

DANIEL DE OLIVEIRA MOTA

MODELAGEM DA PROGRAMAÇÃO DE NAVIOS PARA
OTIMIZAÇÃO NO CANAL DE ACESSO AO PORTO DE SANTOS

São Paulo

2016

DANIEL DE OLIVEIRA MOTA

MODELAGEM DA PROGRAMAÇÃO DE NAVIOS PARA
OTIMIZAÇÃO NO CANAL DE ACESSO AO PORTO DE SANTOS

Tese apresentada Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
título de Doutor em Engenharia

São Paulo
2016

DANIEL DE OLIVEIRA MOTA

MODELAGEM DA PROGRAMAÇÃO DE NAVIOS PARA
OTIMIZAÇÃO NO CANAL DE ACESSO AO PORTO DE SANTOS

Tese apresentada Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Doutor em Engenharia

Área de concentração:
Engenharia Naval e Oceânica

Orientador: Prof. Livre-Docente
Rui Carlos Botter

São Paulo

2016

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 13 de junho de 2016

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Mota, Daniel de Oliveira

Modelagem da programação de navios para otimização no canal de acesso ao porto de Santos / D. O. Mota -- versão corr. -- São Paulo, 2016.

169 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica.

1.Programação de Produção 2.Logística Portuária 3.Canal de Acesso 4.Pesquisa Operacional I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica II.t.

À todos os empreendedores (em qualquer área do conhecimento) que tem a paciência e a persistência de ter uma ideia e passar anos estudando, lapidando, melhorando, discutindo, construindo, desconstruindo e reconstruindo a mesma até que ela se torne aquilo que acadêmicos definem como “Tese de Doutorado”

AGRADECIMENTOS

Um grande e amigável agradecimento ao Prof. Rui Botter que como orientador, mesmo que de uma maneira informal, sempre esteve à disposição para discutir temas ligados à atividade portuária e operação de terminais e particularidades deste sistema logístico. Esta disponibilidade foi fundamental para a contextualização do problema de programação de produção e descoberta do que viemos a chamar de “*Logistic Scheduling*”.

Muito obrigado aos companheiros do CILIP (Centro de Inovação de Logística e Infraestrutura Portuária) que, cada um a sua maneira, contribuiu com observações, críticas, conhecimento, explicações e sugestões me ajudaram a direcionar este trabalho ao escopo apresentado. Ainda na equipe do departamento de Engenharia Naval, também agradeço àqueles que indiretamente ajudaram no trabalho, mas enormemente ajudaram ao Daniel no dia a dia: Suelem e Lânia, obrigado.

Professor Moisés pelas valiosas opiniões e críticas apresentadas ao trabalho durante a fase de elaboração do modelo conceitual para exploração de soluções menos técnicas e mais realistas: obras civis do canal, ou até mesmo relação da melhoria do sistema em relação ao frete, sempre trazendo considerações a tornar o trabalho mais realista e aplicável. Da mesma forma, aos professores Dr. Claudio Barbieri, suportando a parte de algoritmos do trabalho. Professor Dr. Miguel Santoro, que por várias vezes me recebeu para discussões conceituais sobre o trabalho, colaborando enormemente no meu aprofundamento neste vasto mundo chamado *Scheduling*.

Meus amigos do CTL (Center of Transportation and Logistics) e ML (Media Lab), ambos do MIT, que além de permitir que eu desenvolvesse a parte de otimização desta pesquisa em colaboração com a pesquisa desenvolvida durante o ano de 2015, deixou portas abertas para futuras aplicações desta pesquisa em colaboração. Meus amigos e companheiros de trabalho na Mauá que por vezes suportaram com flexibilidade nos horários com trocas e substituições para realização de disciplinas, trabalhos ou provas durante estes quatro anos de doutorado.

Agradeço aos meus familiares, em especial minha mãe e meu irmão pela paciência e ausência durante estes turbulentos anos de doutorado.

Em especial, agradeço a esta pessoa querida que faz parte da minha vida faz muitos anos chamada Carolina. Minha esposa, companheira, confidente e apoiadora que à

sua maneira sempre esteve presente em momentos importantes da minha vida, possibilitando o alcance deste grandioso objetivo acadêmico, profissional e pessoal. Agradeço a Deus por ter me dado força, serenidade e foco para iniciar e concluir este empreendimento ousado chamado Doutorado.

Por fim, agradeço a CAPES que incentiva a propagação da ciência no Brasil, possibilitando e suportando pesquisadores a levar o país a um patamar de pesquisas de “primeira linha”.

“MACTE, ANIMO! GENEROSE PUER, SIC ITUR AD ASTRA”
“Coragem, jovem. É assim que se alcança os céus”
(Lema do cadete da Academia da Força Aérea)

RESUMO

A gestão de um recurso para se obter a sua máxima ocupação requer não somente a técnica de planejamento adequada, mas também a consideração das incertezas durante o seu uso. Este trabalho utiliza o ponto forte das duas principais vertentes da pesquisa operacional: otimização e simulação em um contexto logístico portuário. Portanto, a técnica de programação de produção aplicada a um sistema logístico, associada à flexibilidade das aleatoriedades inerentes ao mesmo processo, provê aos tomadores de decisão de sistemas portuários um modelo matemático que auxilia na melhor ocupação de um canal de acesso aos terminais portuários. Assim, foi desenvolvido um modelo de otimização, inspirado no “*job shop*” aplicado em um sistema logístico, capaz de propor, partindo de um conjunto de navios, a melhor programação de acesso ao porto, através das informações relacionadas às operações portuárias. Uma vez estipulada a melhor programação, ela foi testada em um modelo simulação contemplando todas as etapas de um processo de carregamento/descarregamento de um navio em um terminal portuário, incluindo as incertezas de cada uma das etapas, bem como disponibilidade de ativos, regras de cruzamento e movimentações no canal. Através desta modelagem híbrida, obteve-se uma avaliação realista da proposta gerada pelo otimizador com a apuração dos resultados utilizando indicadores de desempenho atualmente empregados por profissionais de sistemas portuários como ocupação do sistema, tempo em fila e tempo de estadia do navio. Assim, foram comparados os impactos na mudança da forma de se operar um canal (liberando ou não o cruzamento dos navios durante seu curso) e calculados os ganhos operacionais de se programar os navios em sua entrada ao invés de simplesmente respeitar a ordem de chegada das embarcações.

Palavras-chave: Programação, logística portuária, canal de acesso, pesquisa operacional, simulação, otimização

ABSTRACT

The resource management in order to reach its maximum occupation requires not only the appropriate technique, but the incorporation of the uncertainties built in the process. This research uses the strength of each main streams of Operations Research: optimization and simulation in a logistic maritime context. Hence, the scheduling technique applied in a logistic system, and associated to the flexibility of having the uncertainties of its process provides the maritime logistic decision makers a mathematical model that helps them to deliver a better occupation rate of the canal to access the port terminals. To accomplish such objective, it was developed an optimization model, inspired in the job shop problem, and applied in a logistic system capable to propose, from a ship list, the best schedule, changing the order of entrance and exit of the vessels, using information related to its port operations. Once the best order of vessel is found, it was tested in a simulation model with most of constraints incorporated including all steps of the process, loading/unloading process, and all uncertainties within each step of the process (resources availability, navigation rules, safety, and operations policy). Such hybrid modeling technique, it was achieved a realistic evaluation of the optimization proposition, with the results measurements well known by the port practitioners, such as occupancy rates, waiting time, and complete service time (Makespan). To reach such evaluation it was compared the impact of changing the operations policy of the canal (allowing or not the crossing of the ships while navigating) and calculated the operational benefits of using a dispatching effort to coordinate the canal instead of respecting its arrival order.

Key-words: Scheduling, maritime logistics, access canal, operations research, simulation, optimization

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	– Distribuição por modal da matriz brasileira de transportes em 2011	30
Figura 2	– Participação dos modais no mundo – 2011	31
Figura 3	– Distribuição dos portos públicos no Brasil	32
Figura 4	– Movimentações (toneladas e navios) no Porto de Santos	33
Figura 5	– Visão integrada do porto.....	35
Figura 6	– Operação de chegada do navio ao terminal portuário através do canal de acesso.....	38
Figura 7	– Exemplo de operação no canal de Santos	39
Figura 8	– Dimensões avaliadas para o cruzamento.....	41
Figura 9	– Relação entre a largura do canal e a faixa de manobra do navio para navegação segura	42
Figura 10	– Caracterização da política de acesso ao canal	42
Figura 11	– Vista superior do canal de Santos.....	44
Figura 12	– Exemplo de um problema de programação de tarefas logísticas, com recirculação e continuidade parcial	54
Figura 13	– Esquema de um problema de programação.....	56
Figura 14	– Grafo original (esq.) e uma proposta de solução (dir.)	59
Figura 15	– Programação infactível	63
Figura 16	– Metodologia de criação do modelo de simulação.....	65
Figura 17	– Método proposto para análise da operação portuária.....	69
Figura 18	– Diagrama do problema modelado	70
Figura 19	– Diagrama do Modelo Conceitual do sistema	73
Figura 20	– Diagrama do Modelo Conceitual da Otimização – Grafo	75
Figura 21	– Gantt com e sem folga.....	76
Figura 22	– Exemplo ilustrativo da modelagem proposta.....	79

Figura 23 – Exemplo ilustrativo da modelagem proposta (detalhe de restrições)	79
Figura 24 – Programação exemplo (solução)	81
Figura 25 – Classe Atividade	83
Figura 26 – Classe tarefa	83
Figura 27 – Classe tarefa x Classe atividades	84
Figura 28 – Diagrama do Modelo Conceitual da Simulação.....	89
Figura 29 – Modelo conceitual do canal – Partições.....	91
Figura 30 – Representação esquemática da relação entre as taxas	93
Figura 31 – Linha do tempo de um navio	95
Figura 32 – Representação abstrata do espaço	96
Figura 33 – Representação abstrata do objeto	97
Figura 34 – Um objeto incorporado no espaço	98
Figura 35 – Objeto em seu espaço, considerando a distância de segurança	99
Figura 36 – Etapas de entrada e saída de um objeto	100
Figura 37 – Carta náutica do porto de Santos.....	104
Figura 38 – Metodologia de coleta de dados	105
Figura 39 – Dados brutos do site da praticagem	107
Figura 40 – Dados brutos após coleta pelo sistema automatizado.....	107
Figura 41 – Dados após tratamento e limpeza para análise	108
Figura 42 – Imagem Canal de Santos – partições	110
Figura 43 – Diagrama descritivo do Simulated Annealing	116
Figura 44 – Programação gerada pela ferramenta desenvolvida (Programação FIFO).....	117
Figura 45 – Programação gerada pela ferramenta desenvolvida (Programação otimizada – melhoria de 5% do makespan)	117
Figura 46 – Acompanhamento do processo de busca local do algoritmo.....	118

Figura 47 – Imagem do modelo de simulação desenvolvido	119
Figura 48 – Dados operacionais dos terminais	123
Figura 49 – Resultado FIFO (exemplo)	125
Figura 50 – Resultado otimizado: grafo problema (esq. topo), Gantt (dir. topo), histórico resultados (inferior)	126
Figura 51 – Resultado heurístico: grafo problema (esq. topo), Gantt (dir. topo), histórico resultados (inferior)	127
Figura 52 – Resultados CENÁRIO 1	129
Figura 53 – Resultados CENÁRIO 2 – LIBERADO.....	132
Figura 54 – Resultado CENÁRIO 3	134

Lista de Tabelas

Tabela 1	– Comparação de tempo de ciclo de diversos portos mundiais.....	33
Tabela 2	– Regras de despacho mais comuns.....	46
Tabela 3	– Taxonomia do problema de programação segundo Pinedo (2012) quanto a sua modelagem.....	47
Tabela 4	– Taxonomia do problema de programação proposto por Casavant (1988).....	56
Tabela 5	– Descrição de parâmetros do modelo de otimização	77
Tabela 6	– Descrição das variáveis de decisão do modelo de otimização.....	77
Tabela 7	– Formulação	78
Tabela 8	– Dados de performance do algoritimo	87
Tabela 9	– Principais características dos subsistemas modelados	88
Tabela 10	– Dados primários coletados para estudo	108
Tabela 11	– Classificação dos tempos de manobra por partição.....	111
Tabela 12	– Classificação dos tempos de operação	112
Tabela 13	– Tempos de operação.....	113
Tabela 14	– Dados históricos de navios atracados em Santos utilizados no estudo	114
Tabela 15	– Dados empregados na experimentação do modelo (Santos, 2012) .	120
Tabela 16	– Parâmetros gerais do modelo	121
Tabela 17	– Principais indicadores avaliados	124
Tabela 18	– Resumo cenário 1 (PIANC)	128
Tabela 19	– Resumo cenário 2 (LIBERADO)	131
Tabela 20	– Resumo cenário 3 (BLOQUEADO).....	133
Tabela 21	– Lista de contribuições (continua)	143

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	24
1.1.	OBJETIVO.....	25
1.2.	TÉCNICA.....	26
1.3.	CONTRIBUIÇÕES	26
1.4.	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	27
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
2.1.	SISTEMAS LOGÍSTICOS – LOGÍSTICA MARÍTIMA.....	29
2.1.1.	Contexto logístico nacional do transporte de carga.....	29
2.1.2.	Porto de Santos	32
2.1.3.	Caracterização do canal de acesso	39
2.1.4.	Políticas de cruzamento	40
2.2.	PROGRAMAÇÃO DE PRODUÇÃO	44
2.2.1.	Tipos de relação de precedência	47
2.2.1.1.	Máquinas simples	47
2.2.1.2.	Fluxo contínuo.....	49
2.2.1.3.	Fluxo celular	50
2.2.2.	Tipos de objetivos	52
2.2.3.	Variações de um problema de programação.....	52
2.2.4.	Redundância dos recursos	53
2.2.5.	Programação de operações logísticas	53
2.2.6.	Taxonomia complementar do problema de programação de tarefas	55
2.3.	MODELAGEM MATEMÁTICA.....	58
2.3.1.	Programação inteira.....	58
2.3.1.1.	Infactibilidades	63
2.3.2.	Simulação de eventos discretos.....	64

2.4.	MODELAGEM MATEMÁTICA DO CANAL DE ACESSO	65
2.5.	CONCLUSÃO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	67
3.	MÉTODO	69
3.1.	DESCRIÇÃO DETALHADA DO PROBLEMA.....	69
3.2.	MODELO DE OTIMIZAÇÃO.....	72
3.2.1.	Modelo conceitual da otimização	74
3.2.2.	Formulação matemática	77
3.2.3.	Dados de entrada	81
3.2.4.	Implementação.....	82
3.2.4.1.	Atividade.....	82
3.2.4.2.	Trabalho	83
3.2.4.3.	Heurística construtiva	84
3.2.4.4.	Lógica de busca local – 2opt.....	84
3.2.4.5.	Lógica de Metaheurística – Simulated Annealing.....	85
3.2.4.6.	Análise da otimização	87
3.3.	MODELO DE SIMULAÇÃO	88
3.3.1.	Modelo conceitual da simulação	89
3.3.1.1.	Tratamento das restrições físicas	95
3.3.2.	Dados de Entrada	101
3.4.	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A MODELAGEM PROPOSTA.....	101
4.	APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE SOLUÇÃO NO PORTO DE SANTOS	103
4.1.	O PORTO DE SANTOS	103
4.2.	TRATAMENTO DE DADOS	105
4.2.1.	Coleta de dados.....	105
4.2.2.	Consolidação	108

4.2.3.	Conclusões e discussões sobre os dados.....	109
4.3.	MODELAGEM CONCEITUAL.....	109
4.3.1.	Classificação dos tempos de manobra por partição.....	111
4.3.2.	Classificação dos tempos de operação.....	112
4.4.	MODELO DE OTIMIZAÇÃO.....	113
4.5.	MODELO DE SIMULAÇÃO.....	119
4.6.	RESULTADOS.....	124
4.7.	CENÁRIOS.....	124
4.7.1.	Detalhamento Perfil 1: FIFO (F).....	125
4.7.2.	Detalhamento perfil 2: Otimizado (O).....	126
4.7.3.	Detalhamento Perfil 3: Heurístico (H).....	127
4.8.	CENÁRIO 1 (PIANC).....	127
4.8.1.	Resumo executivo cenário 1 (PIANC):.....	127
4.9.	CENÁRIO 2 (LIBERADO).....	130
4.9.1.	Resumo executivo cenário 2 (LIBERADO):.....	130
4.10.	CENÁRIO 3 (BLOQUEADO).....	132
4.10.1.	Resumo executivo cenário 3 (BLOQUEADO):.....	132
4.10.2.	ANÁLISE RESULTADOS.....	134
4.10.3.	Impacto da diferença das políticas:.....	135
4.10.4.	Impacto da gestão pela otimização:.....	136
5.	DISCUSSÃO E CONCLUSÃO.....	138
5.1.	DISCUSSÕES SOBRE TEMAS RELEVANTES DO TRABALHO.....	138
5.1.1.	Análise das soluções da otimização.....	138
5.1.2.	Análise das soluções da simulação.....	138
5.1.3.	Visão holística do sistema.....	138
5.1.4.	Aplicabilidade das soluções encontradas.....	139

5.2.	CONCLUSÕES.....	139
	APÊNDICE A – Descrição e localização dos principais terminais portuários que operam no canal de santos.....	149
	APÊNDICE B – Análise dos dados coletados para configuração dos modelos.....	153

GLOSSÁRIO:

SEP	Secretaria dos Portos
CODESP	Companhia Docas do Estado de São Paulo
MARINHA	Força armada responsável pela condução de operações navais de diversas naturezas além da militar
ARMADORES	Pessoa ou empresa que explora comercialmente uma embarcação, podendo ser ou não o proprietário do navio
PIANC	World Association for Waterborne Transport Infrastructure

1. INTRODUÇÃO

A crescente busca pelo aumento na eficiência das diferentes etapas da cadeia de suprimentos desafiam pesquisadores a buscar técnicas inovadoras para serem aplicadas nos sistemas logísticos. Técnicas estas que muitas vezes foram exploradas e aplicadas com sucesso em um ambiente industrial de manufatura, porém pouco exploradas em um ambiente logístico, devido à sua complexidade e flexibilidade. Particularmente, esta pesquisa se refere às técnicas originadas da programação da produção (setor siderúrgico, automobilístico, etc.). Para investigar sinergias entre técnicas de manufatura e sistemas logísticos, a presente investigação visa contribuir ao estado da arte da logística operacional com uma visão quantitativa da pesquisa operacional, propondo um método de gestão das filas para o acesso do modal ao seu ponto de operação (carga ou descarga). Portanto a programação de produção aplicada a sistemas logísticos (tema central deste trabalho) divide-se em duas principais vertentes: programação da produção e sistemas logísticos, com abordagem explicada detalhadamente ao longo deste documento.

Dentre as diversas técnicas reportadas pela literatura referente à programação da produção, será explorada aquela conhecida como programação de tarefas (*scheduling*). Esta técnica, por sua vez, apresenta diversos desdobramentos, dependendo das premissas do sistema modelado. Na presente pesquisa, foi investigado o tipo de produção com característica de fluxo celular em relação ao seu roteiro de produção (*job shop*) com a aplicação das seguintes premissas: (1) roteiro flexível; (2) objetivo de redução do tempo de produção (*makespan*); (3) continuidade parcial (*partially no-wait*). Por outro lado, em relação à logística, embora o método proposto seja aplicável a diversos contextos empresariais, o foco foi dado ao sistema naval por acreditar-se que este sistema poderia ser muito melhor explorado pelo Brasil. Dentro do sistema naval, o estudo se concentra nas operações portuárias. Destaca-se, no contexto das operações portuárias, o elemento “canal de acesso”, no qual suas políticas de cruzamento foram investigadas à luz da modelagem matemática e de simulação.

Para aplicação da técnica proposta, foi realizado um estudo de caso utilizando os dados do Porto de Santos, situado no estado de São Paulo, medindo o impacto em suas operações quando feito o uso da técnica proposta.

O uso do método apresentado ao longo deste trabalho contribui tanto em termos logísticos, com o aprimoramento das operações portuárias, aumentando a eficiência do sistema, quanto em termos acadêmicos, propondo uma nova abordagem do problema de programação de produção com ênfase em operações logísticas.

1.1. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é apresentar um método de gestão da operação do canal de acesso de um sistema portuário que reflita em aumento de capacidade deste sistema.

1.2. TÉCNICA

O método proposto é composto por um modelo de otimização e um modelo de simulação de eventos discretos. O modelo de otimização foi baseado em um problema de programação da produção do tipo *job shop*, sujeito a condições parciais de *no-wait* e com o objetivo de buscar o menor intervalo de tempo em que será realizado o atendimento de todos os navios (*makespan*), utilizando a notação apresentada por PINEDO (2012), o problema será: $J_n | pnwt | C_{max}$. A partir da ordem de atendimento gerada pelo otimizador, o modelo de simulação foi alimentado com esta informação. Este, por sua vez, foi desenvolvido levando em consideração as características operacionais do porto utilizado como estudo de caso (Porto de Santos), inclusive as restrições físicas (estreitamento das margens e redução de calado), bem como as regras de navegação proposta por PIANC (INTERNATIONAL ASSOCIATION OF LIGHTHOUSE AUTHORITIES AND INTERNATIONAL MARITIME PILOTS ASSOCIATION, 1995) em suas regulamentações. Desta forma, poderão ser testadas de maneira experimental a programação proposta pela otimização. Pretende-se, assim, coordenar racionalmente a fila de acesso ao canal que pretere os terminais portuários, sem interferir nas operações de cada terminal. Marginalmente, apresenta-se o ganho de produtividade do canal conduza o sistema portuário a uma melhor ocupação do terminal (através da redução de seu tempo ocioso), porém não está no escopo deste trabalho o estudo detalhado a operação do

terminal, deixando este tema, portanto, para futuras investigações. A aleatoriedade do sistema, composto pelas incertezas naturais dos tempos de navegação e operação serão incorporadas no modelo de simulação de forma que os tempos serão tratados como variáveis aleatórias.

Para se modelar e resolver o problema proposto foram utilizadas duas ferramentas consagradas da pesquisa operacional: (1) otimização e (2) simulação. A otimização foi baseada no desenvolvimento de uma heurística de busca onde, inicialmente é construída uma primeira solução factível (ordem de chegada dos navios), em seguida a busca local que realizará movimentos na vizinhança da solução construída, com o objetivo de melhorar a solução incumbente (melhor solução até o presente momento da busca), e finalmente o emprego de uma meta-heurística, dentre as atualmente descritas pela comunidade acadêmica se optou pelo uso da *Simulated Annealing* por questões de desempenho e qualidade das soluções encontradas, conforme é discutido posteriormente neste documento. Para referência, cada instância de problema foi resolvida até sua otimalidade, utilizando softwares específicos. Em seguida, o resultado da otimização foi avaliado pela simulação, onde os detalhes do complexo sistema portuário foram retratados de forma a se obter os indicadores de desempenho realistas e utilizados pela equipe operacional do porto. Portanto, a execução dos modelos ocorre de maneira serial, em etapas diferentes do processo, sem algum mecanismo de realimentação.

Ressalta-se que este estudo fundamenta-se no uso de modelagem genérica, onde o mesmo modelo poderá ser utilizado por outros portos com a parametrização adequada.

1.3. CONTRIBUIÇÕES

Este trabalho busca expandir o conceito apresentado anteriormente na literatura específica de gestão portuária, incorporando flexibilidade à análise de um sistema portuário através da modelagem do canal de acesso sob a luz de um *job shop*, ao invés de *flow shop* conforme proposto por Castillio et. al (2010). O autor acredita que esta flexibilidade contribui ao estado da arte para os profissionais e pesquisadores da área, uma vez que o canal do Panamá (modelado por Castillo) opera exclusivamente em um único sentido em determinado momento: entrada ou saída,

por ser composto por uma sequência de eclusas. Diferente de boa parte dos sistemas portuários conhecidos, onde seus respectivos canais de acesso podem operar em ambos os sentidos simultaneamente.

Além da flexibilização na modelagem das rotas, grande parte dos trabalhos publicados sobre o assunto, até o presente momento, apresenta o ponto de vista da empresa de navegação (FAGERHOLT; RONEN, 2013), definindo roteiros de visitas das embarcações de forma a maximizar o volume de mercadorias transportadas e uso do ativo. Estes trabalhos enfatizam de maneira secundária o impacto dos roteiros na operação dentro do porto, que recebe navios com as mais diversas características. Como consequência, o nível de incerteza associado ao tempo de permanência do navio torna-se ainda mais elevado, prejudicando a roteirização planejada com grande antecedência. Este fenômeno é constantemente encontrado em projetos de roteirização e, independente de ser carregamento ou descarregamento, a operação de destino pode prejudicar todo um planejamento, uma vez que o destino possui suas próprias regras e políticas operacionais que nem sempre são levadas em consideração durante a otimização. Portanto, este trabalho busca criar regras claras e racionais para que o armador possa incorporá-las em seu planejamento, resultando em um esforço mais efetivo em sua programação.

