysis of the Cruise Courses Network in Asian Regions Using Social Network Analysis****, Journal of Korea Port Economic Association* Vol.32, No.1, 2016, pp.17-28.

LabTrans, **Plano Mestre - Porto do Rio Grande - COOPERAÇÃO TÉCNICA PARA APOIO À SEP/PR NO PLANEJAMENTO DO SETOR PORTUÁRIO BRASILEIRO E NA IMPLANTAÇÃO DOS PROJETOS DE INTELIGÊNCIA LOGÍSTICA PORTUÁRIA**, Laboratório de Transportes e Logística – LabTrans, Florianópolis/SC, 2013.

Law, A.M. and Kelton, W.D. ***Simulation Modelling and Analysis*****.** 2nd Edition, McGraw-Hill, New York, 1991.

Leon, Elísio B., **Simulação de Movimentação de Carga do Superporto do Rio Grande**; Rio Grande; FURG, 2013.

LU, Wen, PARK, Sung Hoon, OH, Jae Gyuen, YEO, Gi Tae, ***Network Connection Strategy for Small and Medium-sized Ports (SMPs)****, ELSEVIER, The Asian Journal of Shipping and Logistics* 34(1), 2018.

MASON - **Biblioteca de simulação baseado em multiagente**; Disponível em: <https://cs.gmu.edu/~eclab/projects/mason/>. Acessado em: jan/2020.

MPA - ***Maritime and Port Authority of Singapore***. Disponível em: <https://www.mpa.gov.sg/web/portal/home>. Acessado em: abr/2020.

Newman, M. E. J., ***The structure and function of complex networks****, Department of Physics, University of Michigan*, U.S.A., 2003.

Newman, M.E.J., ***Networks an Introduction****, University of Michigan and Santa Fe Institute,*

Oxford, 2010.

Nguyen, Thi Le Hang, Park, Sung-Hoon, Yeo, Gi-Tae, ***An analysis of port networks and improvement strategies for port connections in the Ho Chi Minh area.*** *ELSEVIER, The Asian Journal of Shipping and Logistics 1*, (2020).

NORMAM-01/DPC, **Normas da Autoridade Marítima para Embarcações Empregadas na Navegação em Mar Aberto**, Marinha do Brasil, Diretoria de Portos e Costas, 2005.

NORMAM-08/DPC, **Normas da Autoridade Marítima para Tráfego e Permanência de Embarcações em Águas Jurisdicionais Brasileiras**. Marinha do Brasil. Diretoria de Portos e costas, 2013.

NORMAM-12/DPC, **Normas da Autoridade Marítima para o Serviço de Praticagem**. Marinha do Brasil. Diretório de Portos e Costas, 2011.

NPCP-RS, **Normas e Procedimentos da Capitania dos Portos do Rio Grande do Sul**. Marinha do Brasil. Capitania dos Portos do Rio Grande do Sul, 2020.

Olaya, Víctor. **Sistemas de Información Geográfica**, 2014.

OMDN - **O Mundo dos Negócios**. Disponível em <https://www.omdn.com.br/>. Acessado em out/2021.

Petry, Guilherme; Braatz, Jacó; Martinez, Paolo. **Perspectivas para as finanças públicas do RS no período de 2019 a 2025**, Secretaria da Fazenda do Estado do Rio Grande do Sul. Tesouro do Estado. Divisão de Estudos Econômicos e Fiscais e Qualidade do Gasto, maio, 2018.

Piroli, Edson Luís; **Introdução ao geoprocessamento**. Ourinhos : Unesp, 2010.

Port of Shanghai *– Ship Technology*. Disponível em <https://www.ship-technology.com/projects/portofshnaghai/>. Acessado em: jan/2020.

Porto de Roterdã. Disponível em: <https://www.portofrotterdam.com/en>. Acessado em: abr/2020.

Porto de Santos. Disponível em: <https://www.portodesantos.com.br/>. Acessado em: dez/2022.

Praça, Fabíola Silva Garcia, **Metodologia da Pesquisa Científica: Organização Estrutural e os Desafios para Redigir o Trabalho de Conclusão**. Faculdade de Filosofia, Ciência e Letras

Nossa Senhora Aparecida. Revista Eletrônica Diálogo Acadêmico, jan-jul, 2015.

QGIS – **Softwares de Sistemas de Informação Geográfica**; Disponível em: <https://qgis.org/pt_BR/site/>. Acessado em: jan/2020.

Razzak, Sâmar; **Dicionário Básico Portuário**. 2a. edição. Administração dos Portos de Paranaguá e Antonina, Paranaguá, 2010.

Rocha, Jorge; Boavida-Portugal, Inês; Gomes, Eduardo. ***Multi-Agent Systems***. *University of Lisbon*, 2017.

Russell, S. and Norvig, ***Artificial Intelligence: a Modern Approach.*** *Prentice-Hall, New Jersey*, USA, 1995.

Ryu, Ki-Jin, Nam, Hyung-Sik, Jo, Sang-Ho, Ryoo, Dong-Keun, ***A Study on Analysis of Container Liner Service Routes Pattern Using Social Network Analysis : Focused on Busan Port***, *J. Navig. Port Res*. Vol. 42, No. 6 : 529-538, December 2018.

Santos, Carlos C.R., **Redes Marítimas e TVG da Cabotagem Brasileira: Estrutura Espacial e Dinâmica Regional**, SENAI CIMATEC, Salvador, 2018.