1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Para se alcançar o objetivo proposto por este trabalho, o presente texto está organizado da seguinte forma: inicialmente foram introduzidos os principais aspectos da pesquisa, como a contextualização, objetivos, motivações e contribuições. Em seguida, no capítulo de revisão bibliográfica foram apresentados os principais trabalhos relacionados ao tema, além de todo o embasamento teórico necessário para suportar a abordagem proposta pelo autor. Modelagens matemáticas similares, e uma visão crítica dos motivos que levaram o autor a utilizar determinada ferramenta. No capítulo de número três foram apresentados todos os elementos conceituais do problema abordado neste trabalho. Inicialmente a formulação matemática do problema de programação, etapas da construção do grafo, bem como das restrições conjuntivas e disjuntivas. Em seguida, apresentam-se aspectos computacionais utilizados para a modelagem do problema, estrutura de dados apropriada, bem como as heurísticas utilizadas para solução do mesmo (heurística

construtiva, busca local e meta-heurística). Ainda no capítulo de modelagem matemática dá-se o detalhamento do modelo de simulação desenvolvido para realização do teste dos resultados propostos pela otimização. Através de uma abordagem sistêmica, detalha-se o comportamento de cada subsistema que compõe o sistema marítimo em estudo, com atenção especial ao tratamento de restrições físicas que fora desenvolvido para este estudo. Apresenta-se em seguida a estrutura colaborativa criada para o funcionamento de ambos os modelos sequencialmente, a forma de operação dos modelos bem como o fluxo de informações entre eles para correto emprego da solução proposta.

O capítulo quarto é dedicado à aplicação do método proposto no capítulo anterior, contextualizado ao porto de Santos. Através de dados históricos operacionais deste porto (2007 até 2013), parametriza-se ambos os modelos descritos anteriormente contendo cada detalhe da operação, bem como o volume demandado por cada terminal dentro do sistema em estudo. Suportado por dados reais, e estatisticamente tratados, estes dados caracterizaram a aplicação do método selecionado, e também o planejamento dos experimentos conduzidos através do método proposto.

No capítulo quinto foram discutidos os resultados atingidos após a etapa de experimentação realizada. Detalhes da solução exata do problema e suas limitações foram apresentados, e uma avaliação detalhada de cada etapa da construção da solução através do uso de métodos heurísticos. Por fim, retomada a ligação entre as técnicas matemáticas e a contextualização do problema através da exploração dos cenários e uma análise crítica do impacto dos números alcançados no contexto operacional portuário. E ainda, através de uma discussão dos resultados, foram apresentados aspectos quantitativos e qualitativos dos resultados alcançados, fragilidades e encaminhamentos da pesquisa. E em seguida, foram apresentados os próximos passos propostos para futura extensão desta pesquisa.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo consolida-se todo o material relevante consultado durante a presente pesquisa para a definição do estado da arte referente aos temas abordado pelo autor. Iniciando-se pela contextualização do transporte marítimo na realidade brasileira atual, foram identificados os principais elementos deste modal logístico e seus elementos, para que seja realizada, em seguida, a caracterização do canal de acesso aos terminais marítimos, principal objeto de estudo deste documento. Esta caracterização pontua suas regras operacionais, principalmente suas particularidades que possibilitam ou não a realização de cruzamentos (navegação de dois navios em sentidos opostos em um mesmo trecho). Então, ainda descrevendo as principais características do transporte marítimo, é apresentada a revisão bibliográfica de algumas propostas de modelagens já apresentadas em meios acadêmicos referentes ao canal de acesso aos terminais portuários.

Em seguida, são apresentados detalhes conceituais das técnicas de programação de tarefas abordadas por autores tradicionais desta área de pesquisa. Pelo critério de complexidade, discute-se desde o problema de máquinas simples, até o problema de fluxo celular (*job shop*), que será detalhadamente explorado neste documento, com seus parâmetros e restrições particulares ao problema estudado. Assim são apresentados os principais autores, e mais relevantes publicações realizadas neste tema. Segue-se a apresentação de duas propostas de taxonomia para o problema estudado, bem como métodos de solução exata e aproximada empregadas por pesquisadores para problemas semelhantes.

Finalmente, apresenta-se uma conclusão da revisão bibliográfica, indicando onde o método proposto por este trabalho se difere dos já relatados na literatura pela comunidade científica.

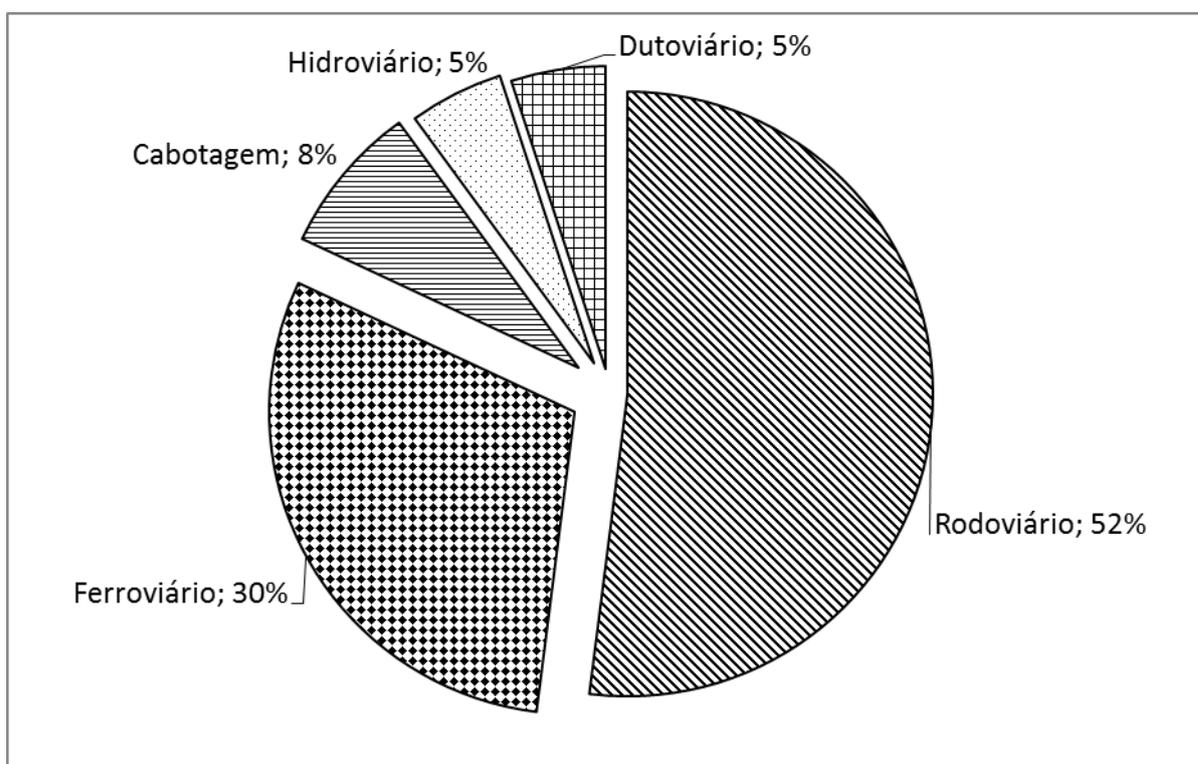
2.1. SISTEMAS LOGÍSTICOS – LOGÍSTICA MARÍTIMA

2.1.1. Contexto logístico nacional do transporte de carga

No Brasil, a partir do ano 2007, com a introdução de programas de crescimento do governo federal, muito se busca por formas de tornar o transporte de cargas ainda mais competitivo e eficiente.

De acordo com o PNL (Plano Nacional de Logística e Transportes) divulgado em 2011 pelo Ministério dos Transportes (“Ministério dos Transportes”, 2013), a matriz de transporte brasileira, em termos percentuais é segmentada conforme apresentado na Figura 1. Estes valores são referentes às quantidades em TKU (tonelada quilômetro útil) e levando em consideração todos os modos de transporte e todos os produtos, inclusive o minério de ferro que aumenta significativamente a participação do modal ferroviário.

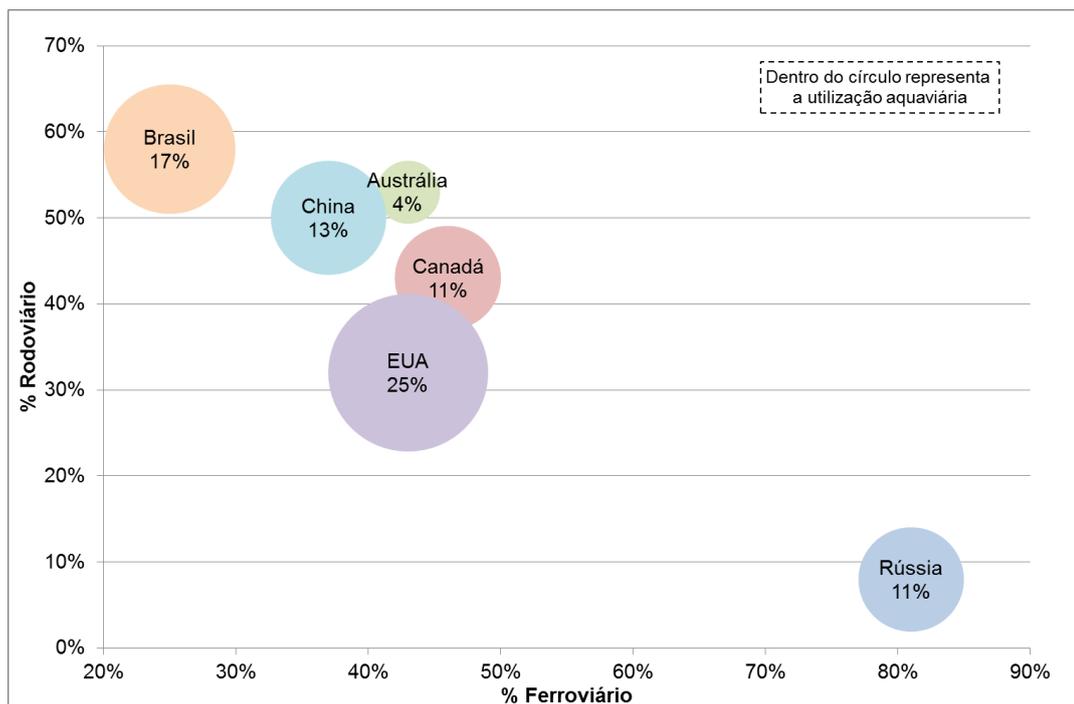
Figura 1 – Distribuição por modal da matriz brasileira de transportes em 2011



Fonte: PNL (Plano Nacional de Logística e Transportes), 2011

Existe um evidente desbalanceamento na distribuição entre o uso dos modais no Brasil, uma vez que, tradicionalmente, observa-se o predomínio do modal rodoviário em detrimento dos demais modais. O mesmo desbalanceamento não pode ser observado em países com logística mais desenvolvida, segundo relatório do Ministério dos Transportes (2013), conforme observado na Figura 2.

Figura 2 – Participação dos modais no mundo – 2011



Fonte: Ministério dos Transportes, (2013)

Diante da disparidade em relação a países como Estados Unidos, China e Rússia, o autor, através do presente trabalho, busca explorar a ineficiência gerada pelo elevado tempo de espera dos navios nos portos brasileiros, com a expectativa de que, através do aumento de produtividade deste, o modal aquaviário possa ganhar evidência a ponto de se tornar prioritário no Brasil, reduzindo custos e aumentando eficiência. Não existe a expectativa por parte do autor de que o problema abordado nesta tese venha a resolver toda disparidade mencionada, porém toda a ação que promova o aumento da eficiência e competitividade no país poderá representar um passo na direção desta solução.

Hoje a distribuição dos portos no Brasil se dá conforme mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Distribuição dos portos públicos no Brasil

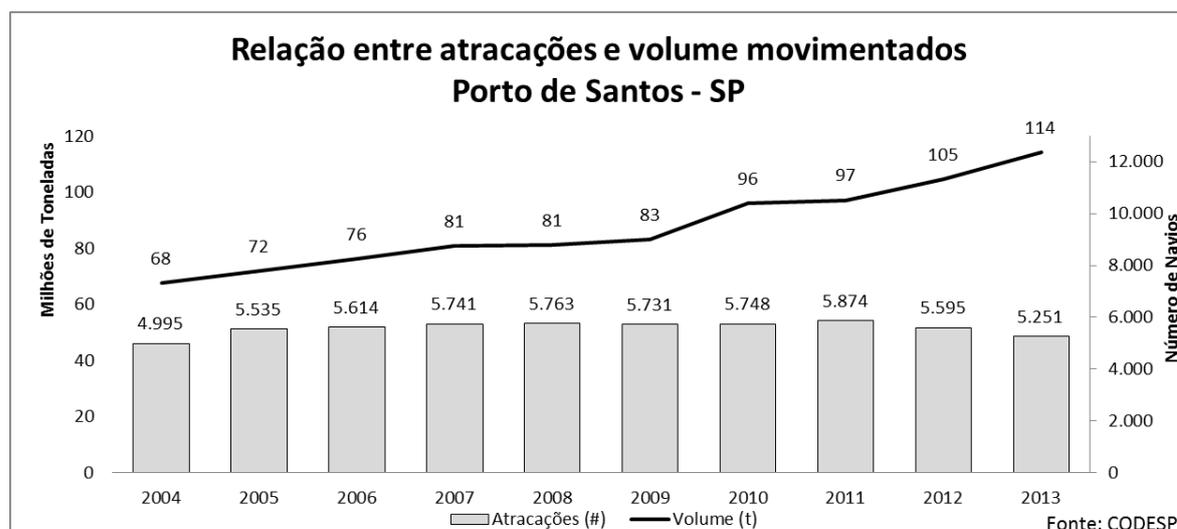


Fonte: Antaq, 2013

2.1.2. Porto de Santos

Dentre os portos brasileiros, destaca-se o Porto de Santos (CODESP, 2015), detentor do maior tráfego de embarcações na América Latina. Em 2011, a CODESP (Companhia Docas do Estado de São Paulo) divulgou o tráfego de aproximadamente 6000 embarcações (5.874 navios) atracando em terminais deste porto. Com expressivo crescimento nos últimos 10 anos (Figura 4), o aumento na eficiência deste porto representa um dos maiores desafios logísticos para o aumento de eficiência do comércio exterior no Brasil como um todo.

Figura 4 – Movimentações (toneladas e navios) no Porto de Santos



Fonte: CODESP

A dimensão deste volume de movimentação pode ser mais bem percebida quando, sob o ponto de vista do intervalo entre entradas. Neste caso, calcula-se que estas movimentações ocorreram a cada intervalo de aproximadamente 90 minutos (89,5 minutos para maior precisão), ou seja, um navio ingressou-se no porto a cada 90 minutos. Quando comparado com portos referência no mundo, tem-se uma melhor percepção da intensidade deste valor (Tabela 1).

Tabela 1 – Comparação de tempo de ciclo de diversos portos mundiais

País	Porto	Ano	Tempo entre chegadas	Fonte
Cingapura	Cingapura	2013	4 min	http://www.mpa.gov.sg/
Holanda	Roterdã	2013	17 min	http://www.portofrotterdam.com/
Bélgica	Gent	2012	32 min	http://www.portofghent.be/
Bélgica	Antuérpia	2013	37 min	http://www.portofantwerp.com/
Bélgica	Zeebrugge	2012	67 min	http://www.zeebruggeport.be/
EUA	Houston	2012	65 min	http://www.portofhouston.com/

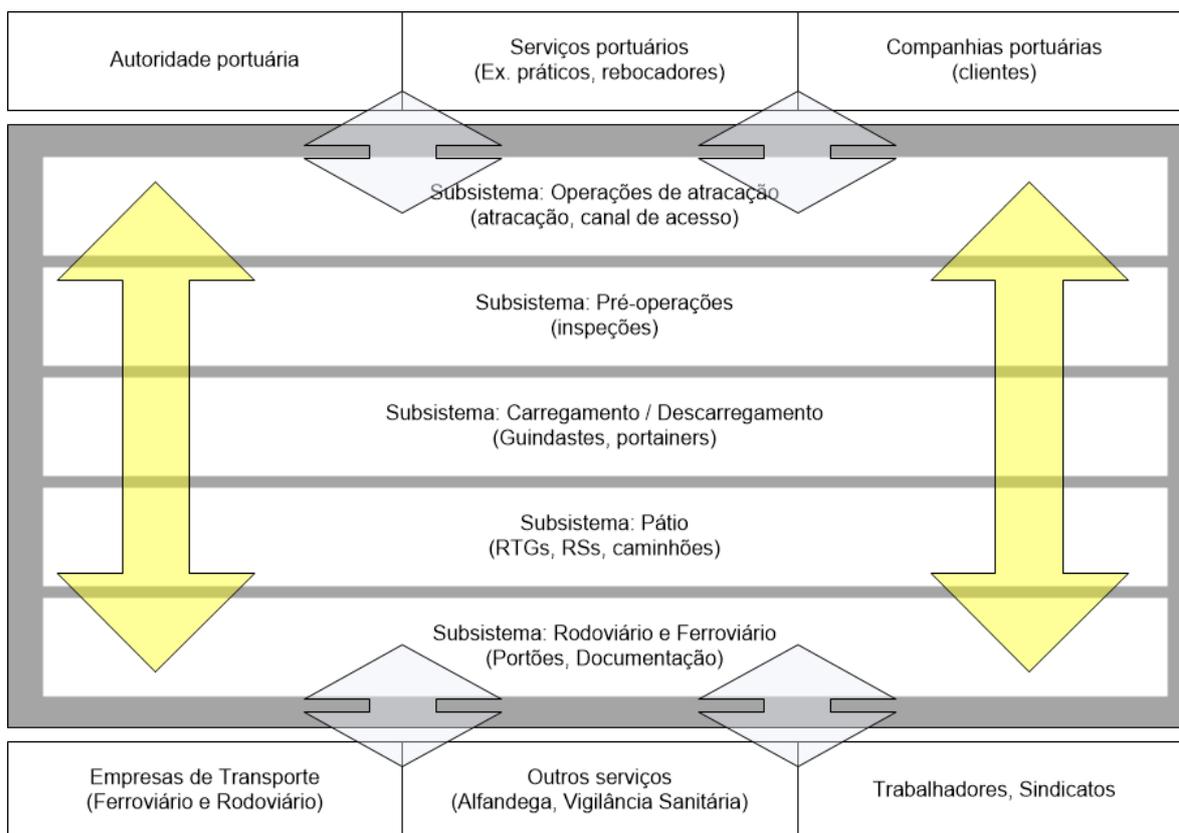
De acordo com a Organização Mundial do Comércio (2013) esses valores tendem a mudar de maneira expressiva, impulsionados pelo crescimento econômico ao qual o mundo, em particular os países emergentes, estava sujeito até o primeiro semestre de 2013. A própria CODESP (2013) estima que em aproximadamente 10 anos este

número de movimentações será superior a 12.000 movimentações anuais (tempo de ciclo de aproximadamente 45 minutos).

Segundo MEINDL et. al (2013), o transporte marítimo é o modal mais eficiente dentre as diversas opções (rodoviário, ferroviário, aeroviário, e dutos) para grandes volumes de mercadorias. Esta característica o torna ideal quando empregado para longas distâncias, embora seja o de menor velocidade dentre a maioria dos modais. Essa baixa velocidade é impactada de maneira significativa não somente pelo tempo de transporte em si, mas também pela forma de operação dos portos e terminais, quando o navio fica sujeito a diversas situações de espera. Estas esperas são realizadas em áreas denominadas áreas de fundeio, que são regiões delimitadas em mar aberto, próximas à entrada do canal de acesso aos portos. Nessas áreas ficam ancorados os navios a serem atendidos pelo porto ao qual se destina. A importância da área de fundeio para o gerenciamento da fila de navios reside na acumulação de navios aguardando para o ingresso ao porto. Portanto, esta acumulação pode gerar oportunidades de melhorias quando investigada a política de atendimento dos navios.

De acordo com Alfredini (2009), um porto pode ser representado de maneira simplificada como um grande sistema que é composto por subsistemas conforme o diagrama a seguir (Figura 5).

Figura 5 – Visão integrada do porto



Fonte: CILIP

Através da representação do porto pelo meio de seus subsistemas (Figura 5), percebe-se que, por se tratar de uma sequência de componentes em série, uma falha que porventura ocorra em qualquer etapa irá acarretar em uma interrupção no sistema como um todo, gerando gargalos de grande impacto no fluxo de materiais tanto de importação quanto de exportação. Portanto, fica evidente o caráter crítico assumido por qualquer etapa deste sistema. A criticidade somada ao alto custo da infraestrutura portuária dificulta a existência de redundância para o aumento da confiabilidade do sistema. Assim, a melhoria na eficiência de qualquer etapa desse processo poderá acarretar em melhoria na eficiência do sistema como um todo.

Particularmente, este trabalho investigou o impacto gerado pela gestão do subsistema canal de acesso. Através do estudo de suas particularidades, políticas de operações, regras de cruzamento e priorização das embarcações pretende-se demonstrar como a gestão deste pode impactar a eficiência de um porto.

O canal de acesso, ou simplesmente canal, representa um conjunto de recursos compartilhados por todas as embarcações que operam nos modais aquaviários (navios, barcaças, e rebocadores). Para que essas embarcações sejam liberadas para navegar pelo canal elas precisam aguardar em duas filas independentes: (1) a fila do berço, que antecede aos ativos do terminal; e (2) a fila do canal, que se refere à ocupação do canal propriamente dita. Desta forma, a embarcação somente pode ocupar o canal durante o seu percurso de navegação até sua atracação (liberando o canal para o próximo navio trafegar) quando existe a disponibilidade de ambos os recursos. Portanto, durante a entrada do navio, o trecho do canal que vai desde a sua entrada até o terminal de destino deve estar liberada; já na saída, o trecho que vai desde o terminal em uso até o oceano deve estar desocupado.

O impacto gerado pela forma de gestão do canal ocorre através da variação na capacidade de recebimento de embarcações de um porto, pois existem regras denominadas “regras de navegabilidade” que restringem esta capacidade a fatores como: (1) porte da embarcação recebida; (2) distanciamento de segurança entre as embarcações; e também (3) condições em que o canal poderá operar em um único sentido, ou em mão dupla. Internacionalmente, o órgão que define quais são as regras aplicadas em determinado canal é PIANC¹ (The World Association for Waterborne Transport Infrastructure). Com fins não governamentais, essa entidade define as regras de tráfego de embarcações, visando garantir a melhor manobrabilidade e maior segurança durante o curso de uma embarcação.

A alta movimentação do Porto de Santos, associada às regras restritivas estipuladas pela PIANC, e somada também a uma desatualização tecnológica por parte do órgão gestor do canal referido expõe a baixada santista (região localizada o Porto de Santos) em manchetes de mídias impressas e digitais como um exemplo do gargalo logístico ao qual o Brasil está sujeito. A divulgação do elevado número de navios aguardando a disponibilidade do canal para atingir o terminal foi notícia veiculada em todo o mundo (G1, 2013a). Não raro, no ano de 2013, informações de que o tempo de navios fundeados (aguardando seu momento de ingressar ao canal) superou uma semana. Segundo dados da própria CODESP, em 2012 o número de navios que esperaram acima de 72 horas para entrar no canal foi de 25,1%, o que significa que

¹ Esta associação, segundo sua própria descrição, é uma organização estabelecida em 1885, sem fins lucrativos, visa consolidar as melhores práticas sob a ótica de especialistas do segmento.

cerca de 1500 navios aguardaram todo este período antes de poder navegar na direção do terminal. Problema este influenciado tanto pela falta de infraestrutura dos terminais, quanto pela ocupação do canal.

Ferramentas tecnológicas como VTMS (Vessel Traffic Management System), que visam adquirir e gerenciar informações em tempo real das embarcações estão, gradualmente, se tornando presentes nos grandes centros marítimos. Estes sistemas servem como grandes bancos de dados, coletando diversas informações de uma embarcação; porém, com o enfoque no navio, estes perdem a visibilidade do cenário encontrado pelo mesmo ao chegar a um porto. Gerando pouco resultado para a gestão do canal propriamente dita.

Com base na necessidade de melhor coordenar a entrada e saída dos navios, foi identificada a técnica de programação, originada de sistemas de manufatura, como uma forma de garantir uma alta ocupação do canal e, ao mesmo tempo, fluidez no mesmo, através da coordenação estratégica da fila de embarcações de modo a reduzir o tempo de espera.

Além do conhecimento público da expectativa de incremento do número de movimentações do canal, existe uma demanda por ferramentas gerenciais por parte dos órgãos competentes (SEP, CODESP, MARINHA, ARMADORES), uma vez que o tempo de espera dos navios gera prejuízo para todos os órgãos envolvidos.

Adicionalmente, com a MP (medida provisória) dos portos (G1, 2013b), espera-se que um grande número de novos terminais a serem construídos no Brasil, e um aplicativo deste porte pode auxiliar de maneira significativa a coordenação deste novo cenário, ao qual o Brasil irá ingressar.

Vários problemas da logística marítima foram abordados pela literatura, que vão desde o estudo físico da embarcação, o roteiro percorrido pelo navio durante sua viagem e sua operação quando está carregando ou descarregando em um ambiente portuário. Como o foco deste trabalho está na operação portuária, à estrutura física do navio, bem como seu roteiro percorrido poderão ser alvo de futuras pesquisas. Mesmo no ambiente portuário, o navio interage tanto com os terminais quanto com o canal de acesso. O último foi o principal objeto de investigação no presente trabalho. Por fim, mesmo o canal de acesso apresenta diversos tipos de problemas em relação ao uso de rebocadores, ou situação da dragagem. Mas, o autor direcionou

sua atenção ao estudo das políticas de cruzamento dos navios. Para tal, uma revisão e caracterização do canal de acesso são de fundamental importância para a compreensão do problema em estudo.

A entrada de um navio no terminal de operação pode ser observada esquematicamente através da Figura 6. Em (1) tem-se a região de entrada do navio, que após o término de sua espera na área de fundeio é conduzido pela praticagem pelo canal de acesso (2). Durante este transito, o navio está sujeito à política de cruzamento em exercício no canal, podendo sofrer ou não influência da largura do navio. Estas políticas são detalhadamente exploradas no decorrer deste estudo. No ponto (3), o navio em questão atinge seu terminal de operação, e irá iniciar o procedimento de atracação. Uma vez atracado, ele pode ser mais bem representado pela Figura 7.

Figura 6 – Operação de chegada do navio ao terminal portuário através do canal de acesso

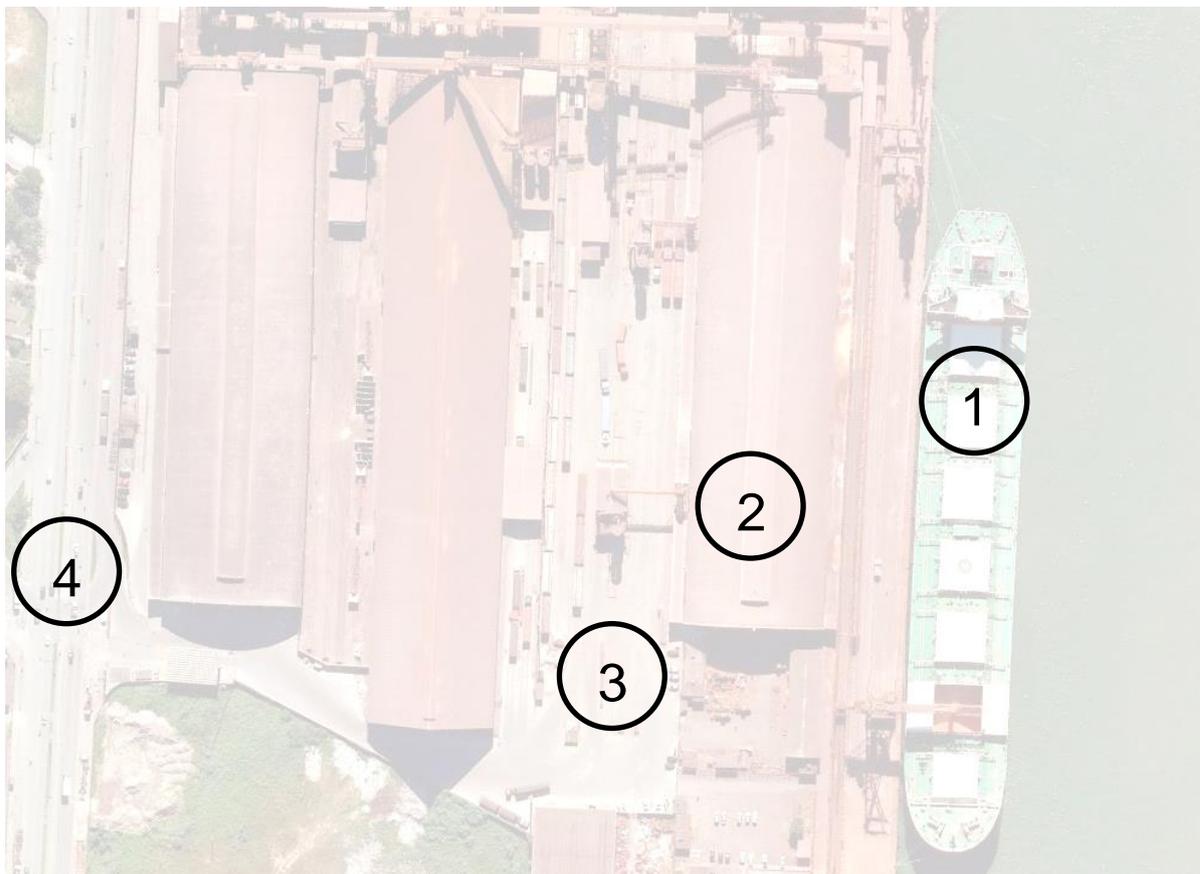


Fonte: Google Maps (acesso 23/01/2016)

Uma vez atracado, o navio (1) pode iniciar o processo de carregamento, com fluxo de material no sentido (2) para (1); ou descarregamento, com fluxo de material no

sentido (1) para (2). Assumindo descarregamento, para exemplificação, o produto armazenado em (2) é transportado para modais terrestres (rodoviários e/ou ferroviários) que percorrem caminhos dentro do terminal (3) para transporte em sua hinterlândia (zona de influência) através das rodovias e ferrovias nacionais (4).

Figura 7 – Exemplo de operação no canal de Santos



Fonte: Google Maps (acesso 23/01/2016)

Embora não seja foco do presente estudo, é de suma importância à compreensão apropriada das operações portuárias como um todo, pois a decisão de entrada e saída do navio sofre influência do prévio preparo da carga (no caso da exportação), ou espaço livre (no caso de importação). Assim, a autoridade portuária deve atuar de maneira autônoma, coordenando apenas a entrada e saída dos navios, sem sofrer influência pela gestão interna do terminal.

2.1.3. Caracterização do canal de acesso

O ingresso de uma embarcação, sua navegação desde o mar aberto até a região de carga e descarga dos terminais, precisamente dos berços de atracação se dá

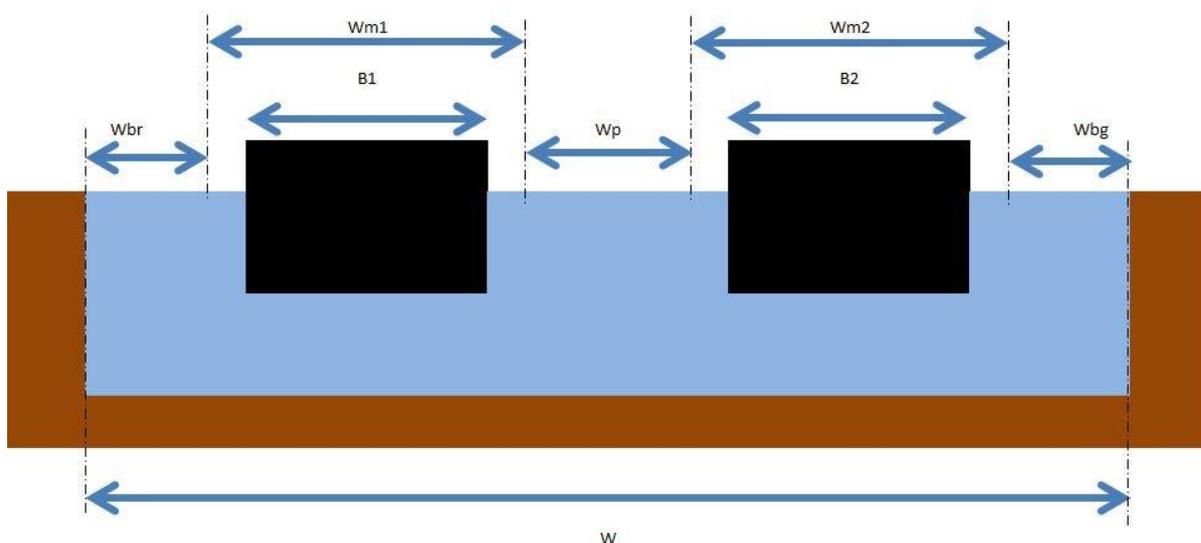
através de um recurso denominado canal de acesso. A construção desta estrutura precisa levar em consideração aspectos como maré, efeitos da onda, calado da embarcação, geometria do navio e margens de segurança para eventuais movimentações indesejáveis das embarcações. Neste trabalho, a característica relevante para o processo de modelagem refere-se aos aspectos relacionados à largura do canal, uma vez que sua largura irá restringir ou não a possibilidade da realização de cruzamentos dos navios durante o seu curso. Segundo Alfredini (2009), o comprimento do navio exerce influência na manobrabilidade do navio no canal no momento do giro da embarcação, sendo recomendado que bacias de evolução (áreas destinadas a manobras de giro) tenham uma área circular cujo diâmetro seja idealmente de quatro vezes em relação à embarcação-tipo, podendo ser reduzida ao mínimo de duas vezes este diâmetro ao custo de aumento do tempo de manobra e uso de recursos de máquina e leme da embarcação além da assistência de rebocadores. Porém, devido às características do canal em estudo (canal de acesso ao porto de Santos), as embarcações são mais afetadas pelo impedimento de se cruzar embarcações, a questão do giro poderá ser abordada em uma investigação futura.

Um canal de acesso pode ser delimitado por boias sinalizadoras. Estas delimitam a chamada "faixa balizada". Segundo Alfredini (2009), os canais podem ser subdivididos quanto sua localização em: (1) externos, quando expostos à agitação ondulatória; ou (2) internos, quando abrigados das ondas.

2.1.4. Políticas de cruzamento

Já quanto ao sentido do seu tráfego, um canal pode ser: (1) mão única, quando este permite somente um sentido de navegação por vez; (2) mão dupla, quando a largura do canal permite a navegação segura em ambos os sentidos simultaneamente. Para que um canal seja considerado mão dupla, o mesmo deve respeitar regras e práticas sugeridas pela PIANC. Essas regras são baseadas nas distâncias destacadas na Figura 8.

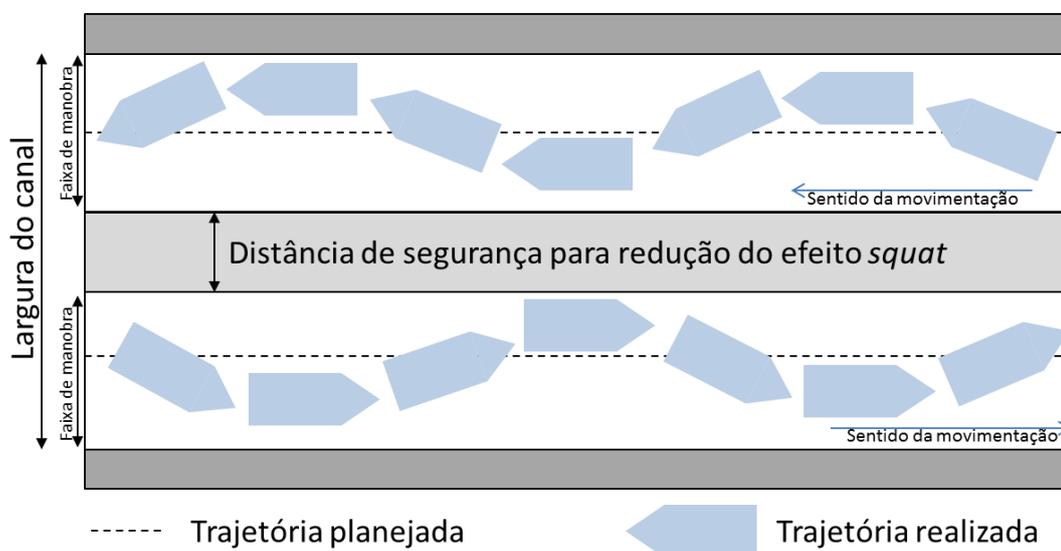
Figura 8 – Dimensões avaliadas para o cruzamento



Fonte: ALFREDINI; ARASAKI (2009)

A distância mínima central (W_p) entre os navios recomendada pela PIANC é variável, e dependente de fatores como a manobrabilidade da embarcação, velocidade, ventos da região, e correntes marítimas às quais a embarcação está sujeita durante a navegação. Para ilustração do motivo da imposição desta distância, espera-se reduzir a chance de que uma embarcação sofra o efeito *squat* (ALFREDINI; ARASAKI, 2009). Este efeito é definido como o afundamento paralelo de uma embarcação. Em virtude da trajetória irregular percorrida por um navio (Figura 9), somada ao efeito descrito anteriormente a navegação em mão dupla de um canal de acesso em geral é evitada, mesmo em situações em que esta encontra amparo nas regras vigentes.

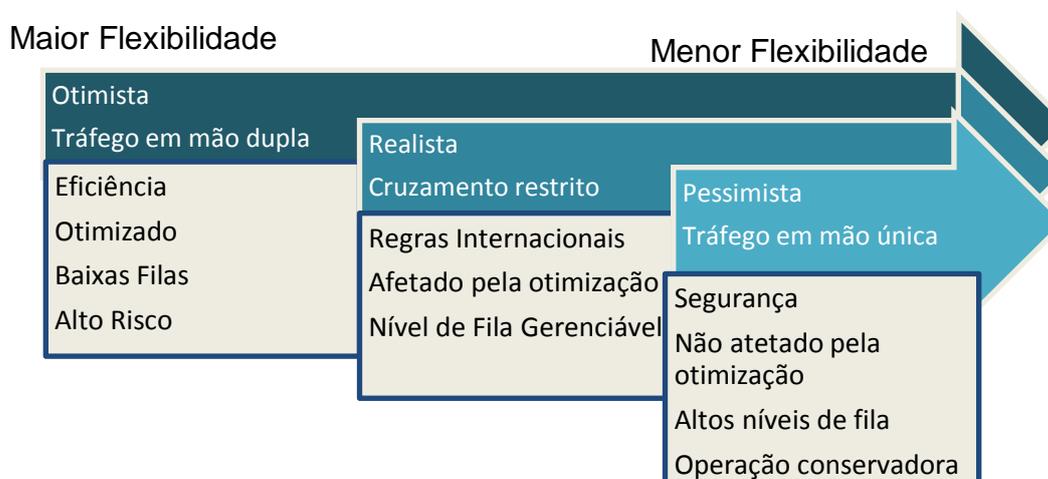
Figura 9 – Relação entre a largura do canal e a faixa de manobra do navio para navegação segura



Fonte: ALFREDINI; ARASAKI (2009)

Apesar da necessidade de uma operação em segurança, garantindo a distância entre as embarcações para que não ocorram colisões, existe margem para se aumentar a produtividade de um canal de acesso quando se emprega a navegação em duas direções. De acordo com o estudo realizado pelo autor (MOTA, 2014), em parceria com o MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), as diferentes formas de acesso ao terminal, e suas particularidades podem ser caracterizadas de maneira qualitativa segundo os critérios apresentados na Figura 10.

Figura 10 – Caracterização da política de acesso ao canal



Fonte: Mota (2014)

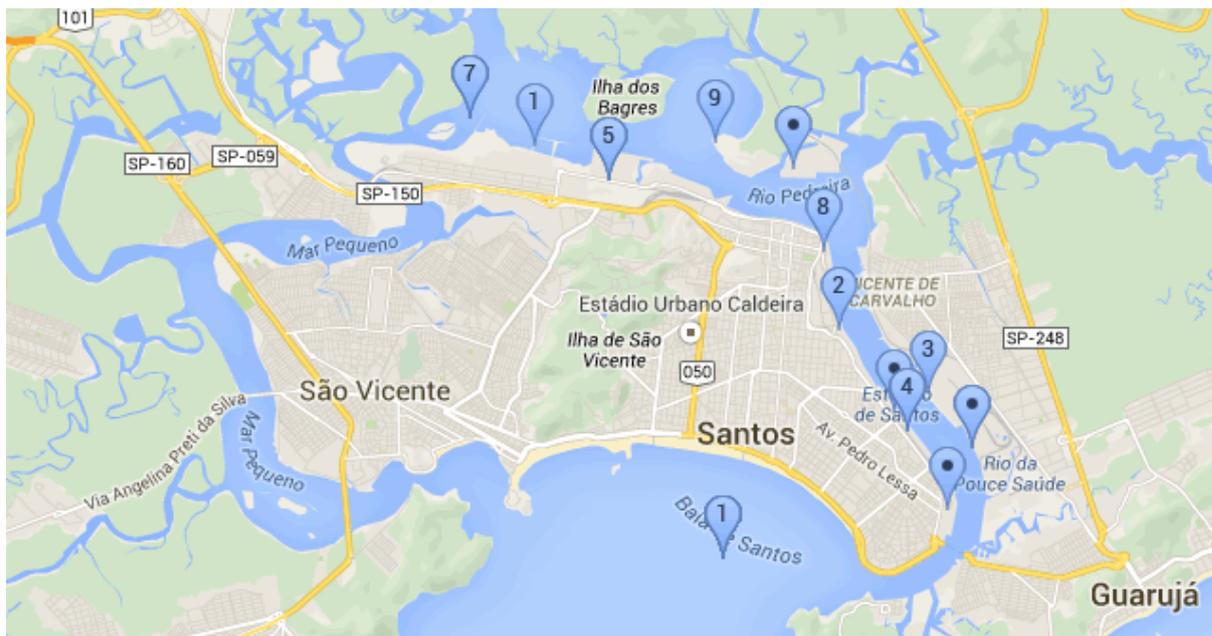
Conforme classificação proposta, o tráfego bidirecional favorece a melhor utilização do canal, uma vez que o mesmo recurso pode ser ocupado por duas embarcações simultaneamente, em sentidos diferentes. Porém, em busca de uma operação segura, autoridades portuárias tendem a assumir uma postura conservadora, evitando o cruzamento de embarcações em sentidos opostos.

A relaxação da restrição referente à forma de operação do canal é de grande interesse dos principais órgãos envolvidos em um sistema portuário. Se, por um lado, o armador poderia garantir uma melhor ocupação de seus ativos, ocupando mais sua frota, reduzindo o tempo em fila das embarcações, por outro lado, o órgão gestor do canal de acesso aos terminais portuários, conhecido como praticagem, precisaria aumentar seus custos em treinamento, monitoramento, e controle das embarcações dentro do canal. Esse embate perdura por um longo período nos portos brasileiros, não havendo um sinal de solução prática para o curto ou médio prazo. Em termos objetivos, uma forma de endereçar esse embate é através da percepção de que a forma como o porto gerencia o sentido do seu tráfego interfere diretamente no tempo de fila aos quais os navios estão sujeitos.

Ao anunciar sua chegada, um navio realiza a marcação na agenda do porto denominada NOR (*Notice of Readness*). No momento desta marcação, inicia-se a contagem de tempo em fila. Geralmente, o navio aguarda sua autorização de manobra (movimentação dentro do canal de acesso) posicionando-se em uma região denominada "Área de fundeio". Essa região é especificamente destinada à espera pelo momento em que o navio ingressará ao canal de acesso.

Com a autorização da autoridade portuária, o práctico (profissional responsável pela condução do navio em águas abrigadas) realizará a condução do navio rumo ao terminal, lançando mão ou não de rebocadores (navios auxiliares, com alta potência cujo papel é o auxílio da manobra dentro do canal). Ao chegar na região do terminal, a embarcação deverá atracar no berço e iniciar o processo de pré-operação. Neste momento ocorre a amarração, transações documentais, e liberação do práctico para que seja iniciada a operação do navio. Todo esse procedimento ocorre na região chamada "Zona Portuária" representada na Figura 11.

Figura 11 – Vista superior do canal de Santos



Fonte: o autor

Esta dinâmica de entrada e saída dos navios, associada ao volume de embarcações demandando acesso ao canal, ao espaçamento de segurança entre as embarcações e ao regime de gestão do canal, quanto à política de cruzamento, provoca a saturação nesse recurso restrito, e em série com as demais etapas do processo de navegação, causando filas de grandes proporções na região do fundeio, fazendo, conseqüentemente, com que as embarcações aguardem prolongados tempos, causando ineficiências no sistema como um todo (MOTA; PEREIRA, 2013).

2.2. PROGRAMAÇÃO DE PRODUÇÃO

O conceito de programação de tarefas foi inicialmente concebido para a indústria, como uma técnica de gerenciamento de recursos. Apresentada com maior rigor acadêmico à partir dos anos 50, esta técnica é baseada no uso de regras de despacho ou regras de programação e restrições inerentes ao processo, para definir em qual sequência, e em que momento as tarefas devem ser iniciadas de modo a minimizar o tempo ocioso do recurso canal de acesso (formado por diversos recursos internos), aumentando a ocupação do mesmo, e conseqüentemente a sua eficiência. Apoiando-se na conceituação proposta por HANSEN (2006), uma forma herdada de contextos industriais para se medir eficiência de um sistema se dá

através da razão entre o tempo de operação do sistema e o tempo total decorrido (também conhecido por tempo calendário).

Sob o enfoque um pouco mais abrangente, PINEDO (2012) apresenta uma definição clara e precisa quanto à programação de tarefas. Para Pinedo, a programação é um processo de tomada de decisão usado regularmente em indústrias de manufatura e serviços com foco de lidar com a alocação de recursos tarefas em um menor tempo possível, respeitando as restrições operacionais que podem ser exemplificadas como: precedências, disponibilidade, ou compatibilidade. A meta desta técnica é minimizar o tempo de execução destas tarefas, seguindo a priorização desejada pelo despachador. O mesmo relata aplicações desta técnica que compreende máquinas em uma manufatura, pistas de aeroporto, trabalhadores da construção civil, unidades de processamento em um ambiente computacional, dentre outros.

A implementação da programação de tarefas, bem como o controle de sua execução e ajustes é realizado por um gestor de tarefas, tradicionalmente na literatura referido como “agente despachador”. A função deste agente em um sistema real pode ser realizada por um supervisor de operações, cujo papel é mobilizar uma equipe de empregados para receber as informações do ambiente (condições meteorológicas, quebra de equipamentos, e queda em eficiência em alguma etapa do processo). Segundo VOLLMANN, et al. (1997), aplicar o despacho (programação) em um processo, envolve o uso de regras lógicas que guiam a priorização de tarefas durante sua execução. As regras de programação podem variar desde simples regras, como a classificação crescente do tempo de processamento de cada tarefa, até regras complexas que levam em consideração os gargalos operacionais, data prometida ao cliente, e data de validade do produto. Na Tabela 2 podem-se perceber cinco exemplos de regras eleitas por Vollmann como principais.

Tabela 2 – Regras de despacho mais comuns

Símbolo	Nome	Descrição
R	Aleatório	Qualquer tarefa é alocada com igual probabilidade
FCFS	O primeiro a chegar é o primeiro atendido	Atendimento na ordem de chegada
SPT	Tempo de processamento mais curto	Tarefa com menor tempo de processamento é alocada com maior prioridade
EDD	Data de entrega mais próxima	Reduz o atraso das ordens
CR	Razão Crítica	Calcula o índice de prioridade através da razão entre (tempo disponível / lead time)

Sabe-se que muitas dessas regras possuem eficiência restrita a contextos bastante específicos de planejamento, pois somente podem ser aplicadas em arranjos produtivos simples, ou seja, processos produtivos com baixa complexidade ou poucas etapas. Ou ainda, em condições particulares, que podem ser revisadas por MORTON e PENTICO (1993). Portanto, um problema de programação de produção (*scheduling*) trata da alocação de recursos produtivos escassos às atividades (ordens de produção) com o objetivo de otimizar uma ou mais medidas de desempenho (LEUNG, 2004). Assim, primeiramente são revisados os principais aspectos das técnicas de programação de tarefa já discutida na literatura, e em seguida é apresentada uma categoria proposta no presente documento chamada “programação de tarefas logísticas”.

O estudo da programação de tarefas parte da correta classificação da estrutura do problema, ou seja, a disposição dos recursos que serão programados. Pinedo (PINEDO, 2012) segmenta as estruturas de programação em três grandes grupos, dependendo do arranjo formado pelos recursos: (1) Máquinas Simples; (2) Fluxo de Máquinas; e (3) Programação aberta. Outro critério importante na definição da técnica de programação a ser empregada é a sua função objetivo, que é a expressão matemática das intenções por parte do programador das tarefas. Neste trabalho, as análises se limitarão ao estudo da minimização do tempo total de execução “*Minimum Makespan*” uma vez que o sistema portuário como um todo tem como objetivo atender a todos os navios no menor tempo possível. Funções como menor atraso, bem como menor penalização por não atendimento da meta serão deixadas para uma investigação futura (pois poderão ser associadas à janelas de programação, ou custo de frete e multas por atraso). Da mesma forma, neste documento serão discutidas técnicas em que as tarefas não podem ser

interrompidas “*nonpreemptive*”, uma vez que no sistema logístico em estudo, não seria realista assumir que uma tarefa (navio) pudesse interromper seu curso, dado que fisicamente ele já percorreu parte dele.