Silva, Andressa C. C.; Mariani, Leidiane; González, Rafael. H. A. **Gestão Territorial para Recursos Hídricos com Software Livre de Código Aberto.** Centro Internacional de Hidroinformática, Foz do Iguaçu, PR, 2012.

SPA – ***Santos Port Authority***. Disponível em: <http://www.portodesantos.com.br/>. Acessado em: abr/2020.

Spiegel (a), Thais; Moraes, Ana Beatriz de Brito; Caulliraux, Heitor Mansur; **O Porto sob a ótica da cadeia de suprimento: A proposta de programação integrada das operações**. XXXI **Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, UFRJ, 2011.

Spiegel (b), Thaís; Andrade, Eduardo Augusto Tardelli; Moraes, Ana Beatriz de Brito; Caulliraux, Heitor Mansur; **Análise da movimentação de carga em uma operação portuária: Um estudo de caso.** VII, Congresso Nacional de Excelência em Gestão, UFRJ, Rio de Janeiro, 2011.

SUPRG, **Superintendência do Porto do Rio Grande** – Website. Disponível em <www.portoriogrande.com.br>. Acessado em: mar/2020.

SUPRG, **Plano de Desenvolvimento e Zoneamento do Porto do Rio Grande**. **Relatório Final - TOMO I**. Superintendência do Porto de Rio Grande, Governo do Estado do Rio Grande do Sul, 2017.

SONG, Shi Cheng, PARK, Sung hoon, YEO, Gi Tae, ***Network Structure Analysis of a Sub-Hub-Oriented Port**, ELSEVIER, The Asian Journal of Shipping and Logistics* 35(2), 2019.

Velasco, Luciano Otávio Marques; Lima, Eriksom Teixeira; **As Novas Empresas Mundiais de Navegação Determinam a Evolução dos Portos**; Revista do BNDES, Rio de Janeiro. V. 6, N 11, P.167-186, 1999.

Wasserman, Stanley and Faust, Katherine, ***Social Network Analysis. Methods and Applications**, Cambridge University, Cambridgem, England*, 1994.

Weiss, Gerhard; ***Multiagent Systems**. MIT Press Cambridge, Massachusetts London, England*, 1999.

Wooldridge M, Jennings NR. ***Intelligent agents: theory and practice.*** *The Knowledge Engineering Review*. 1995.

World Port Source. ***World Port Source provides interactive satellite images, maps and contact information for 4,936 ports in 196 countries***. Disponível em <http://www.worldportsource.com/>. Acessado em: jan/2020.

Zelaya, Luis Gustavo; Mattos, Nathalia Oliveira; Correia, Stefano Zelaya; Correia, Maria Fernanda Zelaya; **Logística portuária brasileira sua evolução do setor e perspectivas.** XI Congresso Nacional de Excelência em Gestão, Rio de Janeiro, 2015.

8 Glossário

Área de fundeio – O mesmo que ancoradouro ou fundeadouro. Local onde o navio espera até liberarem o berço ou terminal que deve atracar.

Atracação – Operação de fixação do navio ao cais. Ato ou efeito de um navio atracar num porto ou terminal privativo, a fim de realizar a operação de carregamento e descarregamento de mercadoria.

Autoridade Portuária – É a administração de um porto exercida diretamente pela União ou pela entidade concessionária do porto organizado. De acordo com a Lei 8630/93, compete à Administração do Porto, dentro dos limites da área do porto, entre outros: pré-qualificar os operadores portuários, fi xar os valores e arrecadar a tarifa portuária, fiscalizar a execução ou executar as obras de construção, reforma, ampliação, melhoramento e conservação das instalações portuárias, e estabelecer o horário de funcionamento no porto, bem como as jornadas de trabalho no cais de uso público, Razzak (2010).

Cabotagem – É a navegação entre portos do mesmo país que utiliza via marítima ou esta em conjunto com hidrovias interiores.

DWT – É a soma de todos os pesos variáveis que um navio é capaz de embarcar em segurança. É constituído pelo somatório dos pesos do combustível, água, mantimentos, consumíveis, tripulantes, passageiros, bagagens e carga embarcados "deadweight tonnage".

Framework – É uma abstração que une códigos comuns entre vários projetos de software provendo uma funcionalidade genérica.

ISPS-CODE – É uma norma internacional criada através da Resolução n.º 2, da Conferência Diplomática sobre Proteção Marítima, no âmbito da Organização Marítima Internacional (IMO), vinculada à Organização das Nações Unidas (ONU), que visa a segurança e à proteção de navios de tráfego internacional e instalações portuárias onde estes aportam, SUPRG (2020).

IMO – Organização Marítima Internacional é a agência da ONU responsável por regular a segurança e proteção do transporte marítimo.

Porto hub – são portos concentradores de carga responsáveis por receber grandes volumes e despachar para portos de menor expressão.

Porto dual-hub – um sistema no qual dois portos adjacentes competem entre si em uma região com um interior sobreposto.

roll-on/roll-off – Rolar para dentro e rolar para fora. Muito utilizado em cargas de caminhões e navios.

Shapefile – é um formato de arquivo desenvolvido pela empresa Esri, contendo dados geoespaciais em forma de vetor usado por Sistemas de Informações Geográficas, também conhecidos como SIG.