Portanto, existe a visão operacional do problema proposta por Pinedo (2012) que classifica o problema de programação de acordo com o diagrama mencionado anteriormente neste mesmo capítulo. Esta taxonomia é resumida na

Tabela 3.

Tabela 3 – Taxonomia do problema de programação segundo Pinedo (2012) quanto a sua modelagem.

Número de máquinas		Recursos redundantes?		Relação de precedência				Classificação
Uma	Várias	Sim	Não	Não tem	Rígida e homogênea	Rígida e heterogênea	Flexível	
X			X	X				Máq. Simples
	X	X		X				Máq. Paralelas
	X		X		X			<i>Flow-shop</i>
	X	X			X			<i>Flow-shop flex.</i>
	X		X			X		<i>Job-shop</i>
	X	X				X		<i>Job-shop flex.</i>
	X		X				X	<i>Open-shop</i>

A classificação quanto aos grupos mencionados leva não somente à taxonomia dos problemas em estudo, como também pode auxiliar no direcionamento de qual será a regra adequada a cada contexto. Cada um destes grupos é detalhado a seguir, sendo eles: (1) Tipos de relação de precedência; (2) Variações de um problema de programação de produção; (3) Tipos de objetivos; (4) Redundância dos recursos.

2.2.1. Tipos de relação de precedência

2.2.1.1. Máquinas simples

Por se tratar da estrutura primária da programação, o contexto de máquinas simples possui o mais alto nível de agregação possível em um sistema produtivo. Apesar do nome, esta classe de problema é de extrema importância para o estudo de programação de tarefas, uma vez que dependendo da premissa empregada, qualquer problema complexo pode ser simplificado a uma máquina simples para

uma primeira exploração e compreensão do problema, teste de heurísticas e validação de solução.

Este grupo contém: (1) Máquina simples singular que preenche o caso mais simples de programação. Neste caso, todas as tarefas devem ser executadas por um único recurso; (2) Máquinas paralelas iguais, caso onde existem máquinas idênticas que podem executar as tarefas em igual tempo e qualidade; (3) Máquinas paralelas com tempos independentes, cenário onde os recursos possuem tempos de processamento diferentes entre si, porém a tarefa possui um tempo de processo independente do recurso que irá recebê-lo; e por fim, (4) Máquinas paralelas com tempos dependentes, neste caso, sendo o mais genérico dos casos de máquinas simples, o tempo de processamento da tarefa dependerá de qual recurso irá executá-lo, e não da ordem em que este será executado.

Para o caso (1) o tempo de execução de todas as tarefas é independente da programação realizada, uma vez que o tempo de execução é igual à soma do tempo de execução de cada tarefa (PINEDO, 2012). Porém, se as tarefas apresentarem tempo de setup dependente da ordem alocada, este apresenta vantagem em se programar as tarefas, pois a decisão de qual tarefa será realizada antes em oposição à outra pode apresentar redução no tempo total de execução do conjunto de tarefas a serem executadas.

Seu caráter combinatório leva à classificação deste problema como NP-Difícil (*NP-Hard*), e uma proposta de solução para este tipo de problema passa pela modelagem de um TSP (problema do caixeiro viajante), onde as cidades visitadas representam a ordem em que as tarefas são executadas.

O termo P de acordo com PAPADIMITRIOU et al. (2006), vem de "polinomial", acompanhado do N (formando NP), origina de "tempo polinomial não determinístico", termo cunhado da teoria de complexidade da Ciência da Computação. Este termo é empregado para indicar que a solução de qualquer problema de busca pode ser identificada em um tempo polinomial caso existisse um algoritmo não determinístico. Este algoritmo poderia adivinhar quais os passos corretos para identificar a solução.

A prova de existência, ou não, de problemas NP tem sido tema de investigação por pesquisadores de diversas áreas, e despertado bastante interesse por demonstrar se a equação $P = NP$ é verdadeira ou falsa. O autor mencionado apresenta uma

discussão bastante interessante sobre o assunto para maior aprofundamento no tema.

No caso (2), máquinas paralelas iguais, a vantagem em se realizar a programação das tarefas reside em realizar um balanceamento adequado entre os recursos disponíveis. Descrito como $P_m \parallel C_{max}$, este problema também é NP-Difícil e possui uma heurística construtiva de solução baseando-se na regra prática de alocação por ordem de tempo de processamento (*Longest Processing Time first – LPT*). Utilizando esta regra, deve-se alocar no tempo inicial a tarefa que possuir o maior tempo de processamento em uma máquina. Seguindo esta ordem, de forma decrescente em tempo de processamento, o primeiro recurso disponível deve ser ocupado.

O nível de complexidade cresce consideravelmente nos casos (3) e (4), onde não existe uma regra prática para se alcançar um resultado satisfatório, mesmo que ainda não seja garantido o caráter ótimo da solução.

Para algoritmos referentes à solução dos casos (3) e (4), o leitor é convidado a visitar os trabalhos (LEUNG, 2004), (PINEDO, 2012), (BRUCKER; BRUCKER, 2007).

2.2.1.2. Fluxo contínuo

Agora, ao invés de uma tarefa, analisa-se um conjunto de tarefas, que se dá o nome de trabalho. Este arranjo, portanto, leva em consideração não somente um recurso isolado, mas uma cadeia de recursos, onde cada trabalho deverá passar por um conjunto de recursos para realização de suas tarefas componentes antes de sua conclusão. No caso do fluxo contínuo (*flow shop*), todas as tarefas de um trabalho são realizadas na mesma ordem, seguindo o mesmo roteiro (sequencia de recursos para conclusão do trabalho). Neste grupo, estão: (1) *flow shop*, o qual é formado por uma sequencia singular de recursos, onde cada trabalho deve ser processado por todos os recursos, seguindo sempre o mesmo roteiro; (2) *flow shop* flexível, que é uma extensão do *flow shop*, onde cada etapa do processo é composta por um grupo de recursos paralelos, podendo ocupar qualquer um deles indistintamente ao ser processada. Essa flexibilidade permite que as tarefas alternem a ordem de execução durante o processo, permitindo que a primeira a entrar no sistema não seja necessariamente a primeira a sair do mesmo.

Para o caso (1), a busca por uma solução reside na permutação dos trabalhos, de forma que cada conjunto de tarefas seja executado no menor tempo possível. Cabe ressaltar, que a política de respeito à ordem de chegada (*First In First Out – FIFO*), pode trazer prejuízo ao sistema, uma vez que a troca de ordem dos trabalhos durante a execução pode resultar em uma redução do tempo de conclusão (*Makespan*) (PINEDO, 2012). O valor mínimo de execução de um conjunto de trabalhos pode ser computacionalmente determinado através do cálculo do caminho crítico de um grafo direcional que represente a programação.

Uma das primeiras formas heurísticas de construção de solução para este caso de programação de tarefas é a “*Slope Heuristic*”, onde os trabalhos são ordenados por uma medida de desvio que os classifica segundo seu tempo de processamento de cada tarefa, ponderado pela posição que esta tarefa ocupa. Para maiores detalhes nesta técnica, o autor sugere a visita à (PINEDO, 2012). Além desta técnica, existem outros métodos como NEH (DONG; HUANG; CHEN, 2008), SLOPE (FRAMINAN; GUPTA; LEISTEN, 2002).

Em contrapartida, o caso (2), segundo VAIRAKTARAKIS e CAI (2003), apresenta atenção relevante no contexto de manufatura, uma vez que o aumento da flexibilidade dentro de uma organização produtiva é visto como tendência mundial. Segundo o mesmo autor, existem dois tipos de flexibilidade: (1) processamento (tempo); (2) roteiro (precedência). No presente trabalho, o foco foi dado à flexibilidade de roteiro, pois se deseja explorar os casos em que um trecho do canal pode ser alocado por um único navio (navios largos) e casos que o trecho pode ser alocado por dois navios (navios pequenos). Maior detalhamento pode ser encontrado em: (LI; ZHAO, 2009; SAYGIN; KILIC, 1999; ZHANG; GAO; SHI, 2011)

2.2.1.3. Fluxo celular

Este arranjo produtivo representa uma maior complexidade dentre os tipos de problemas discutidos, uma vez que apresenta um maior número de variáveis de decisão binárias em sua formulação. Isso se deve à flexibilização do conceito de rotas, proporcionando para cada trabalho a possibilidade de possuir uma rota específica, diferente da rota dos trabalhos anteriores. Este problema é bastante discutido na literatura e é classificado como NP-Difícil.

Pinedo (2012) apresenta diversas aplicações o problema de programação de fluxo celular (*job shop*) no mundo real. Por este motivo existe uma ampla busca por técnicas, heurísticas, e meta-heurísticas que torne as soluções já documentadas (não ótimas) ainda melhores, ou seja, que se aproxime ainda mais da solução ótima (algumas vezes ainda indeterminada). Devido a sua complexidade, não foi publicada pelo meio acadêmico nenhuma prova formal de que este problema pode ser resolvido através de uma solução exata em um tempo polinomial determinístico, mantendo-se na categoria de NP-Difícil (PAPADIMITRIOU; STEIGLITZ, 1998). Por este motivo, a forma de solução mais comum reportada pela literatura para problemas reais é através do uso de heurísticas, e meta-heurísticas. Esta classe de problema se agrupa da seguinte forma: (1) *job shop*, é a estrutura em que se baseou o presente trabalho, uma vez que existe um conjunto de recursos disponíveis, porém cada tarefa deverá seguir um percurso independente com particularidades que são discutidas a seguir neste documento; (2) *job shop* flexível, sendo este uma generalização do *job shop*, em que cada etapa do processo é formada por um grupo de máquinas paralelas igualmente capazes de realizar a tarefa.

O fluxo celular (*job shop*) (1) pode ser representado por um grafo disjuntivo e direcional, onde os nós representam as tarefas e os arcos são de dois tipos: (a) conjuntivos, indicando as restrições de roteiro; (b) disjuntivos, representando a ordem em que os recursos são alocados. O caráter combinatório deste problema está justamente na ordem em que os arcos disjuntivos são posicionados.

Pinedo (2012) reporta como uma das heurísticas mais bem sucedidas para solução deste tipo de problema nomeada "*Shifting Bottleneck*". Esta heurística se baseia num procedimento iterativo de seleção do próximo recurso a ser alocado baseando-se na criação de gargalos temporários à partir do recurso que gere o maior impacto na programação.

Além destas estruturas, existem os arranjos que ainda não foram incorporados ao estudo formal de programação, como por exemplo, a "*Resource Constrained Project Scheduling Problem (RCPS)*" que representa o sistema de uma maneira híbrida entre o fluxo contínuo e o fluxo celular discutido anteriormente pelo autor (MOTA, 2007).

2.2.2. Tipos de objetivos

Uma programação pode levar em conta somente a penalidade gerada pelos trabalhos que excedem seu prazo, neste caso, chamado de *Lateness*, este objetivo busca atingir uma meta estipulada pelo programador de produção, evitando os custos de atraso, através da minimização da diferença entre o prazo estipulado e a conclusão da tarefa que mais atrasa no conjunto de tarefas. Já o objetivo *tardness* leva em consideração a penalidade (ou possível prêmio), no caso de um adiantamento, somando todos os atrasos (e eventuais adiantamentos) numa mesma função. Portanto, sua apuração contabiliza também o impacto de se adiantar uma tarefa. Por fim, *Makespan* representa a medida de penalidade equivalente ao término da última tarefa do último trabalho da programação. Este valor reflete o tempo necessário para se concluir a programação em questão. Geralmente este tipo de objetivo reflete uma boa ocupação do sistema, uma vez que a programação busca compactar ao máximo a execução das tarefas, evitando folgas ou esperas.

2.2.3. Variações de um problema de programação

Em um problema de programação de tarefas, existem alguns parâmetros que simbolizam restrições complementares à natureza do problema. Neste trabalho, alguns parâmetros são explorados para a futura conceituação do problema de programação logística.

O momento de liberação (r_j) indica a que instante do calendário um determinado trabalho está disponível para ser processado. Caso a programação seja realizada somente com os trabalhos já aguardando seu processamento (em fila), este parâmetro terá o valor zero para qualquer trabalho em questão. Já o parâmetro de recirculação (*rcrc*) indica a possibilidade de visita de um trabalho múltiplas vezes ao mesmo recurso. Essa propriedade torna o problema mais complexo uma vez que o roteiro poderá conter diversas ocorrências do mesmo recurso em sua operação, sendo que este controle deve refletir no tratamento das restrições de precedência, de forma a garantir que durante todos os eventos de ocupação de um recurso, o trabalho respeite o roteiro previamente estabelecido. A continuidade (*no-wait*) ocorre em casos particulares de fluxo (contínuo ou celular) em que um trabalho não pode aguardar um intervalo de tempo ocioso para que posteriormente seja iniciada sua execução. Em termos industriais, este fenômeno é observado quando não existe a

possibilidade de estocagem entre os recursos, desta forma o fluxo deve ser ininterrupto entre os recursos.

2.2.4. Redundância dos recursos

Atribuição dada aos ambientes produtivos onde não existe redundância de recursos (fixo) para a execução de um trabalho. Neste caso, cada recurso é único e pode ser ocupado por um único trabalho em cada instante de tempo. Por outro lado, um ambiente flexível representa a generalização do ambiente produtivo, onde determinados recursos contam com um conjunto de recursos atuando em paralelo, dando opções para a realização de determinada tarefa.

2.2.5. Programação de operações logísticas

O principal objetivo da implantação da programação de tarefas em um sistema logístico é a redução do tempo de atendimento médio do sistema como um todo. Por explorar a ociosidade de um sistema, a programação das tarefas organiza os trabalhos de modo a esperarem o menor tempo possível entre o término de execução em um processo e o início de execução no processo seguinte. Conseqüentemente, esta dinâmica busca uma maior ocupação do sistema.

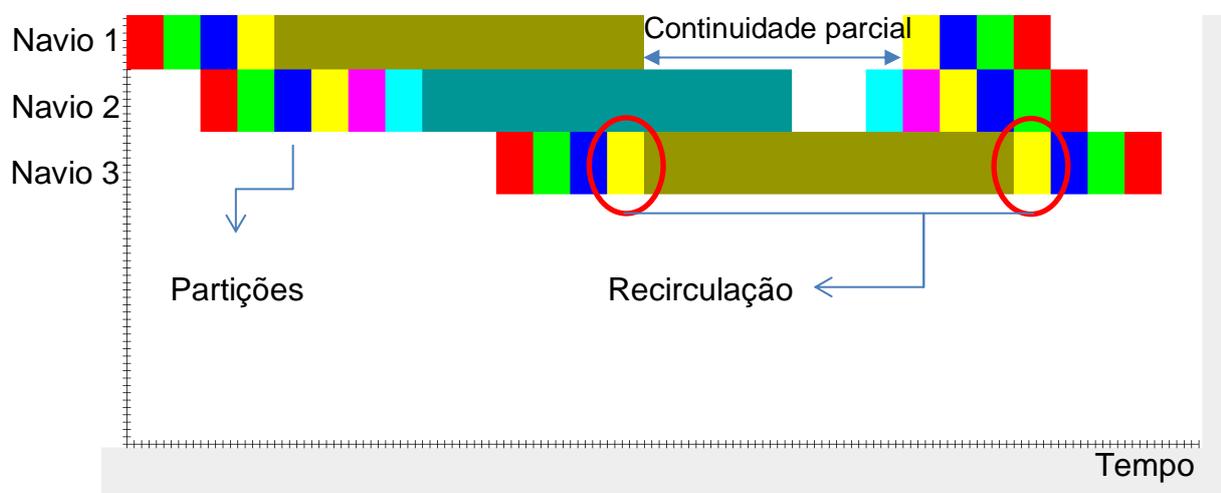
O sistema de programação de tarefas no contexto logístico pode ser realizado com a visibilidade dos trabalhos ainda a serem disponibilizados ($r_j \neq 0$), ou somente com os trabalhos disponíveis em fila, aguardando a sua entrada no canal de acesso ($r_j = 0$). No caso do uso do momento de liberação, o sistema de programação requer uma maior visibilidade das tarefas a serem executadas, uma vez que a lista de tarefas em fila é a principal informação de entrada do agente despachador. Este fator pode ser restritivo em algumas operações extremamente dinâmicas como: (1) chamadas de emergência, e (2) atendimento no varejo.

Outro aspecto importante na definição do conceito de “programação de operações logísticas” é a comum existência do fenômeno de recirculação. Geralmente sistemas logísticos possuem em suas extremidades (carregamento ou descarregamento) recursos confinados com acesso restrito. Isso ocorre em um centro de distribuição em que os caminhões se posicionam em docas, realizam suas operações e as liberam, ocorre em um aeroporto, onde a pista de pouso e decolagem é compartilhada por todos os aviões que irão utilizar de sua estrutura aeroportuária, ou

ainda em sistemas marítimos, onde os navios irão acessar os terminais através de canais de acesso que é compartilhado por diversos terminais. Desta forma, a natureza de recirculação é comum e deve ser levada em consideração na modelagem deste sistema.

A terceira característica deste sistema é a natureza ininterrupta do processo. Uma vez disparada a entrada de um caminhão, navio, ou avião, este trabalho não pode (ou não deve) ser interrompido no seu curso, exceto na transição entre o final de sua operação e o início do seu curso de saída do sistema. Por este motivo, a proposta de “programação de trabalhos logísticos” não apresenta a propriedade continuidade (*no-wait*) proposta por Pinedo (2012), mas uma propriedade híbrida não observada ainda na literatura acadêmica que será chamada de “continuidade parcial” (*parcial no-wait* ou *pnwt*). A exemplificação deste fenômeno pode ser observada na Figura 12.

Figura 12 – Exemplo de um problema de programação de tarefas logísticas, com recirculação e continuidade parcial



Fonte: o autor

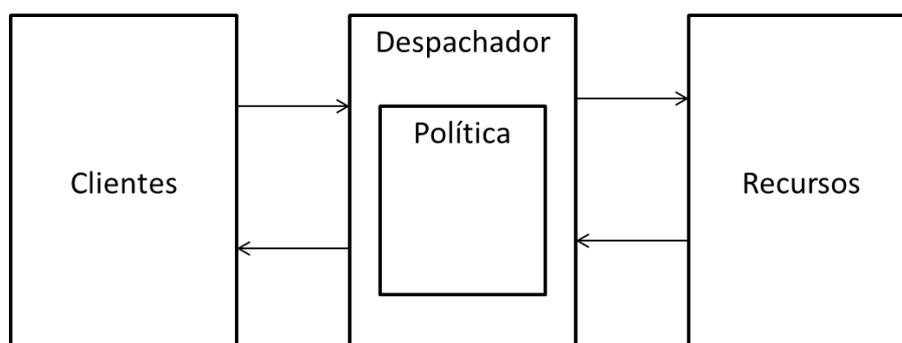
Embora esta proposta de classificação seja genérica para sistemas logísticos, este documento irá se restringir à sua contextualização ao sistema marítimo. Neste tipo de sistema, a necessidade de informação prévia para realização da programação representa uma grande oportunidade, uma vez que os navios destinados determinado porto já estão navegando em direção aos terminais com dias de antecedência (por se tratar de um modal de baixa velocidade relativa). Assim, é possível ter uma previsão bastante confiável de quais navios visitarão o porto nos

próximos 20 a 30 dias, possibilitando, portanto esta informação pode ser utilizada como o momento de liberação, para navios ainda por chegarem a um porto. No caso da recirculação, um navio já fora representado pela “linha de tempo do navio” (MOTA; PEREIRA, 2013) em trabalhos anteriores, com o código de cores representando os recursos a serem ocupados no trajeto do navio ao seu terminal de destino. E finalmente, o caráter de continuidade parcial se dá quando o navio permanece no terminal, ocupando este recurso e aguardando a liberação por parte da autoridade portuária para ingressar no canal rumo a sua saída. Deste modo, o sistema logístico em estudo respeita as três características propostas pelo autor, se classificando, portanto, em um “problema de programação de tarefas logísticas”.

2.2.6. Taxonomia complementar do problema de programação de tarefas

O uso de técnicas quantitativas para gestão de recursos restritos tem despertado interesse da comunidade científica, tanto acadêmica quanto empresarial, pelos retornos econômicos atingidos através do emprego da mesma. Baseando-se em classificações previamente propostas por autores, exemplifica-se o trabalho proposto por CASAVANT e KUHL (1988), que embora aplicado a sistemas computacionais, servem de substrato para a aplicação à sistemas logísticos. De acordo com Casavant, um problema de programação é composto por três componentes: (1) clientes; (2) recursos; e (3) política, interagindo conforme o esquema abaixo (Figura 13).

Figura 13 – Esquema de um problema de programação



Fonte: Casavant,1988

Desta forma, o mesmo autor propôs a seguinte taxonomia para os problemas de programação (Tabela 4).

Tabela 4 – Taxonomia do problema de programação proposto por Casavant (1988)

Classificação	Dimensão	Aspectos	
Hierárquica	Escopo	Local	
		Global	
	Horizonte	Estático	
		Dinâmico	
	Otimidade	Ótimo	
		Sub-ótimo	
	Solução	Aproximada	
		Heurística	
	Processamento	Transacionais	Balanceada
			Não balanceada
Alocação		Puxada	
		Empurrada	
Realocação		Determinística	
	Probabilística		
		Única	
		Dinâmica	

Importante mencionar que a classificação descrita acima se baseia em critérios hierárquicos e computacionais. Enquanto a primeira trata de dimensões matemáticas, dizendo respeito à forma e decisões tomadas pela modelagem do problema, a segunda trata de dimensões relacionadas à codificação do problema, bem como ao uso dos recursos computacionais no momento de codificação do

problema e que irão afetar diretamente no processamento do algoritmo quando este for executado em busca de soluções do problema.

A classificação quanto ao escopo distingue a existência ou não da separação entre as tarefas computacionais (*thread*) quando se busca um resultado ótimo. O uso de separação de tarefas computacionais (*multi-thread*) pode levar o sistema à redução do tempo de processamento, porém pode perder soluções que não foram encontradas por estar em subconjuntos diferentes durante a busca, portanto existe um balanço de custo e benefício a ser avaliado neste aspecto. Por sua vez, a classificação quanto ao horizonte trata do processo de inclusão de novas tarefas na lista a ser otimizada. O processamento balanceado ou não balanceado se refere à gestão dos núcleos computacionais destinados à solução do problema. Desta forma, pode-se coordenar a carga distribuída aos núcleos computacionais para ganho de desempenho, ou não se dedicar a esta coordenação, caso destinado a problemas de baixo custo computacional, consequentemente de “fácil” solução para os padrões computacionais atuais (computadores de 4 ou 8 núcleos). No caso do horizonte estático (também conhecido como despacho estático), o algoritmo possui a informação completa de todas as tarefas a serem otimizadas e no evento da inclusão de uma nova tarefa, o algoritmo deverá ser executado novamente, incluindo a nova tarefa. Por outro lado, no horizonte dinâmico (ou despacho dinâmico), novas tarefas poderão ser incorporadas após a execução da otimização. A diferença reside no fato da nova otimização contar somente com as tarefas que não inicializaram sua execução, uma vez que estas não poderão se submeter a uma nova ordem gerada pelo algoritmo. Este aspecto da informação disponibilizada também é abordada por Pinedo (PINEDO, 2012), classificando o problema como *off-line* no caso da lista de trabalhos ser completamente disponibilizada na execução da otimização, versus *on-line* quando a informação é parcialmente disponibilizada durante a execução.

Outra diferença primordial na classificação dos sistemas de programação se refere à otimalidade. Caso o problema seja resolvido através de técnicas de programação matemática (linear, inteira ou mista) e a solução ótima seja encontrada e substantiada pelos teoremas relacionados a esta área do conhecimento. Para maiores detalhes, recomenda-se a consulta ao BAZARAA et. al (2011). Porém, problemas NP-Difícil se caracterizam pelo tempo não determinístico e exponencialmente crescente com o aumento do número de variáveis de decisão. Por

este motivo, a caracterização como sub-ótimo, uma vez que métodos heurísticos relacionados à buscas combinatórias podem encontrar soluções de boa qualidade (ótimo local), porém sem garantia de que seja o ótimo global, podendo ser melhorada com o uso de outro método.

Finalmente, a classificação quanto ao aspecto aproximado ou heurístico está relacionado à capacidade de se percorrer todo o espaço de soluções antes de se identificar a melhor solução. No caso de soluções aproximadas, estipula-se um critério de parada (número de iterações, percentual marginal de melhoria) e ao se atingir este critério, aceita-se a solução como a melhor encontrada. Soluções heurísticas, segundo Casavant, atinge-se o ótimo, mas através de um procedimento heurístico fundamentado matematicamente, como no caso do *branch-and-bound*, ou Dijkstra - (WINSTON; GOLDBERG, 1994).

As classificações computacionais referem-se em sua maioria ao uso do recurso computacional para processamento do algoritmo desenvolvido e poderá ser detalhado no artigo de CASAVANT e KUHL (1988).

2.3. MODELAGEM MATEMÁTICA

Uma vez compreendido o contexto do trabalho (sistemas logísticos, em especial o marítimo), bem como a técnica utilizada (programação da produção), nesta etapa do documento apresenta-se os métodos de modelagem matemática. Desta forma, foram revisados modelos determinísticos (programação inteira) e modelos probabilísticos (simulação de eventos discretos).

2.3.1. Programação inteira

Diversos autores investigaram a formulação dos problemas de programação através de programação inteira mista. Como consequência desta investigação, observam-se na literatura duas principais abordagens para a modelagem de problemas de alocação de tarefas para solução exata do problema: WST e Manne, descritas a seguir.

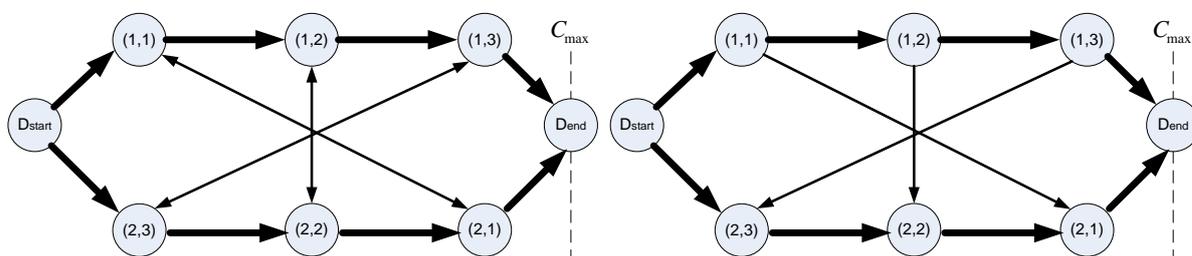
A formulação WST (Wagner, Stafford e Tseng) (WAGNER, 1959) que se baseia no problema de alocação clássico com restrições binárias que controlam o posicionamento das tarefas na sua ordem de processamento. Por outro lado, a abordagem de MANNE (1960) considera variáveis binárias associadas por relações

disjuntivas ligando individualmente cada par de tarefas com sua sucessora ou predecessora. Não existe estudo afirmando qual a melhor formulação a ser empregada para o problema de alocação de tarefas logísticas, a análise reside em se optar pelo maior número de variáveis (WST), ou maior número de restrições (Manne). Neste trabalho, baseando-se na formulação proposta por Manne, o autor propõe a formulação que endereça o problema de programação de tarefas em fluxo celular, com continuidade parcial ($J_m \mid pnwt \mid C_{max}$).

A solução exata deste tipo de problema apresenta grande desafio computacional devido ao elevado número de restrições que este tipo de problema está sujeito. De acordo com BRUCKER e BRUCKER (2007), a forma mais eficiente de se resolver um problema de programação de tarefas é utilizando a técnica “*Branch-and-Bound*”, através da modelagem de Manne (utilizando grafos disjuntivos). A decisão básica deste método de solução está na ordenação das operações em cada recurso, e verificar o impacto desta ordenação nas restrições de precedência. Em um modelo disjuntivo, a identificação da solução está na transformação dos arcos não direcionais em arcos direcionais, para todas as restrições disjuntivas. Este novo grafo construído deverá possuir duas propriedades: (1) todos seus arcos direcionais; (2) ser acíclico. A segunda propriedade será discutida e detalhada na seção a seguir.

De forma ilustrativa, será apresentado graficamente o procedimento descrito (Figura 14).

Figura 14 – Grafo original (esq.) e uma proposta de solução (dir.)



Fonte: o autor

O procedimento “*branch-and-bound*” consiste em incluir nós à árvore decisória, fixando as restrições conjuntivas e alocando suas tarefas sucessoras. Este procedimento, de forma iterativa, percorre todas as tarefas, com ramificações nos arcos disjuntivos até atingir o final do grafo, eliminando aqueles que levarem o tempo

total de execução aos valores altos, bem como configurações ineficazes dos arcos disjuntivos. Existem algumas estratégias para solução deste problema que sua discussão foge ao escopo deste trabalho, uma vez que a solução exata deste problema não será alcançada em um tempo computacionalmente satisfatório, fazendo necessário o uso de técnicas heurísticas discutidas posteriormente neste documento.

De acordo com (AHUJA; MAGNANTI; ORLIN, 1993), o problema de alocação de tarefas pode ser formulado conforme um problema de fluxo de custo mínimo para que seja lançada mão da teoria de grafos na solução do problema. O *minimum-cost flow problem* (MCFP) foi explorado no contexto de programação de tarefas por (FONTES; GONÇALVES, 2007), que não será explorado neste trabalho devido à baixa eficiência computacional nos testes realizados.

Embora com enfoque diferente do presente trabalho, FAGERHOLT e RONEN (2013) pontua interessantes aspectos quanto à factibilidade de se resolver um problema de alta complexidade (NP) de maneira exata. O mesmo afirma ser pouco frequente a solução de problemas reais em um tempo suficientemente pequeno (poucos minutos) devido ao grande número de variáveis binárias associadas a este tipo de problema.

Investigação similar foi descrita por TAVAKKOLI-MOGHADDAM et al. (2005) que utilizou a combinação entre Redes Neurais e *Simulated Annealing* para construir e melhorar agendamentos de programação estocásticos.

Até o presente momento, não foi reportada na literatura técnica específica uma solução definitiva que prove a solução ótima do problema de *job shop*. Por este motivo, este trabalho priorizou o estudo de soluções heurísticas não ótimas, mas que possam gerar valor prático para operações portuárias, ao melhorar o processo de entrada dos navios.

Rotulada por PAPADIMITRIOU e STEIGLITZ (1998) por método de busca exaustiva, ele indica este método como talvez o mais antigo método de otimização. O método parte de uma solução inicial factível e utiliza uma sub-rotina para encontrar em sua vizinhança uma solução que melhore a função objetivo em estudo. Este procedimento é repetido iterativamente até que seja atingido um critério de parada. Duas decisões importantes precisam ser tomadas: (1) como obter a primeira solução

factível; (2) como definir a vizinhança de busca. Estas decisões são tomadas empiricamente dependendo da natureza do problema em estudo.

A primeira solução construída foi utilizando a política de ordem de chegada (*First In First Out – FIFO*), uma vez que reflete a atual programação do porto. Em seguida, esta solução deve ser melhorada com o uso de uma heurística de busca local.

De acordo com EDELKAMP e SCHROEDL (2011), a busca local possui uma vasta aplicabilidade no campo da otimização combinatória. Conceitualmente, ela parte de uma vizinhança de soluções e atribui como meta a otimização da função objetivo, identificando a solução com mínimo custo.

Pequenas perturbações na solução incumbente (a melhor encontrada até esta etapa) dão origem a uma vizinhança que será analisada quanto a dois critérios: (1) factibilidade: a candidata à solução proposta precisa manter as características do problema, respeitando suas condições de contorno e suas restrições; (2) melhoria: além de factível, a candidata deve ser melhor que a incumbente, caso contrário será descartada.

A construção da vizinhança será baseada na técnica 2 – OPT proposta por (LIN, 1965) e originalmente criada para o Problema do Caixeiro Viajante (TSP). Esta técnica consiste na definição de um conjunto de elementos em uma vizinhança, trocando em pares de diferentes tarefas. A vizinhança deverá ser controlada avaliando os pontos positivos e negativos entre dois principais pilares: desempenho e qualidade. O desempenho controla o tempo de processamento da busca. Para um número elevado de tarefas este princípio pode inviabilizar o uso da técnica. Caso o tempo de identificação da solução seja tão ou mais alto que o tempo disponível para planejamento, não existem razões para se utilizar a ferramenta. Por isso é desejável um alto desempenho, ou seja, baixos tempos de processamento. Por outro lado, de nada adianta uma alta desempenho ao se gerar soluções, com baixa qualidade das mesmas.

Em seguida, lança mão do uso de uma Meta-Heurística para que se escape dos ótimos locais e seja identificada uma melhoria na solução. Neste trabalho, a Meta-Heurística utilizada foi a *Simulated Annealing (SA)*. Segundo EDELKAMP e SCHROEDL, (2011), *Simulated Annealing (SA)* é baseada no algoritmo “*Metropolis Heuristic*” que por si tem raiz na busca local aleatória “*Random-walk heuristics*”,

evitando uma busca sistemática (mesmo que seja parcial) durante a etapa de exploração da vizinhança da atual solução incumbente. No SA a solução em teste é inspirada em uma pequena modificação na posição dos pedidos da solução atual. Esta solução de teste pode ser aceita (mesmo que piore a função objetivo) com probabilidade $e^{(-\Delta E/kT)}$, onde ΔE representa o nível de energia a uma temperatura T e k representa a constante de Boltzmann (na prática, esta constante pode ser substituída por valores convenientes ao modelo).

Esta Metaheurística é inspirada no processo de resfriamento termodinâmico onde, a partir de uma temperatura inicial (alta), à medida que o algoritmo evolui, esta temperatura é reduzida. Quanto mais baixa a temperatura, menor a probabilidade de o algoritmo aceitar uma solução que piore a função objetivo. Em outras palavras, quanto menor a temperatura, menor a probabilidade de se escapar de um ótimo local. Por isso, inicialmente o espaço de busca é amplo. Mas com o passar do tempo, este espaço se torna restrito.

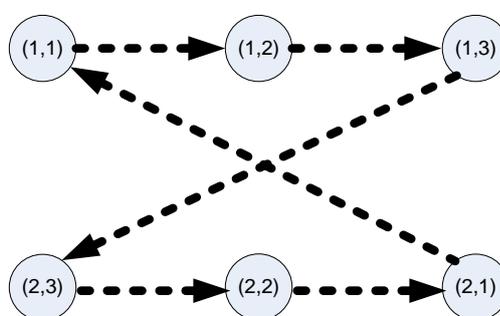
Ao se atingir o resfriamento completo (temperatura final atingida), o critério de término do algoritmo é atingido e o programa é finalizado. Segundo PRESS et al. (1992) existem dois pontos extremamente positivos no que se refere ao uso do *Simulated Annealing*: (1) não se trata de um método “guloso”, assim ele não é facilmente enganado por rápidas melhorias. Como consequência, o mesmo pode não cair em mínimos locais desfavoráveis. Pelo contrário, ele visita estes mínimos locais livremente quando tem uma temperatura alta e à medida que a temperatura diminui, ele se dirige ao melhor dos mínimos já visitados; (2) as decisões quanto à configuração tendem a proceder em ordem lógica. Assim mudanças bruscas são realizadas quando a energia do sistema é alta, e ao resfriar, o algoritmo busca refinamentos menores. Outro fator que diferencia esta técnica de outras Metaheurísticas é o fato dela não utilizar diretamente o conceito de memória (presente no *Tabu Search*, *Genetic Algorithms*, dentre outras).

Adicionalmente, uma criação alternativa de vizinhança foi testada com sucesso. Trata-se RPI (*Randomized Pairwise Interchange*). O princípio é o mesmo da 2-OPT, porém ao invés de se trocar pares vizinhos, trocam-se pares aleatoriamente escolhidos (baseando-se em uma distribuição uniforme).

2.3.1.1. Infactibilidades

A decisão de se direcionar um arco torna-se mais complexa à medida que se avança no grafo. Este fato é particularmente complicador no caso de problemas de programação celular, uma vez que existem arcos interligando qualquer tarefa, em qualquer posição do grafo. Desta forma, a busca por soluções pode levar à geração de infactibilidades. Estas se devem à geração de ciclos dentro do grafo (grafos cíclicos) que geram travas na tomada de decisão “*deadlocks*”. A existência destas travas foi discutida por MUROVEC e ŠUHEL, (2004), bem como formas de se prevenir suas ocorrências. As travas podem ser exemplificadas através da Figura 15.

Figura 15 – Programação infactível



Fonte: Murovec (2004)

Ao se observar detalhadamente a configuração em destaque, percebe-se a infactibilidade, uma vez que o recurso (2,1) possui relação de precedência conjuntiva com o (2,3). Além disso, o recurso (2,1) possui relação de precedência disjuntiva com o (1,1). Desta forma, o recurso (1,1) nunca será iniciado, uma vez que este depende da conclusão do (2,1). MATTFELD (1996) apresentou como um dos maiores desafios em se implementar qualquer técnica de busca local em um problema de *job shop* está no enfrentamento da possibilidade de se encontrar uma solução infactível ao se realizar qualquer movimento dentro de uma vizinhança devido às restrições de precedência.

Existem algumas técnicas de endereçamento destas infactibilidades no caso da busca local. (MUROVEC; ŠUHEL, 2004) propõe técnicas de reparo que se baseia no reparo da solução após a verificação da infactibilidade através de operações na tarefa movimentada dentro da vizinhança de movimento. Outra técnica está no descarte desta solução, ao se caracterizar como inviável. Ambas as técnicas apresentam aspectos positivos e negativos. No caso do reparo, o espaço de busca é

consideravelmente maior, porém sujeito a um custo computacional e uso de heurísticas que controlem adequadamente sua vizinhança (Busca Tabu, ou Algoritmo Genético), já no caso do descarte, a vizinhança não precisa ser controlada com tanto rigor (*Simulated Annealing, Scatter Search*), levando a busca a um ganho computacional, porém estando sujeito às soluções de pior qualidade.

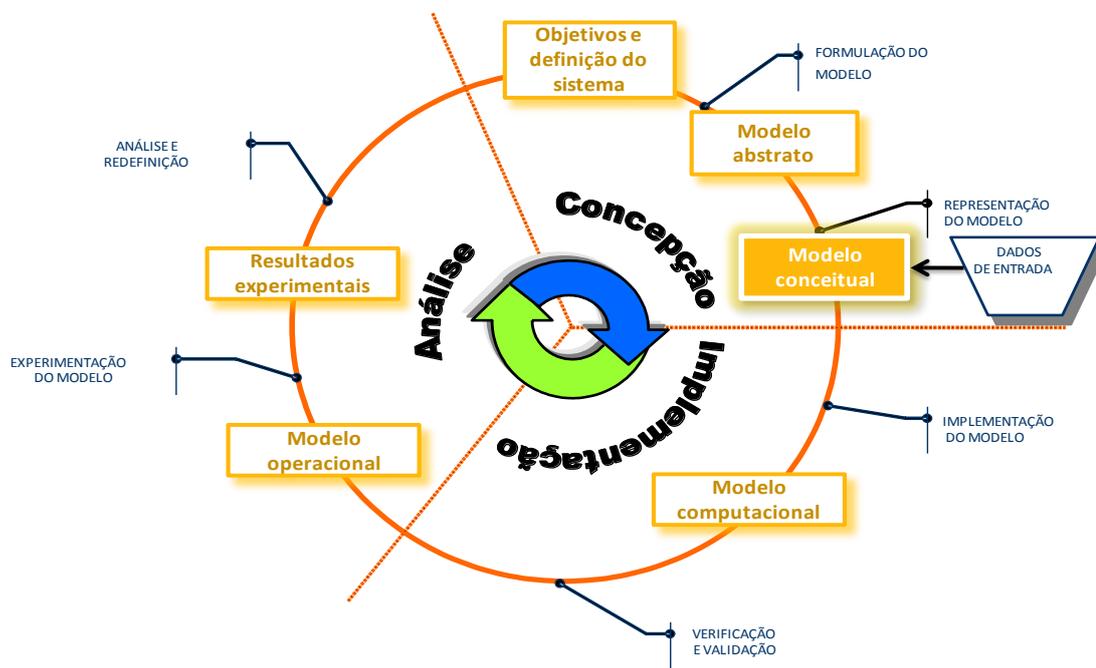
2.3.2. Simulação de eventos discretos

Segundo BANKS et al. (2000) a simulação representa a operação de um sistema real considerando a dimensão temporal. Em alguns casos o modelo desenvolvido é simples o suficiente para ser resolvido utilizando técnicas tradicionais de programação matemática, mas em geral o sistema em estudo apresenta um elevado nível de complexidade que requer um tratamento numérico, ou seja, a solução de modo experimental para capturar os resultados almejados.

Em geral, a saída do modelo de simulação não é uma recomendação, ou uma política e sim um conjunto de medidas de performance (KPIs) do sistemas apurados em trechos específicos do modelo. Ocupação de recursos, tempo de trânsito ou volume de estoque são as medidas mais comuns de um estudo de simulação.

De acordo com a metodologia proposta por CHWIF e MEDINA, (2006), o projeto de desenvolvimento de um modelo de simulação deve passar pela maioria, se não todas as etapas do ciclo abaixo (Figura 16).

Figura 16 – Metodologia de criação do modelo de simulação



Fonte: CHWIF e MEDINA (2006)

Desta forma, a construção do modelo de simulação de eventos discretos estudado neste trabalho consiste em três etapas principais: (1) a concepção do modelo, onde são definidos claramente os objetivos do estudo e é elaborado o modelo conceitual; (2) a implementação, que é a elaboração do modelo computacional, e validação, (3) a análise, etapa onde se realiza a obtenção de resultados, e análises de sensibilidade. Estas etapas podem ser ilustradas pela imagem a seguir (CHWIF; MEDINA, 2006).

2.4. MODELAGEM MATEMÁTICA DO CANAL DE ACESSO

Sistemas portuários são complexos e apresentam diversas particularidades, as iniciativas podem ser apenas usadas como motivadoras para a modelagem de Santos, uma vez que este trabalho apresenta detalhes operacionais que serão descritos na seção de metodologia.

De acordo com RONEN, (1983), o problema de programação de navios foi apresentado por DANTZIG e FULKERSON, (1954), quem tentou determinar a menor frota requisitada para transporte de combustível.

O problema de acesso portuário foi investigado por JACKMAN et al. (2010). De acordo com este autor, um agendamento diário rigorosamente planejado é um fator determinante para se atingir o sucesso nas operações portuárias. Este agendamento não determina somente o horário de movimento da embarcação, mas também afeta as ações de todo o pessoal de apoio que irá participar da navegação, incluindo os pilotos, rebocadores, pessoal de suporte, e todos os recursos associados movimentação das embarcações. Castillo (2010) modelou as operações do canal do Panamá através de técnicas matemáticas. Por se tratar de um fluxo bidirecional, o autor modelou o canal como um *flow shop* (que será definido detalhadamente na seção 2.2.1.2), que representa o limite da flexibilidade operacional de um canal portuário. Este conceito foi empregado adequadamente para a realidade do Canal do Panamá uma vez que a movimentação em um sentido não bloqueia a movimentação no sentido contrário. Adicionalmente, ele usou os tempos de navegação como variáveis aleatórias para tornar mais realista à modelagem. Assim, tempo de navegação, e enchimento das comportas foram modelados utilizando distribuições normais, distribuições uniformes, e distribuições betas.

Diferente abordagem relacionada modelagem de um canal de acesso foi desenvolvida por ALMAZ e ALTIOK, (2012). A abordagem desenvolvida pelo citado autor se deu através do uso de simulação de eventos discretos. O estudo baseou-se no rio Delaware, localizado no estado de mesmo nome, na costa leste norte-americana. A região descrita possui um histórico de aproximadamente 300 anos como rota marítima, possui mais que 40 terminais e um tráfego de aproximadamente 3.000 embarcações por ano (cerca de metade do fluxo registrado em 2011 no Canal de Santos). Sob a alegação de que um modelo determinístico não poderia ser utilizado devido complexidade do problema, o autor utilizou a simulação para estudar o impacto da ampliação do calado no aumento do tráfego. O modelo de simulação descrito pelo autor foi utilizado para avaliar mudanças em políticas operacionais e de navegação. O modelo proposto por Almaz levou em consideração o número de terminais, capacidade dos berços, e particularidades referentes ao tipo de embarcação. Variáveis aleatórias de diversas distribuições foram utilizadas para representar o tempo entre chegada dos navios, características físicas como comprimento, largura, boca, calado máximo, carga transportada, tempo de

navegação, atividades da maré, tempos de operação no terminal, e períodos aguardando na área de fundeio, pré-operação, e pós-operação.

Uma consideração interessante realizada por FAGERHOLT e RONEN (2013) é a importância econômica gerada por este tipo de iniciativa no contexto portuário. Esse autor incluiu em seu trabalho de programação e roteirização a flexibilidade quanto ao volume transportado, segregação de cargas entre veículos e a otimização da velocidade de navegação da embarcação. Ele afirma que a incorporação destes detalhamentos aumenta em até 25% no valor gerado pela otimização, se comparado com otimizações que consideraram estas restrições relaxadas. Embora o trabalho de Fagerholt apresente um nível de detalhamento bastante significativo para o contexto portuário, sob o ponto de vista do autor desta tese, o trabalho apresenta o tradicional viés de considerar somente a visão do armador.

Desta forma, quando se detêm a governança da frota, o processo de agendamento, roteirização e programação tende a ser mais simples, quando comparado ao mesmo processo contando com a necessidade de se lidar com diversos armadores diferentes. Assim, percebe-se que existe um grande esforço por parte de profissionais de logística portuária, bem como pesquisadores em se otimizar a rota e consolidação das cargas dentro da cadeia de suprimentos, mas pouco esforço em se otimizar a entrega da carga propriamente dita, levando em conta as restrições não do entregador, mas do cliente.

Diferente dos autores mencionados nesta seção, o presente autor considera que ambas as abordagens (determinística através da programação linear e estocástica através da simulação de eventos discretos) devem ser utilizadas de maneira colaborativa, visando uma maior acuracidade do estudo. Para uma ampla compreensão das técnicas citadas, será conduzida uma revisão sobre as principais ideias relacionadas à modelagem determinística (programação de tarefas) e estocástica (simulação).

2.5. CONCLUSÃO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Através da revisão dos principais aspectos do estudo desenvolvido nesta pesquisa pode-se descrever os detalhes da complexa operação de um canal de acesso aos terminais portuário, e os motivos que este sistema desperta interesse da comunidade científica. Em seguida ao se apresentar os tipos de programação, que

originado de sistemas de manufatura, tem ganhado espaço significativo em se tornar um sistema logístico mais eficiente.

Em seguida foram apresentados alguns trabalhos atuais que abordaram problemas semelhantes. Dentro destes, através de uma visão crítica, foram pontuados semelhanças e diferenças em relação aos objetivos desta tese.

Através da taxonomia do problema, pode se perceber os aspectos levados em consideração em um projeto de programação, bem como quais serão abordados neste documento.

Formulações clássicas para problemas de programação foram apresentadas indicando soluções do problema apresentado neste documento através de programação inteira mista e finalmente um trabalho extensivo apresentado por Ronen mostrou como a comunidade acadêmica enxerga o problema de programação aplicado ao transporte marítimo.

Particularmente, a última formulação deixa clara a diferença entre o trabalho apresentado por Ronen e pelo autor desta tese. A alta incerteza associada ao transporte marítimo dá ao primeiro trabalho pouca valia para a etapa operacional no destino deste navio, uma vez que um porto é servido por diferentes empresas, com diferentes planejamentos. De maneira nenhuma se desconsidera a demasiada necessidade e importância do planejamento logístico em um sistema de transporte, porém, quando as embarcações atingem seu porto de destino, um novo planejamento de curto prazo faz-se necessário, pois a entrada do navio depende de fatores já descritos, como disponibilidade do canal, do terminal, e algumas vezes da maré, e também de ventos.

Desta forma, este trabalho contribui para o estado da arte como uma visão operacional do sistema, aprimorando a entrada do navio no canal de acesso no momento, em que a informação de sua disponibilidade é atualizada e não com dias, ou até mesmo semanas de antecedência, como nos trabalhos encontrados na literatura.

Dada esta lacuna identificada, no próximo capítulo descrever-se-á o método desenvolvido para se aprimorar esta etapa do processo de importação e exportação de um país.

3. MÉTODO

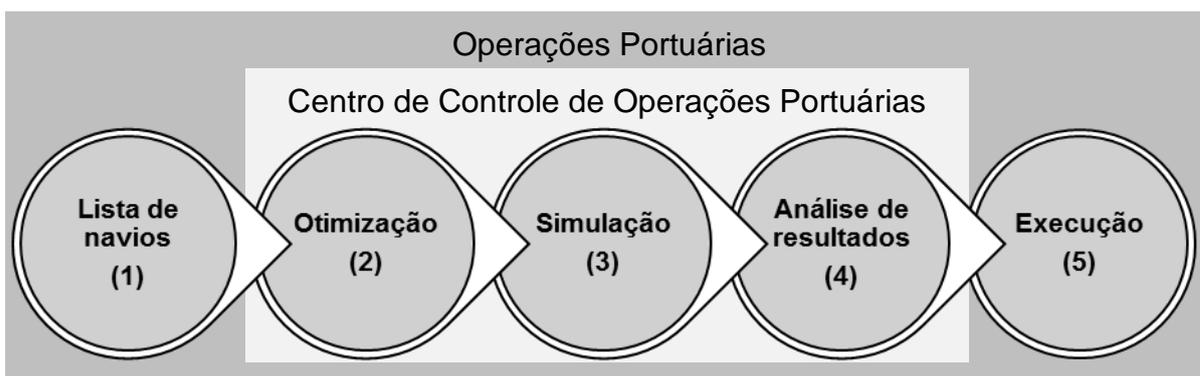
Neste capítulo são apresentados detalhadamente os modelos desenvolvidos para abordagem do problema em estudo. Iniciando por uma descrição detalhada do problema, será delimitado o escopo do estudo identificando, quando necessário, o que não fará parte do escopo da pesquisa. Em seguida, o modelo matemático de otimização será apresentado com sua formulação, limitações da sua solução analítica e técnicas heurísticas empregadas. Logo após, o detalhamento do modelo de simulação desenvolvido com seus sistemas e subsistemas, a parametrização do modelo, e a forma como as restrições físicas do sistema foram abordadas no modelo de simulação.

Por fim, apresenta-se a arquitetura construída de colaboração entre os dois modelos e como é dada a troca de informações entre eles.

3.1. DESCRIÇÃO DETALHADA DO PROBLEMA

Para a precisa descrição do método de análise proposto por este trabalho, o diagrama observado na Figura 17 resume o posicionamento deste trabalho no contexto portuário, bem como em quais etapas do processo decisório as técnicas apresentadas neste estudo são aplicadas.

Figura 17 – Método proposto para análise da operação portuária



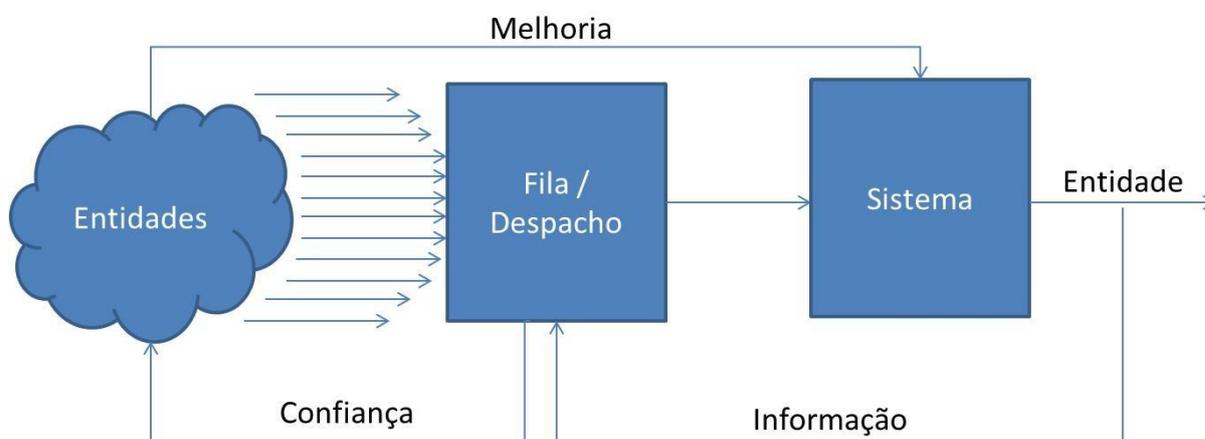
Fonte: o autor

Desta forma, o método proposto foi organizado da seguinte forma: (1) Lista de navios: são apresentadas as fontes de dados necessárias para condução do estudo, as variáveis que irão alimentar ambos os modelos propostos e o tratamento da

incerteza associada a cada variável; (2) Otimização: é apresentada a técnica de modelagem empregada no estudo, bem como as premissas associadas ao modelo, suas variáveis de decisão e métodos heurísticos de resolução; (3) Simulação: é apresentado o modelo conceitual da simulação, bem como detalhes da modelagem e a descrição do processo; (4) Análise de resultados: neste constam os indicadores de performance que deverão ser observados para validação do sistema e expectativas de ganhos em termos de produtividade do uso desta metodologia; por fim (5) execução que apresenta a forma como o sistema irá interagir com o sistema portuário real.

De maneira mais ampla, o autor defende que a gestão eficiente das operações portuárias pode ter efeito positivo no sistema como um todo, uma vez que o claro conhecimento das regras de despacho e priorização da fila de acesso ao canal gera além de uma operação mais eficiente, um ambiente de confiança entre os armadores e os terminais, reduzindo a incerteza do sistema, e gerando um ganho indireto, porém significativo de desempenho. Portanto, o problema modelado neste trabalho pode ser sintetizado através do diagrama a seguir (Figura 18).

Figura 18 – Diagrama do problema modelado



Fonte: o autor

A imagem indicando entidades (nuvem) representa a chegada dos navios no sistema portuário. Assim, cada navio chega de acordo com sua programação realizada pela sua origem (armadores e donos dos navios), portanto, não existe comunicação referente à ordem em que as mesmas deverão entrar no sistema. Sendo esse um dos motivos a observar-se a ocorrência de filas na região de fundeio. Ao se

posicionar um agente despachador com regras claras, objetivas e publicamente conhecidas, ditadas pelo algoritmo proposto por este trabalho, a ordem em que os navios ingressarão no sistema poderá tornar-se previsível, retroalimentando o sistema de filas, que por sua vez informará ao sistema e permitirá aos armadores um melhor planejamento, por observarem claramente a dinâmica do sistema. Assim, o sistema poderá ser beneficiado por não contar com filas maiores que as necessárias para sua alta eficiência.

No sistema estudado, cada entidade representa uma embarcação com características próprias, ou seja, cada uma tem seu porte, suas dimensões, seu destino e seu horário de chegada. Estes navios aguardam na área de fundeio até o momento de ingresso no canal de acesso rumo ao terminal.

No momento em que a autoridade portuária autoriza a entrada, um práctico é designado e conduz a embarcação pelo canal, utilizando ou não de barcos rebocadores. Neste presente estudo, o dimensionamento e alocação dos rebocadores é eficientemente grande a ponto de não interferir nas operações. A inclusão desta premissa poderá ser alvo de estudos futuros.

Enquanto o processo de entrada no canal não ocorre, novos navios chegam, e aguardam na região de fundeio da mesma forma. Este tempo de espera pode ser demasiadamente longo se o canal apresentar um alto índice de ocupação. Situação observada em períodos de safra, conforme noticiado em 2013 pela mídia (G1, 2013a). Devido ao tamanho atingido pela fila de acesso aos terminais (bem como a fila de saída), existe margem para que esta seja programada, alterando a ordem de entrada e reduzindo o tempo total de espera das embarcações. A lista de navios aguardando em fila alimenta um sistema decisório que definirá qual a próxima embarcação a adentrar o canal. A escolha desta embarcação retroalimenta a fila de despacho que irá ser processada novamente para a definição do próximo navio a ingressar no canal e assim por diante. Este ciclo fechado de decisão e retroalimentação irá ampliar a cooperação entre os armadores e a autoridade portuária, gerando sinergia no planejamento das operações de ambas as partes. Esta sinergia, conseqüentemente, poderá criar um ambiente de melhoria no sistema como um todo, no qual, os navios poderão se planejar melhor, evitando filas e gerenciando as janelas de atracação. Portanto, a principal contribuição almejada

com este trabalho é criação de um método de gestão, pautando-se em uma estrutura de programação matemática, que irá analisar e propor políticas de priorização na ordem de acesso ao canal, de forma a maximizar a ocupação desse recurso. A aplicação destas políticas levará à redução do tempo de estadia de um navio no porto, minimizando tanto seu tempo de espera para a entrada, quanto o tempo de espera para saída, independente da política de cruzamento experimentada pelo canal. Para tal contribuição, o autor desenvolveu dois modelos matemáticos que trabalharão de forma colaborativa e complementar: (1) um modelo cria as políticas de ocupação do canal, prescrevendo a ordem em que os navios deverão ingressar no canal de acesso, a partir do NOR (*Notice of Readness*) declarado pela embarcação; e (2) outro modelo consome a lista gerada pelo primeiro modelo, e com um maior foco em detalhes operacionais, simula o sistema, validando a prescrição proposta, bem como evidenciando potenciais desvios que não foram considerados na etapa anterior. Desta forma, a simulação irá indicar quais foram os resultados alcançados através dos principais índices de desempenho analisado em um porto (inclusive os mesmos utilizados hoje pela CODESP para analisar o tráfego).

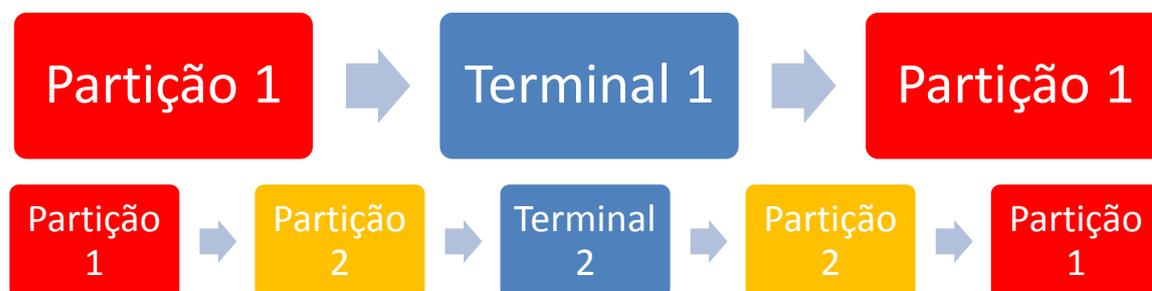
3.2. MODELO DE OTIMIZAÇÃO

A modelagem do problema em estudo seguiu uma abordagem simples inspirada em técnicas consagradas da otimização combinatória que foi definida por PAPADIMITRIOU e STEIGLITZ (1998) como todo problema que possui sua solução pertencente a um número finito de alternativas. Desta forma, a estratégia foi a construção do grafo direcional contendo todas as possíveis ligações entre os nós da malha. Optando-se pela notação AON (*Activity-on-node*), cada nó representa a alocação de um recurso por uma determinada tarefa. Será responsabilidade do algoritmo a de identificar quais arcos deverão ser desligados (restrições disjuntivas) respeitando os arcos de precedência do sistema (restrições conjuntivas). Como consequência, este algoritmo irá apontar quais restrições permanecerão ativas, ou seja, qual a ordem de atendimento das tarefas que o porto deverá cumprir.

Para desenvolvimento do modelo de otimização foi utilizado uma abordagem em sistemas proposta por CHURCHMAN e WEST, (1968), onde um sistema é sucessivamente decomposto em subsistemas com redução de escopo e crescente grau de detalhamento, até que esteja compatível com o objetivo do estudo.

O estudo foi baseado em um sistema marítimo composto por um porto, um conjunto de navios que desejam atracar neste porto. Cada trabalho (*job*) representa um navio que busca realizar suas operações (carregamento ou descarregamento). Para tal, ele deve percorrer um roteiro alocando recursos durante seu percurso para chegar ao terminal. Este roteiro envolve recursos do canal de acesso (denominado partições) e seu respectivo terminal. Cabe ressaltar que o terminal se encontra no centro das tarefas designadas ao trabalho, pois todas as partições necessárias para acesso ao terminal são ocupadas novamente no evento da saída do navio. Aí reside a natureza recirculatória deste problema (*rcrc*), como definida na sessão anterior. Esta representação do sistema pode ser observada na figura abaixo (Figura 19).

Figura 19 – Diagrama do Modelo Conceitual do sistema



Fonte: o autor

Um navio, ao atingir a área de fundeio, deverá identificar qual o terminal que pretende acessar. Para acessar este terminal, a embarcação necessariamente ocupará todas as partições até chegar ao seu destino. O acesso do navio está restrito a duas condicionantes: (1) inexistência de uma embarcação no mesmo sentido a uma distância menor que a distância mínima de segurança regulamentada pela CODESP (no caso de Santos, 1.000 metros); (2) inexistência de uma embarcação no sentido contrário ocupando a mesma partição. Esta segunda restrição impede o cruzamento de embarcações em sentidos contrários. Posteriormente, ainda sendo escopo deste trabalho, a restrição referente ao cruzamento será relaxada ao limite das regras de segurança estipuladas por PIANC, permitindo o cruzamento dos navios em sentidos opostos, no seu curso, conforme discutido na seção 2.1.4.

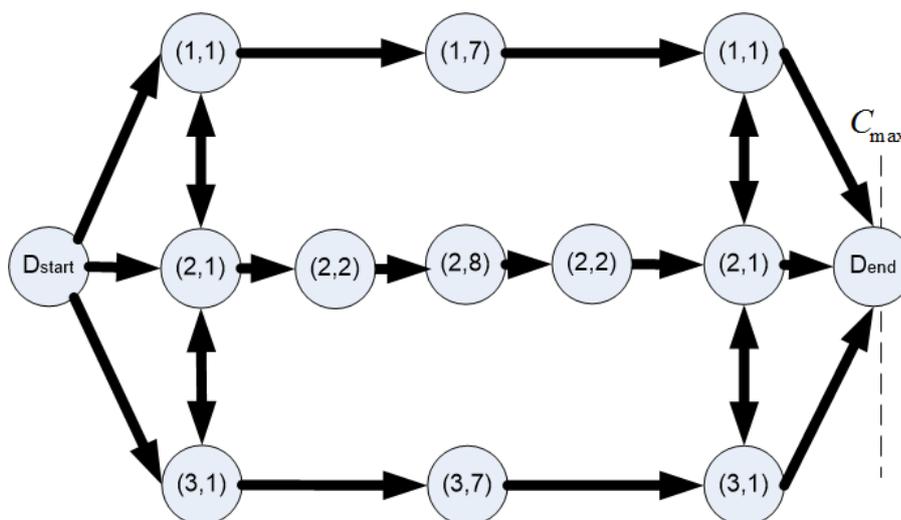
Existem dois pontos importantes na modelagem conceitual que definem o tipo de relações de precedência empregado neste trabalho: (1) a forma de modelagem dos

terminais; (2) o tratamento do roteiro de retorno. Por questões de generalização da implementação computacional do algoritmo desenvolvido para o presente trabalho, o uso do tipo de relações de precedência *job shop* foi preferido, em detrimento ao uso do *flow shop* por tratar cada terminal como um recurso diferente, conseqüentemente, cada *job* detentor de um roteiro particular. Caso fosse optado pelo *Flow shop*, os roteiros de todos os navios deveriam ser iguais (premissa fundamental de precedência). Esta premissa, logicamente, poderia ser contornada, caso o recurso em questão fosse tratado como um recurso flexível. Outro fator determinante foi a forma de modelagem do roteiro de retorno dos navios. Caso o fluxo do navio fosse independente do sentido percorrido, o uso do *flow shop* seria indicado, porém, durante a entrada, os navios percorrem o canal em ordem crescente de partições (da primeira, na entrada do canal até a última, no interior do canal). Já na saída, os navios percorrem em ordem inversa (da partição interior até a entrada do canal). Desta forma, o acesso a um recurso muda de precedente dependendo do seu estágio no processo (entrada ou saída), rompendo a relação de precedência fixa exigida pelas premissas do *flow shop*. Alguns autores reportam formas de contornar esta mudança, porém, por questões de generalidade, optou-se por estudar o caso mais genérico *job shop*, apesar do aumento de complexidade.

3.2.1. Modelo conceitual da otimização

Conceitualmente, o sistema descrito acima será modelado usando o esquema de *job shop*, através de um grafo direcional. Neste grafo, cada navio representa um trabalho, e as partições, bem como os terminais, serão representadas por recursos. Desta forma, o sistema é representado por um grafo conforme o diagrama abaixo (Figura 20), onde os índices dos nós representam o número do *job* e a máquina ocupada, respectivamente.

Figura 20 – Diagrama do Modelo Conceitual da Otimização – Grafo



Fonte: o autor

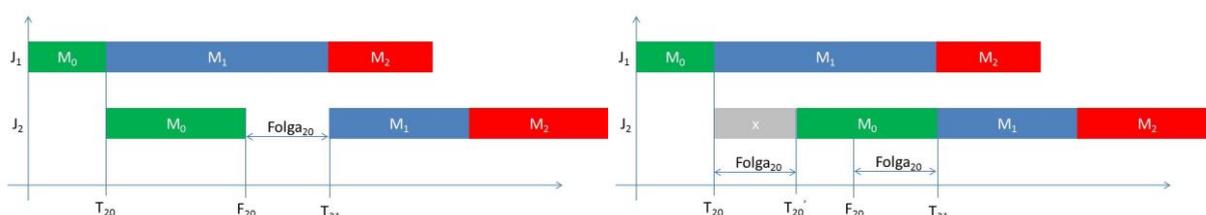
As setas unidirecionais representam as restrições conjuntivas, onde garantem a sequência das atividades percorridas pelos navios (roteiros). Estas controlam as condições de precedência entre os recursos de forma que um navio não seja alocado a uma partição posterior àquela mais próxima em determinado momento, ou seja, garante a execução ordenada das tarefas indicativas do percurso do navio pelo canal. Já as setas bidirecionais representam as restrições disjuntivas, onde representam decisões propriamente ditas do algoritmo. Estas restrições controlam qual navio será alocado antes em um recurso que está sendo disputado simultaneamente por outros navios, ou seja, quem passa primeiro e quem aguarda a próxima oportunidade para ingressar no canal.

A opção de se utilizar a estrutura de um *job shop* para se modelar o sistema se deu pelos cenários atuais, nos quais existem restrições ao cruzamento dos navios. No caso descrito, as partições de importação e exportação serão ocupadas simultaneamente sempre houver uma embarcação em uma destas partições (cenários de cruzamento proibido), ou dependendo do tamanho da boca da embarcação (cenários PIANC). Nos cenários onde o canal opera segundo a política de cruzamento livre em qualquer caso, o mesmo operará conforme um *flow shop* (que é o caso do Canal do Panamá) que pode ser empregado para estimação de capacidade do canal.

O problema em estudo pode ser formalmente descrito utilizando uma adaptação proposta à formulação de Pinedo (2010), sob o nome de *job shop under partial no-wait constraints*, ($J_n | pnwt | C_{max}$). Este problema parte de uma lista finita de tarefas (no caso, navios). Cada navio com suas características particulares (comprimento, largura, porte, data de chegada). O problema consiste em encontrar uma programação de trabalhos em que estes navios deverão ser atendidos de tal forma que o último navio termine seu atendimento com o menor tempo possível, respeitando as condições de precedência entre os trajetos percorridos, bem como a capacidade limitada dos recursos que irão receber estes navios (partições e terminais). Para endereçar tal problema, foi desenvolvida uma estrutura de dados cuja ideia central baseia-se na matriz de precedência descrita anteriormente e que define a sequência em que os navios deverão percorrer para serem atendidos.

No sistema marítimo, não existe a possibilidade de que um navio aguarde durante seu trânsito. Portanto, não se conta com uma espécie de *buffer* ou espera durante o cruzamento do navio ao canal de acesso. Portanto, os únicos pontos de espera sendo a área de fundeio, no evento de sua entrada, e o terminal, no evento de sua saída. Desta forma, o sistema conta com áreas destinadas para este fim são especificamente tratadas como um recurso particular. Por este motivo, o tratamento das folgas é um importante conceito a ser tratado no processo de modelagem para que a otimização gere sequências não somente factíveis em termos matemáticos, mas também em termos operacionais. Por isso, na maior parte das alocações não pode haver folgas entre uma atividade e a imediatamente posterior dentro de um mesmo trabalho (*job*, navio), exceto na entrada do porto, e na saída do terminal. Daí segue a incorporação da propriedade “*partial no-wait*” da modelagem proposta. Em termos práticos, o tratamento de folga pode ser observado nas figuras abaixo (Figura 21).

Figura 21 – Gantt com e sem folga



Fonte: o autor

3.2.2. Formulação matemática

É assumida uma lista de trabalhos (navios) que aguardam em fila (área de fundeio de um porto) para percorrer o canal de acesso, dividido em uma série de partições, até atingir seu terminal de destino (direção de entrada), operar, e percorrer o canal no sentido de saída (todos modelados como recursos).

Dependendo da política de operação do canal, os recursos do canal terão um nível de flexibilidade. Desta forma, quando a política for LIBERADA, as partições de saída terão índices diferentes das partições de entrada, não influenciando a alocação do sentido oposto; já quando a política for BLOQUEADA, as partições de saída e entrada terão os mesmos índices, fazendo com que a ocupação da entrada bloqueie a saída, e vice-versa. Por fim, a política PIANC faz com que, a largura da boca do navio bloqueie ou não o sentido oposto do fluxo de navios no canal. O problema descrito foi formulado da seguinte forma, Tabela 5, e Tabela 6.

Tabela 5 – Descrição de parâmetros do modelo de otimização

Param	descrição	domínio
j	índice do navio	$j \in J$
s	índice da sequencia no processo	$s \in S$
$M_{(j,s)}$	Matriz de índices do recurso associado ao navio j na etapa s	$M_{(j,s)} \in M$
$N_{(j,s)}$	Matriz de índices do <i>no-wait</i> associado ao navio j na etapa s	$N_{(j,s)} \in N$
$P_{(j,s)}$	Matriz de duração associada ao trânsito do navio j na etapa s	$P_{(j,s)} \in P$
$D_{(j,s)}$	Matriz de direção associada ao navio j na etapa s	$D_{(j,s)} \in D$
K	Valor grande positivo	R

Tabela 6 – Descrição das variáveis de decisão do modelo de otimização

Var.	descrição	domínio
$X_{j,s,M_{(j,s)},D_{(j,s)},N_{(j,s)}}$	Variável de decisão que representa o tempo de início do navio j , na sequencia s , ao recurso $M_{(j,s)}$, direção $D_{(j,s)}$, e que possui <i>no-wait</i> $N_{(j,s)}$	R
$B_{(j,s,M_{(j,s)},D_{(j,s)},N_{(j,s)}),(j',s',M_{(j',s')},D_{(j',s')},N_{(j',s')})}$	Variável binária de decisão indicadora de precedência entre o recurso $M_{(j,s)}$, na direção, $D_{(j,s)}$ entre o navio j (na posição s) ou navio j' (na posição s')	$\{0, 1\}$
C_{max}	Tempo de atendimento e toda a lista de navios	R

Tabela 7 – Formulação

$$\text{Minimizar } Z = C_{\max} \quad (1)$$

Sujeito à:

$$X_{j,s+1,M_{(j,s+1)},D_{(j,s+1)},N_{(j,s+1)}} - X_{j,s,M_{(j,s)},D_{(j,s)},N_{(j,s)}} \geq p_{j,s,M_{(j,s)},D_{(j,s)},N_{(j,s)}} \quad \begin{array}{l} \forall j \in J \\ \forall s \in S \\ \text{se } N_{(j,s)} = 0 \end{array} \quad (2)$$

$$X_{j,s+1,M_{(j,s+1)},D_{(j,s+1)},N_{(j,s+1)}} - X_{j,s,M_{(j,s)},D_{(j,s)},N_{(j,s)}} = p_{j,s,M_{(j,s)},D_{(j,s)},N_{(j,s)}} \quad \begin{array}{l} \forall j \in J \\ \forall s \in S \\ N_{(j,s)} = 1 \end{array} \quad (3)$$

$$X_{j,s,M_{(j,s)},D_{(j,s)},N_{(j,s)}} - X_{j',s',M_{(j',s')},D_{(j',s')},N_{(j',s')}} \geq p_{j',s',M_{(j',s')},D_{(j',s')},N_{(j',s')}} - K \quad \begin{array}{l} \forall j, j' \in J \\ j \neq j' \\ \forall s, s' \in S \\ D_{(j,s)} = D_{(j',s')} \text{ se } \{1,2\} \\ D_{(j,s)} \neq D_{(j',s')} \text{ se } \{3\} \end{array} \quad (4)$$

$$X_{j',s',M_{(j',s')},D_{(j',s')},N_{(j',s')}} - X_{j,s,M_{(j,s)},D_{(j,s)},N_{(j,s)}} \geq p_{j,s,M_{(j,s)},D_{(j,s)},N_{(j,s)}} - K \quad (5)$$

$$(1 - B_{(j,s,M_{(j,s)},D_{(j,s)},N_{(j,s)}),(j',s',M_{(j',s')},D_{(j',s')},N_{(j',s')})})$$

$$C_{\max} - X_{j,s,M_{(j,s)},D_{(j,s)},N_{(j,s)}} \geq p_{j,s,M_{(j,s)},D_{(j,s)},N_{(j,s)}} \quad (6)$$

$$C_{\max} \geq 0 \quad (7)$$

$$B_{(j,s,M_{(j,s)},D_{(j,s)},N_{(j,s)}),(j',s',M_{(j',s')},D_{(j',s')},N_{(j',s')})} \in \{0,1\} \quad (8)$$

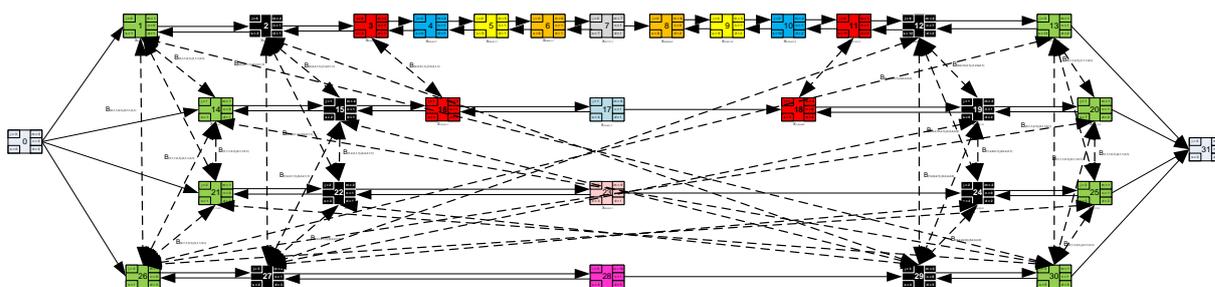
$$X_{j,s,M_{(j,s)},D_{(j,s)},N_{(j,s)}} \geq 0 \quad (9)$$

A formulação proposta possui premissas fundamentais para a modelagem do problema com recirculação: (1) cada trabalho pode visitar certos recursos múltiplas vezes; (2) qualquer par de tarefas sequenciais devem ser realizadas por recursos distintos; (3) cada recurso é capaz de realizar uma tarefa distinta (não existe redundância no sistema, excluindo a possibilidade de modelagem de sistemas flexíveis); (4) o momento de liberação é zero, assumindo que a fila já existe; (5) não existe interrupção na execução de uma tarefa, bem como quebras e paradas (vale ressaltar que esta premissa se refere à propriedade *nonpreemption* e não à restrição

de *no-wait*); e por fim, (6) as rotas são conhecidas à priori do momento de execução da otimização.

Estas premissas são bem pertinentes ao problema de alocação de tarefas logísticas, uma vez que no caso marítimo, um navio não pode se sujeitar à interrupção de processo uma vez iniciado o transporte (premissa 6), não existe redundância nos recursos ocupados durante seu percurso (premissa 3), existem múltiplas visitas, não sequenciais ao mesmo recurso: uma na entrada do navio e uma na saída do navio (premissa 1). Como um exemplo ilustrativo, é apresentado o caso de uma programação fictícia de navios ingressando em um canal de acesso aos terminais portuários e sua posterior saída, com a programação adequada para ocupação dos recursos.

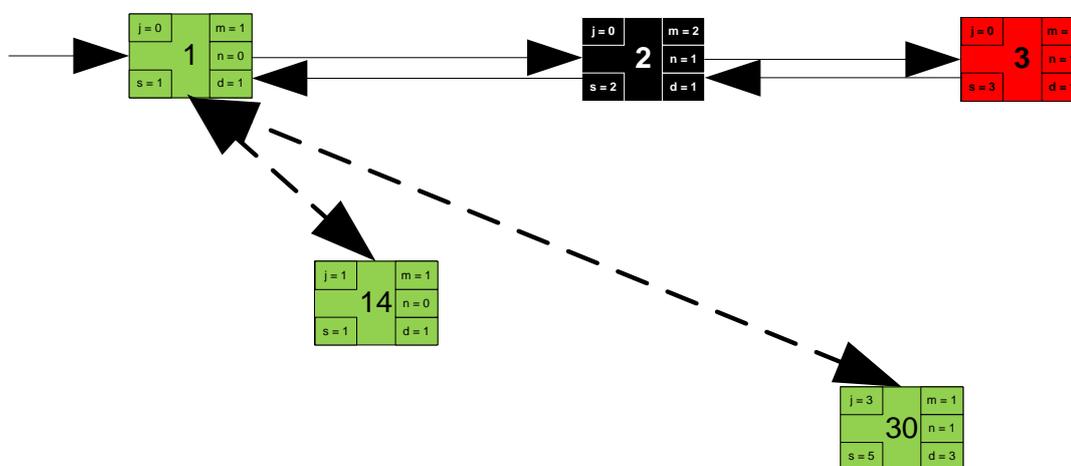
Figura 22 – Exemplo ilustrativo da modelagem proposta



Fonte: o autor

Seguindo a formulação proposta pelo autor, foi utilizado um problema exemplo, formulando a entrada de 4 navios (Figura 22).

Figura 23 – Exemplo ilustrativo da modelagem proposta (detalhe de restrições)



Fonte: o autor

Os principais elementos do modelo são: (1) restrições de continuidade parcial (*wait* e *no-wait*); (2) restrições conjuntivas; (3) restrições disjuntivas de precedência de recursos; (4) restrições disjuntivas de cruzamento.

Neste exemplo, tomando o vértice 1 apresentado na Figura 23 e representado pela tupla (j,s,m,n,d) com valores $(0,1,1,0,1)$ e que representa a ocupação da primeira partição do primeiro navio ($j=0$), como sendo a primeira etapa da sua sequência de ocupações ($s=1$), estando na direção de entrada ($d=1$), e não ser uma etapa que deve ser contínua em relação à sua etapa posterior ($n=0$), por não ser imposta a condição de *no-wait*. Seguindo no mesmo navio, existe um arco bidirecional em sua restrição conjuntiva. Este arco impõe a condição *no-wait*, uma vez que não pode haver folga envolvendo estas duas tarefas. Já conectando ao vértice $(1,1,1,0,1)$ existe uma restrição disjuntiva de precedência de recursos, pois se trata da ocupação da primeira partição pelo segundo navio. Neste caso, o arco será unidirecional, cujo sentido será definido pela variável de decisão binária b . Por fim, o vértice $(3,1,5,1,3)$ representa a ocupação da primeira partição do canal pelo quarto navio da lista de programação, na sua saída do canal. Desta forma, trata-se da aplicação da restrição de cruzamento, pois a decisão de liberar a entrada do primeiro navio, ou a saída do quarto deve levar em consideração que durante sua saída, o canal deverá estar bloqueado para qualquer outra movimentação simultânea na mesma partição. Desta forma, apresentando um fragmento do modelo desenvolvido, têm-se as seguintes equações:

$$\text{(conj. wait)} \quad x_{0,1,1,1,0} - x_{0,0,1,0,0} \geq p_{0,0,1,0,0}$$

$$\text{(conj. no-wait)} \quad x_{0,2,2,1,0} - x_{0,1,1,1,0} = p_{0,1,1,1,0}$$

$$\text{(disj. precedência de recursos)} \quad x_{j',m,s',d,n} - x_{j,m,s,d,n} \geq p_{j,m,s,d,n} - M * b_{m,d,j,s,j',s'}$$

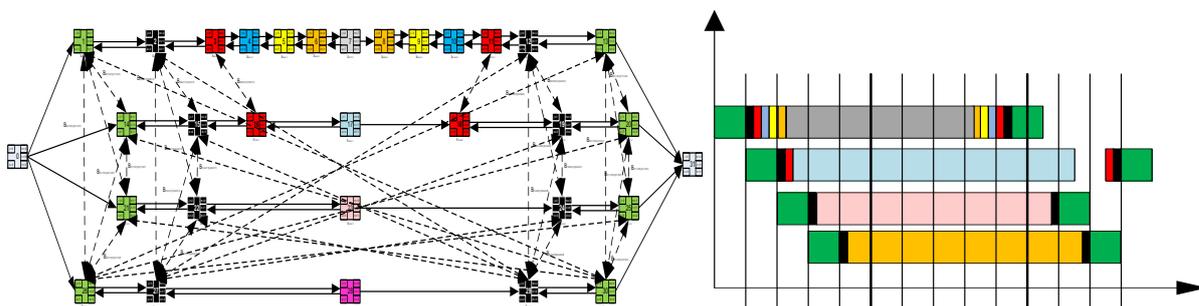
$$\text{(disj. precedência de recursos)} \quad x_{j,m,s,d,n} - x_{j',m,s',d,n} \geq p_{j',m,s',d,n} - M * (1 - b_{m,d,j,s,j',s'})$$

$$\text{(disj. cruzamento)} \quad x_{j',m,s',d,n} - x_{j,m,s,d,n} \geq p_{j,m,s,d,n} - M * b_{m,d,j,s,j',s'}$$

$$\text{(disj. cruzamento)} \quad x_{j,m,s,d,n} - x_{j',m,s',d,n} \geq p_{j',m,s',d,n} - M * (1 - b_{m,d,j,s,j',s'})$$

Desta forma, o grafo completo exemplificado, bem como o gráfico de Gantt pode ser visualizado na Figura 24.

Figura 24 – Programação exemplo (solução)



Fonte: o autor

Portanto, ordem otimizada: 1 -> 2 -> 3 -> 4

3.2.3. Dados de entrada

Este sistema depende de dados de entrada que serão apresentados como: (1) dados de estrutura; (2) dados de tempos.

Os dados de estrutura representam todas as informações necessárias para construir as restrições do sistema. Estes dados serão incluídos no modelo na forma de restrições. Para a modelagem das restrições conjuntivas, inicialmente, é necessário conhecer qual é a sequência de atividades percorrida por cada navio. Para esta representação, será utilizada uma matriz de adjacência, que, segundo LEISERSON et al. (2001), é gerada considerando-se um grafo direcionado $G = (V, E)$, onde V representa os vértices do grafo (nós), e E representa as arestas do grafo (arcos). A matriz de adjacência, para cada tarefa, é representada através de uma matriz quadrada de dimensões $|V| \times |V|$, onde seus elementos formam o conjunto $A = a_{ij}$, tal que:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se } (i, j) \in E \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Esta matriz será independente para cada terminal modelado, uma vez que navio somente poderá seguir um caminho, inequivocamente. Em termos realísticos, esta premissa somente poderá ser relaxada caso fosse modelado não o terminal, mas o berço, ou seja, o terminal contando com a possibilidade de atracação de múltiplos navios. Esta flexibilidade ficará como uma possível evolução do trabalho.

Em seguida, serão modeladas as restrições disjuntivas, que tratam diretamente do processo decisório do algoritmo desenvolvido.

Já os dados de tempo, referentes ao tempo de navegação em cada partição tanto na entrada, quanto na saída, bem como o tempo de operação da embarcação, serão baseados em dados históricos de movimentação das embarcações, e também no tempo de operação dos terminais. Por se tratar de um sistema de programação determinístico, cada tempo de percurso e operação será uma constante identificada durante o tratamento dos dados.

3.2.4. Implementação

Vencida a etapa de modelagem, faz-se necessária a compreensão da forma como o problema será abordado em termos computacionais, uma vez que a construção do código poderá influenciar na modelagem e vice-versa.

Para o desenvolvimento proposto o algoritmo foi desenvolvido utilizando a linguagem Java devido ao seu grande uso em larga escala, portabilidade, e estar baseada no paradigma de orientação a objeto.

Logicamente que existem opiniões contrárias ao uso desta linguagem em algoritmos de grande performance, principalmente com o advento do uso de sistemas embarcados e web. Uma abrangente discussão sobre o uso de linguagens, com comparações objetivas quanto à performance de cada uma delas pode ser verificado por PRECHELT (2000), ou então um experimento interessante com a codificação de uma mesma função em linguagens diferentes realizada pelo pesquisador e engenheiro de software Robert Hundt (2011), membro da empresa Google.

Assim, partindo-se da orientação objeto do Java, são descritas as classes que fundamentam o algoritmo desenvolvido.

3.2.4.1. Atividade

A forma abstrata de representar o percurso total vencido pelos navios é denominada atividade, sendo este, portanto o conceito básico do algoritmo desenvolvido. A estrutura de dados que irá representar cada atividade irá abrigar uma série de informações utilizada durante o processo de otimização. No contexto apresentado a atividade possui, além do atributo identificador, um conjunto de marcações de

tempo, armazenando, para cada navio, o momento de início da execução desta, o momento de termino, a duração e o identificador do navio. Em termos computacionais, a atividade foi modelada através de uma classe com as seguintes propriedades: (1) Id; (2) tag; (3) inicio; (4) termino; (5) duração; e (6) tarefa. (Figura 25).

Figura 25 – Classe Atividade

Atividade
ID
Inicio
Término
Duração
ID Recurso
ID Direção
ID Trabalho
Tipo de precedência

Fonte: o autor

Portando as principais informações necessárias para execução do algoritmo, a classe ATIVIDADE representa o nó do grafo construído para solução do problema de programação de produção.

3.2.4.2. Trabalho

Já o trabalho representa a entidade que percorrerá diversas atividades sequencialmente de forma a sofrer as transformações necessárias durante o processo, consumindo tempo durante a ocupação destes recursos. Por este motivo, ela possui duas informações básicas: seu identificador, e a ordem em que as atividades serão alocadas (definidas pelo seu roteiro). Em termos computacionais, o trabalho possui as seguintes propriedades: (1) Id; (2) tag; e (3) lista de atividades (Figura 26).

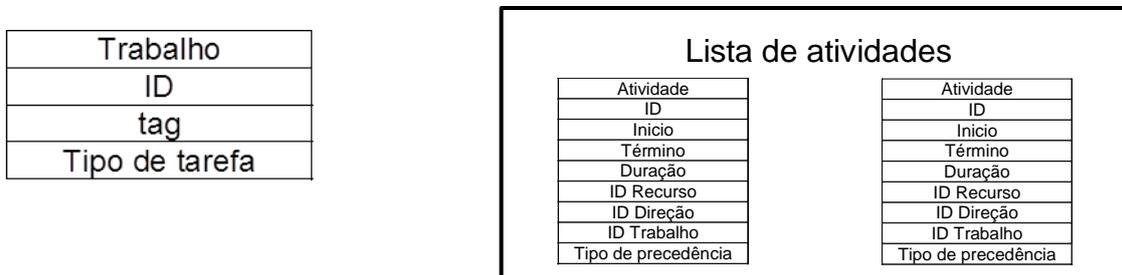
Figura 26 – Classe tarefa

Trabalho
ID
tag
Tipo de tarefa

Fonte: o autor

Desta forma, o relacionamento entre estas duas entidades ocorre segundo o diagrama abaixo (Figura 27).

Figura 27 – Classe tarefa x Classe atividades



Fonte: o autor

3.2.4.3. Heurística construtiva

Conhecidas as estruturas de dados que armazenarão as informações providas ao sistema através dos dados de entrada, a seguir será descrito, através do algoritmo 1, como a solução inicial será construída.

Algoritmo 1: Pseudocódigo de solução do problema

1. Verifica se existem tarefas sem alocação
 2. Calculam-se os tempos de operação para a primeira tarefa
 3. Calculam-se os tempos de operação para a próxima tarefa, levando em consideração as restrições geradas pelas tarefas anteriores
 4. Repete etapa 3, para as demais tarefas
 5. Termina a construção
-

3.2.4.4. Lógica de busca local – 2opt

A heurística apresentada na seção anterior descreve o processo de construção da solução inicial. Assim, de uma maneira sistemática define-se o ponto de partida para se buscar uma melhor solução. O processo de busca local pode acelerar a identificação de uma melhor solução. Não se tem garantia de que seja encontrada a ótima, mas em termos práticos observa-se melhoria significativa nesta etapa.

Uma vez construída a vizinhança, neste trabalho utiliza a estratégia de busca da melhor solução vizinhança pesquisada, ou seja, a cada iteração o algoritmo percorre todos os elementos dentro de uma vizinhança e aquele que gerar a melhor redução da função objetivo será assumida como solução atual.

Caso após certo número de iterações nenhuma melhoria seja alcançada, o algoritmo termina, concluindo que se trata de um ótimo local.

Algoritmo 2: Pseudocódigo de procedimento de Busca Local

1. **Input:** Solução com makespan, número de iterações limite
 2. **Output:** Solução com menor ou igual makespan
 3. Número de iterações = 0
 4. Solução atual = Solução incumbente
 5. Enquanto (número de iterações < número de iterações limite)
 6. Inclui no topo das vizinhanças a vizinhança incumbente
 7. Gera vizinhança trocando pares de elementos vizinhos
 8. Avalia todas as soluções da vizinhança
 9. Identifica a menor das penalidades no conjunto de vizinhança
 10. Se (menor solução dentro da vizinhança = solução na primeira linha)
 11. Número de iterações ++
 12. Senão
 13. Número de iterações = 0
 14. Solução incumbente = Solução atual
 15. Fim Se
 16. Fim Enquanto
 17. **Retorna:** Solução incumbente
-

3.2.4.5. Lógica de Metaheurística – Simulated Annealing

Diferente da busca local que, segundo HENTENRYCK e MICHEL, (2009), se caracteriza pela total falta de memória, as metaheurísticas tipicamente incluem algum tipo de memória com o papel fundamental de escapar do ótimo local encontrado pela busca local, em direção ao ótimo global (mesmo que nem sempre este seja atingido). Desta forma, o pseudocódigo anterior pode ser modificado para o descrito a seguir:

Algoritmo 3: Pseudocódigo de procedimento de Simulated Annealing

1. **Input:** Solução com penalidade atual, número de iterações limite; Temperatura Final; Constante de resfriamento
 2. **Output:** Solução com menor ou igual penalidade
 3. Número de iterações = 0
 4. Solução atual = Solução incumbente
 5. Enquanto (temperatura atual > temperatura final)
 6. Gera solução de teste a partir da solução atual
 7. $r =$ valor aleatório entre 0 e 1
 8. Se (penalidade de teste < penalidade atual) ou ($r < e^{-\Delta\text{penalidade}/\text{temperatura}}$)
 9. Solução atual = Solução em teste
 10. Se (penalidade de teste < penalidade atual)
 11. Solução incumbente = Solução atual
 12. Número de iterações ++
 13. Temperatura atual = temperatura atual * Constante de resfriamento
 14. Identifica a menor das penalidades no conjunto de vizinhança
 15. Fim Enquanto
 16. **Retorna:** Solução incumbente
-

Desta forma, depois de percorrido o procedimento descrito acima, tem-se uma lista de tarefas, cuja principal característica é a redução do tempo total de atendimento, ou seja, o prazo total até que a última tarefa saia do sistema se executada na sequência proposta é menor que o mesmo indicador se as tarefas forem executadas simplesmente na ordem em que surgiram no sistema (utilizando regra FIFO).

Cabe ressaltar que é claro para o autor deste trabalho que não se trata de uma sequência ótima, uma vez que a heurística descrita não se fundamenta por provas matemáticas formais para que se garanta a otimalidade, porém, em termos gerenciais, o processo de decisão sistemático, balizado por um procedimento de melhoria pode levar ao aumento de produtividade de um sistema quando comparado com decisões baseadas em critérios subjetivos e muitas vezes inapropriados para tal.

Uma vez gerada esta lista de tarefas, e ordenadas de forma a se reduzir o tempo total de execução, a mesma servirá de dado de entrada para o modelo de simulação que irá incorporar uma série de detalhamentos não tratados pela etapa de otimização devido à sua complexidade.

3.2.4.6. Análise da otimização

Para realização da análise serão realizadas comparações entre instâncias menores do problema proposto, de acordo com duas formas de solução: (1) otimização e (2) heurística. Esta análise será realizada com o incremento do número de *Jobs* até o limite da capacidade da otimização, dado seu comportamento exponencial pela natureza NP-Difícil do problema em estudo.

A otimização foi resolvida utilizando o *software* Gurobi, em um computador com processador Intel i7, e 8 Gb de memória RAM.

A heurística desenvolvida fora testada antes de incorporada ao presente trabalho. Para tal comparação, utilizou-se como referência o artigo (TAILLARD, 1993) que concentra um conjunto de instâncias de problemas para avaliação. Sendo sua legenda indicativa tai20x5 representando um problema de 20 *jobs* e 5 máquinas. E a performance foi medida pela diferença relativa ao resultado apresentado pelo algoritmo desenvolvido, ou seja, a diferença entre os valores dividido pelo valor referência.

Tabela 8 – Dados de performance do algoritmo

	Instância 1	Instância 2	Instância 3	Instância 4	Instância 5	Instância 6	Instância 7	Instância 8	Instância 9	Instância 10
tai20x5	-5,4%	-0,7%	-12,9%	-7,2%	-5,1%	-7,2%	-6,2%	-10,1%	-8,9%	-9,2%
tai20x10	-12,8%	-9,9%	-11,0%	-13,6%	-13,2%	-8,6%	-10,8%	-10,7%	-6,7%	-5,3%
tai20x20	-30,4%	-30,9%	-37,0%	-32,9%	-32,7%	-28,0%	-32,9%	-26,6%	-37,4%	-25,7%
tai50x5	-1,8%	-5,9%	-5,4%	-3,9%	-2,3%	-4,0%	-3,2%	-4,8%	-5,3%	-1,6%
tai50x10	-16,8%	-15,7%	-17,9%	-14,6%	-16,8%	-15,8%	-12,6%	-12,0%	-16,8%	-14,8%
tai50x20	-16,4%	-17,6%	-18,9%	-18,3%	-19,9%	-19,1%	-20,2%	-17,3%	-16,9%	-16,8%
tai100x5	-4,7%	-5,6%	-4,0%	-6,6%	-5,3%	-5,2%	-6,3%	-6,1%	-5,0%	-6,8%
tai100x10	-11,9%	-14,4%	-11,2%	-13,5%	-14,7%	-12,9%	-10,4%	-12,5%	-10,6%	-9,9%
tai100x20	-16,7%	-15,7%	-17,1%	-17,5%	-16,2%	-16,3%	-17,5%	-17,3%	-16,9%	-17,0%
tai200x10	-7,9%	-10,5%	-8,8%	-7,1%	-10,7%	-11,6%	-9,9%	-11,2%	-10,9%	-9,7%

Portanto, a heurística, embora não tenha superado o resultado apresentado por Taillard, se manteve na faixa de 13% dos limites inferiores propostos pela referência. Devido à complexidade do problema apresentado, nenhum deles foi resolvido até atingir sua otimalidade, porém os resultados foram satisfatórios para a apresentação conceitual do problema proposto. Percebe-se claramente a discrepância de resultados observado na instância “tai20x20” que apresentou uma diferença média de 31,5% em relação ao benchmark. Retirando esta instância da análise (tratando-a como *outlier*), a performance média do algoritmo atinge uma diferença média de 11,4%. Por outro lado, as instâncias “tai50x5”, “tai100x5” e “tai20x5” apresentaram uma boa performance, embora ainda inferior ao *benchmark*, sendo 3,8%, 5,5% e 7,3% respectivamente. A melhoria da performance do mesmo, portanto, poderá ser alvo de futuras investigações.

3.3. MODELO DE SIMULAÇÃO

O sistema modelado é composto por diversos terminais portuários, cada um deles é formado por subsistemas independentes com as seguintes características operacionais: recursos (berços), perfil de frota (Graneleiro, Porta-Container, etc.), demanda (Mtpa) e restrições. Desta forma os subsistemas do modelo de simulação são detalhados da seguinte forma (Tabela 9).

Tabela 9 – Principais características dos subsistemas modelados

Elemento	Escopo
Terminal	Gerador de demanda de navios
	Possui frota específica, definida pelas informações:
	Carga útil (máx., moda, min)
	Largura (máx., moda, min)
	Comprimento (máx., moda, min)
	Calado (máx., moda, min)
	Terminal de destino
Área de fundeio	Delimitação no mar para espera
	Local de espera das embarcações
Canal	Conjunto de recursos que devem ser alocados sequencialmente
	Largura de cada trecho do canal

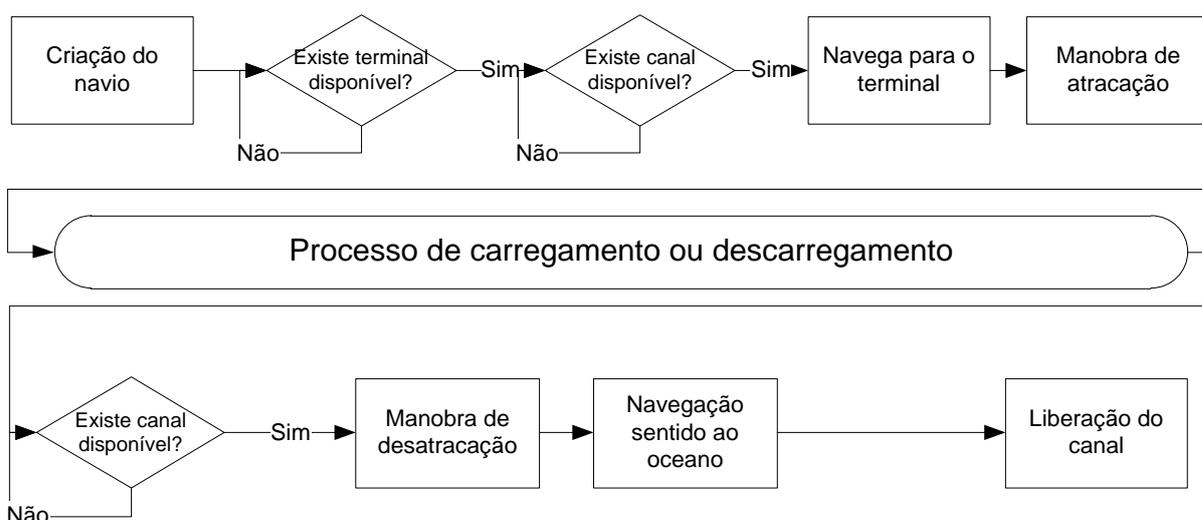
Profundidade
 Calado máximo permitido
 Velocidade máxima permitida
 Tempo para execução do giro

Todos os terminais são atendidos (quer seja para importação, ou exportação) por embarcações que, ao prover o NOR (*Notice of Readness*), seguem a ordem proposta pela autoridade portuária para entrada do canal. Estas informações são utilizadas pelo despachador que irá direcionar o navio ao seu destino assim que houver disponibilidade do sistema.

3.3.1. Modelo conceitual da simulação

Em termos conceituais, cada entidade (navio) percorre as seguintes etapas durante o processo de importação ou exportação.

Figura 28 – Diagrama do Modelo Conceitual da Simulação



Fonte: o autor

Inicialmente será descrito o processo de geração dos navios, uma vez que se trata do ponto de início do processo estudado. De acordo com Ross (2010), tempo entre a chegada de entidades a um ponto de espera pode ser modelada utilizando variáveis aleatórias exponenciais com parâmetro λ representando a taxa de chegadas (número de eventos por unidade de tempo). Desta forma, pode-se capturar no modelo tanto o comportamento da chegada de entidades em um curto intervalo de tempo quanto em um longo, deixando margem para a ocorrência de

filas. Logo, o processo de chegada dos navios respeita uma distribuição exponencial com taxa calculada utilizando a seguinte fórmula.

$$\lambda = \frac{N_i}{T} \quad (1)$$

Onde:

N_i representa o número de navios atendidos pelo terminal i

T representa o tempo total de análise dos dados

Uma vez conhecido o número de navios que serão atendidos por cada terminal, bem como o intervalo entre as chegadas destes navios, será necessária a determinação das propriedades físicas do navio que serão descritas na próxima seção.

O subsistema navios associa as entidades do sistema às suas configurações básicas: (1) calados; (2) comprimentos; (3) cargas; (4) larguras (boca). Em cada momento do tráfego, algumas destas características são avaliadas para tomada de decisão do modelo. Como exemplo, tem-se que o comprimento gera maior ou menor restrição na entrada de uma nova embarcação no canal. Largura restringe o tráfego de mão dupla ou singela, caso o canal esteja operando sobre a regra de PIANC. O calado poderá ser usado para avaliar a disponibilidade do canal no que se refere à maré, permitindo ou não a entrada das embarcações.

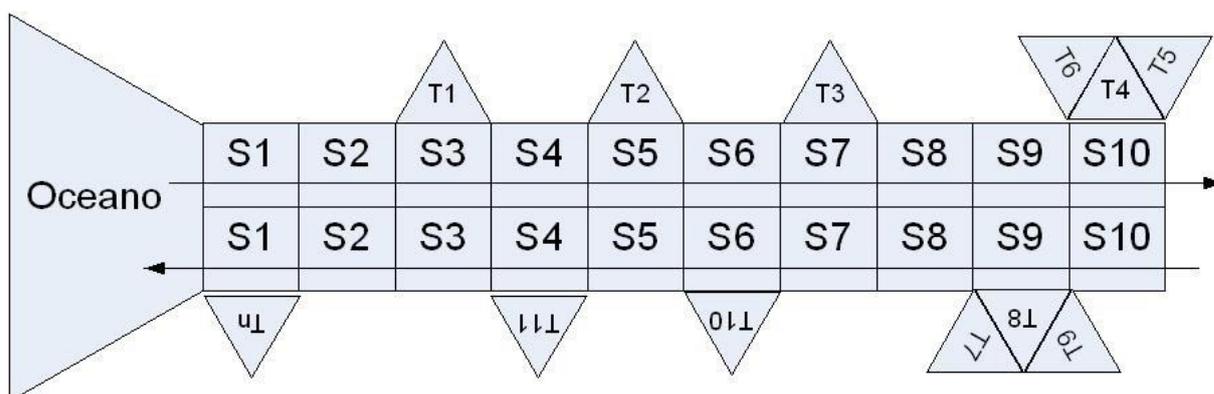
Cabe ressaltar que as variáveis de principal importância para este estudo são as relacionadas com tempo, portanto mesmo conhecendo o fato de transitar em um canal navios de diversos tipos (graneleiros, porta-contêiner, tanques), não será analisado o processo de retro área, portanto, através do porte do navio (total de carga transportada), será calculada uma taxa operacional (ou taxa comercial, descrita posteriormente) na qual a operação do navio será submetida, independente de qual produto este esteja efetivamente transportando.

Este navio, agora com sua data de chegada ao terminal, bem como suas características físicas já estabelecidas, irá percorrer um trajeto formado por partições até atingir o terminal e iniciar sua operação.

O subsistema partições agrupa todas as características do trecho físico do canal. Uma partição é definida como uma subdivisão do canal, com comprimento e largura

configurável. Nesta, diversas propriedades podem ser parametrizadas e gerarão impacto no tráfego do navio dentro do canal. Estão incluídas as seguintes configurações: (1) Largura da partição: a largura indica a distância entre as margens do canal. Esta distância será analisada na entrada de cada navio, caso a regra de PIANC (Permanent International Association of Navigation Congresses) esteja ativada; (2) Velocidade do canal: a velocidade (em nós) exercida pelo navio enquanto percorre o canal. Esta velocidade é única para toda a frota, podendo ser futuramente configurada por tipo de navio. Finalmente (4) Tempo de manobra: este parâmetro, em minutos, define o tempo despendido pelo navio quando, ao atracar, o mesmo necessita permanecer no canal realizando algum tipo de manobra (giro). O canal pode ser esquematicamente representado pelo diagrama da Figura 29.

Figura 29 – Modelo conceitual do canal – Partições



Fonte: o autor

Na Figura 29, observa-se a possibilidade da existência de mais de um terminal associado à mesma partição (partição 10, terminais 4, 5 e 6). Isso é plenamente possível, uma vez que a dimensão de uma partição pode chegar a um ou dois quilômetros, dependendo da forma de modelagem.

O subsistema de terminais consolida toda a caracterização da etapa do processo que gera a demanda de navios no sistema. O parâmetro fundamental deste subsistema é a demanda (em toneladas/ano) do terminal. Esta demanda irá gerar certo número de embarcações suficientemente grande para escoar todas estas toneladas através dos navios. É importante ressaltar que a demanda pode ser tanto de importação quanto de exportação, portanto, para o modelo em estudo a demanda não será especificada quanto ao sentido do fluxo.

Para atendimento desta demanda, os terminais contam com pontos de atracação que irão acomodar os navios. Estes pontos foram caracterizados por berços. Assim, o número de navios acomodados simultaneamente é igual ao número de berços. Existe a possibilidade de evolução do modelo para a configuração de cais. Neste caso, o tamanho do navio seria levado em consideração para definição do número de navios que poderão atracar. Seria então levada em consideração a distância mínima entre os navios para amarração e segurança.

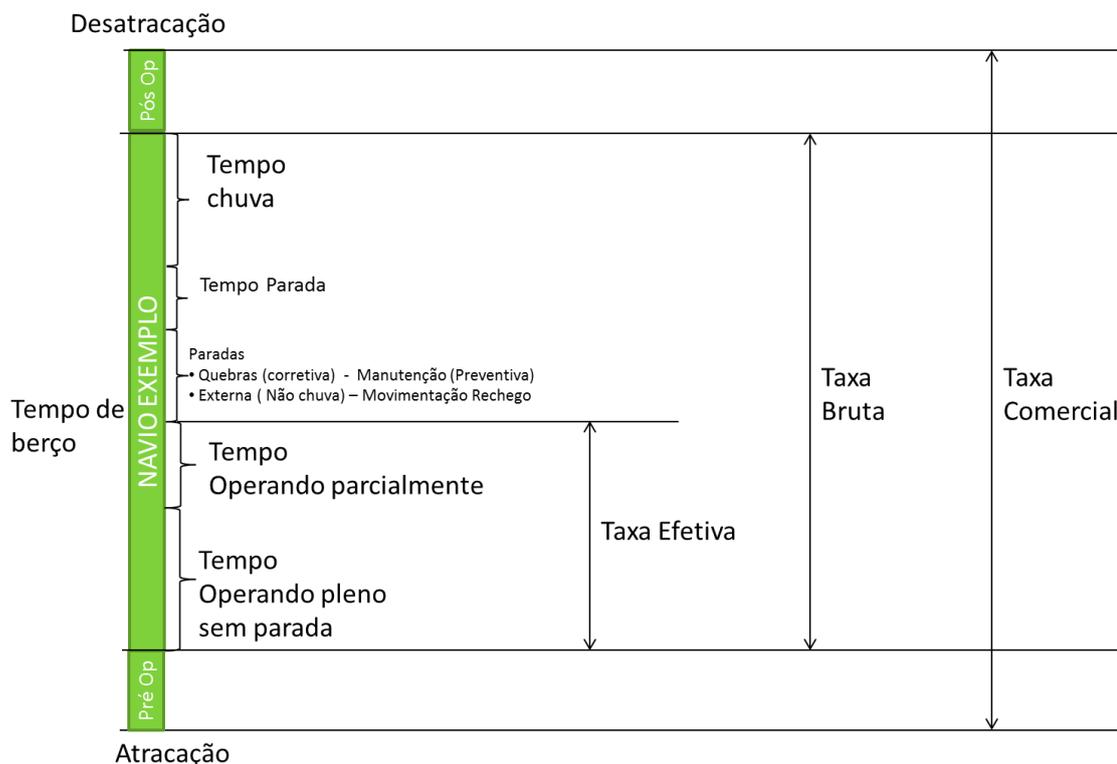
O tempo de operação de um navio no terminal é baseado em uma relação entre o porte do navio e a produtividade do berço. A esta relação é dado o nome de taxa operacional que pode ser classificada em uma das três categorias:

- **Taxa comercial** é medida pela expressão: carga total movimentada/tempo total de operação, o que inclui, dessa forma, as quebras e paradas durante a operação;
- **Taxa bruta** é taxa que incorpora o tempo em que existe a oportunidade de operação do navio, porém por motivos de manutenção (preventiva ou corretiva), ou intempéries, a operação não ocorre;
- **Taxa efetiva** por sua vez, considera somente os tempos em que o equipamento está efetivamente em operação, desconsiderando-se, portanto, os tempos de manutenção, paradas operacionais previstas ou não etc.;

No caso do modelo desenvolvido, será empregada a taxa comercial do terminal, uma vez que não será dada importância a eventos de manutenção e quebras corretivas dos equipamentos. A incorporação destes comportamentos poderá compor uma evolução do presente estudo.

De maneira esquemática as taxas descritas acima podem ser representadas através do diagrama abaixo (Figura 30).

Figura 30 – Representação esquemática da relação entre as taxas



Fonte: o autor

A apuração desta taxa será baseada nos dados históricos do terminal a ser modelado, sendo que a variável aleatória que representa o tempo em que o navio permanece no terminal é parametrizada para entrada no modelo.

Uma vez que cada terminal terá sua demanda própria, todo navio que for direcionado a um determinado terminal estará sujeito a duas filas: (1) fila do terminal; e (2) fila do canal. A fila do terminal é causada pela indisponibilidade de recursos no terminal para operar o navio. Sendo ela de responsabilidade do terminal, esta poderá ser mitigada através de investimentos e adoção de políticas operacionais mais eficientes. Uma vez liberado para o terminal, o navio estará sujeito à fila do canal. Esta sim será alvo de estudos, uma vez que sofre influência direta da política de cruzamento e tempo de espera até que a via esteja disponível para movimentação de outra embarcação. Atualmente boa parte dos portos utiliza a política de FIFO (*First in, First out*) na gestão desta fila.

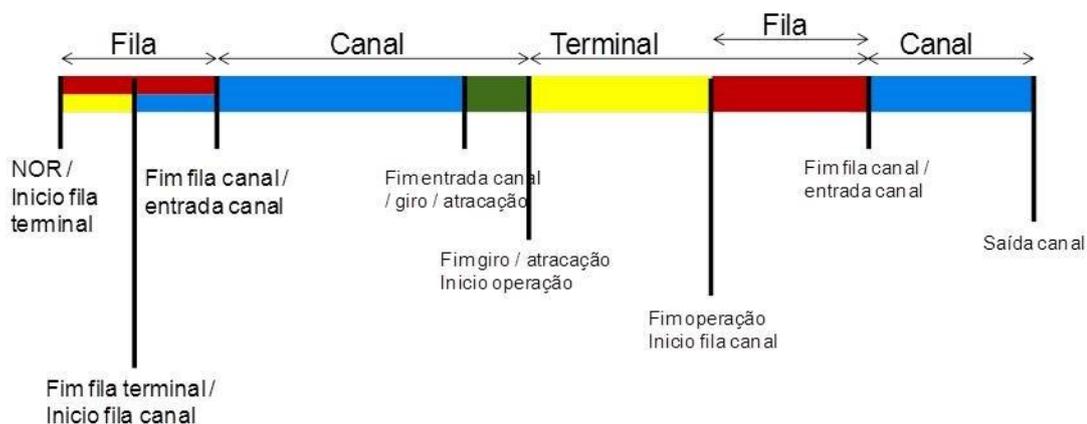
Uma vez satisfeitas todas estas condições de acesso ao canal, a embarcação navega através das partições até o berço endereçado, respeitando os tempos de

cruzamento de cada partição, bem como os tempos de pré-operação e pós-operação.

Por último, no subsistema de cenários existem as configurações específicas que habilitam ou inibem algum comportamento particular do modelo. Os comportamentos são os seguintes: (1) Espaçamento entre os navios regulares. Este parâmetro configura a distância mínima entre os navios permitida para tráfego no mesmo sentido. Esta distância pode ser alvo de estudo, uma vez que equipamentos modernos de controle e navegabilidade dos navios podem permitir um menor distanciamento entre os mesmos sem risco para segurança. No que se refere ao calado (2), este campo aponta qual o tamanho máximo permitido pelo canal antes de ser considerado restritivo, ou seja, antes que um tempo extra seja demandado para manobra por se tratar de uma manobra que requer maior perícia por parte dos práticos. O percentual de manobra sem restrição e sem giro (3) representa uma chance de a embarcação demandar o tempo extra para atracação e desatracação. Mesmo que o calado não sinalize esta demanda, algumas embarcações requerem este tempo extra. (4) a duração da simulação, por padrão está configurada para 10 anos, pode ser alterada para tempos maiores ou menores caso seja necessário o estudo de um cenário particular. (5) Ativação da regra de PIANC: este parâmetro controla o processo de ingresso no canal. Caso a regra de PIANC esteja ativada, o modelo irá comparar a boca do navio que solicita ingresso no canal com a maior das bocas já em trânsito pelo canal. Caso estas duas bocas estejam em sentidos opostos, estas, ponderadas pelos coeficientes da regra de PIANC, serão comparadas com a largura do canal. Se esta largura comportar os navios com segurança, a embarcação poderá ingressar no canal, caso contrário, a embarcação irá aguardar até que a boca geradora do impedimento libere o canal (tanto no sentido de importação quanto no sentido de exportação) para assim poder ingressar no mesmo.

A representação gráfica das etapas vencidas por um navio durante sua estadia foi adaptada do publicado por MOTA (2013) (Figura 31).

Figura 31 – Linha do tempo de um navio



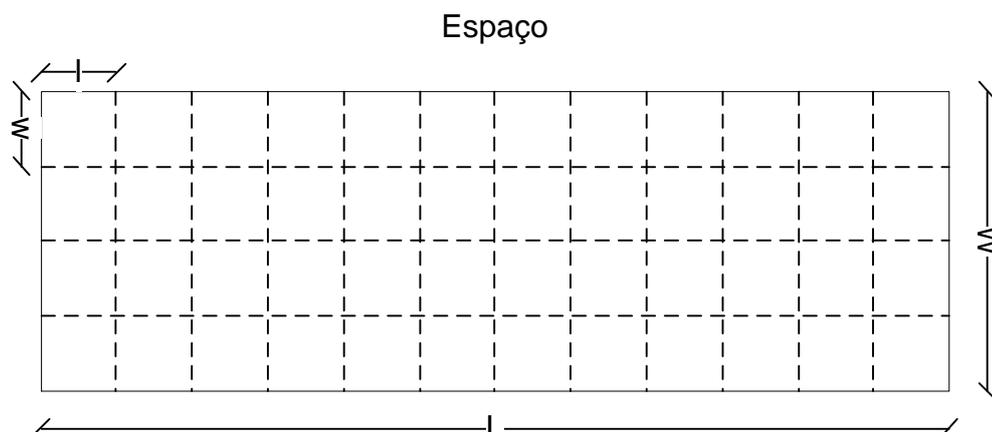
Fonte: o autor

3.3.1.1. Tratamento das restrições físicas

Embora o modelo até este momento tenha demonstrado um elevado nível de detalhamento, será incorporado nele o conceito de restrições físicas, levando, portanto, em consideração as dimensões da entidade sendo modelada. No caso do navio, as dimensões descritas anteriormente são testadas a todos os instantes forçando o atendimento destas restrições para autorizar, ou não, a navegação rumo ao terminal. Desta forma, poder-se-á obter uma melhor veracidade do modelo em relação ao sistema real. Impedindo que dois navios de grande porte percorram o canal simultaneamente, levando à uma situação de risco, ou que dois navios pequenos tenham que aguardar um ao outro, desperdiçando o recurso canal e gerando filas. Desta forma, respeitando as regras de PIANC, o canal poderá se submeter ao rigor de segurança necessário para a operação portuária, nem maior, nem menor.

Para modelagem das dimensões físicas, inicialmente foi considerado um espaço amplo, de dimensões L e W , de acordo com a figura a seguir (Figura 32). O referido espaço é subdividido em células com dimensões l e w .

Figura 32 – Representação abstrata do espaço



Fonte: Mota (2013)

Este espaço pode ser entendido como uma rodovia, ou uma pista de pouso, ou simplesmente um terreno plano e livre de obstáculos. Matematicamente, o espaço pode ser definido da seguinte forma:

L = Comprimento total do espaço

W = Largura total do espaço

l = menor porção discretizada do espaço na direção do comprimento

w = menor porção discretizada do espaço na direção da largura

S_l = número máximo de porções formado o espaço na direção do comprimento

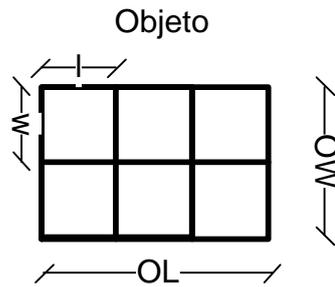
S_w = número máximo de porções formado o espaço na direção da largura

$$L = S_l * l \quad (2)$$

$$W = S_w * w \quad (3)$$

Uma vez definido o espaço, parte-se para a definição do objeto que possuirá dimensões OL e OW , conforme a figura abaixo (Figura 33). Um objeto representa a abstração de qualquer corpo dentro do modelo de simulação cujas dimensões físicas são representativas. Pode ser um navio, uma empilhadeira, ou qualquer outra entidade.

Figura 33 – Representação abstrata do objeto



Fonte: Mota (2013)

Matematicamente, o objeto pode ser definido da seguinte forma:

OL = Comprimento do objeto

OW = Largura do objeto

k_l = fator multiplicador para escalar a dimensão do objeto na direção do comprimento

k_w = fator multiplicador para escalar a dimensão do objeto na direção da largura

OS_l = número máximo de porções do objeto na direção do comprimento

OS_w = número máximo de porções do objeto na direção da largura

$$OL = k_l * OS_l \quad (4)$$

$$OW = k_w * OS_w \quad (5)$$

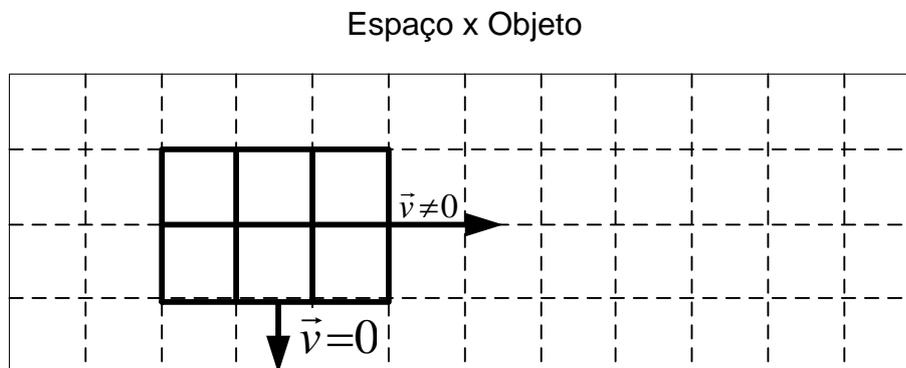
Uma vez que o escopo desta pesquisa está na investigação do efeito gerado pela movimentação do objeto em uma única direção, ou seja, movimentos laterais da embarcação não serão considerados no modelo, teremos as seguintes premissas:

$$\frac{\partial \vec{l}}{\partial t} = \vec{v} \quad (6)$$

$$\frac{\partial \vec{w}}{\partial t} = 0 \quad (7)$$

Onde pode se observar na figura abaixo a interação do objeto com o espaço, levando em conta seus deslocamentos (Figura 34).

Figura 34 – Um objeto incorporado no espaço

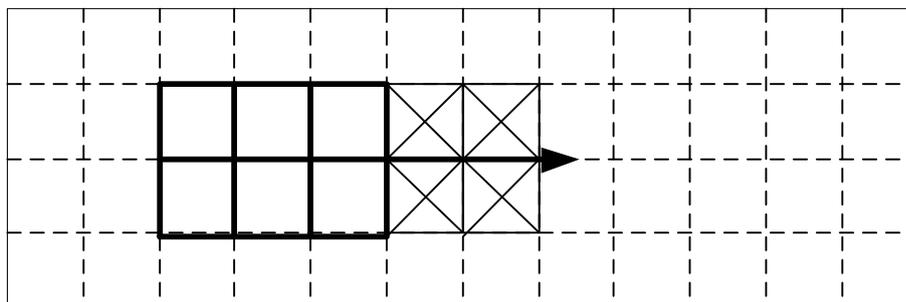


Fonte: Mota (2013)

Uma coleção de objetos contidos em um espaço forma um sistema onde os objetos interagem de maneira significativa. Uma das formas de interação entre os objetos é a distância mínima de segurança (d) entre os navios. Esta distância deverá ser respeitada de tal forma a garantir uma operação segura. Portanto, durante a movimentação de dois navios no mesmo sentido, o navio traseiro não poderá se aproximar (logicamente, também não poderá ultrapassar) até que o navio da dianteira não esteja a uma distância igual ou superior à distância de segurança. Este tipo de situação é de demasiada relevância quando se considera corpos físicos, uma vez que o encurtamento destas distâncias poderá ocasionar em ganho de produtividade no canal. Esta distância de segurança pode ser ilustrada através da figura abaixo (Figura 35).

Figura 35 – Objeto em seu espaço, considerando a distância de segurança

Área de segurança de um objeto situado em seu ambiente



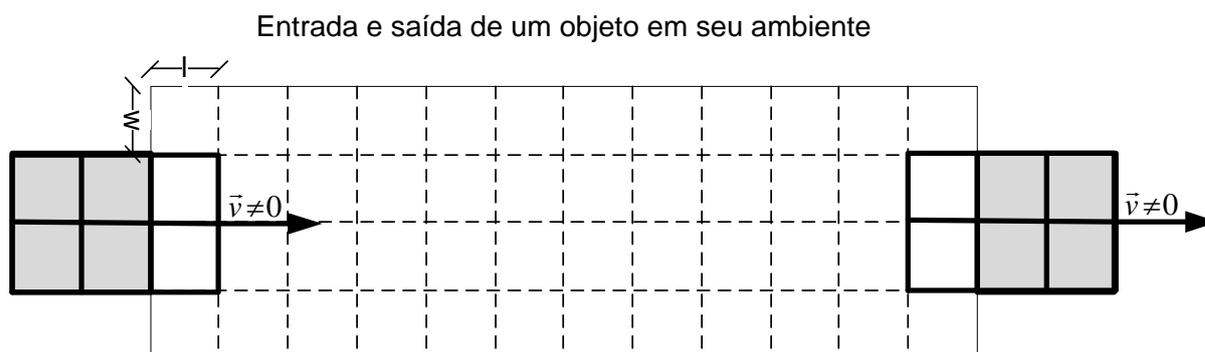
Fonte: Mota (2013)

Uma vez que esta distância deverá ser representada no espaço, ela deverá ser um número inteiro de porções l e w , ou seja:

$$d = k_d * l \quad (8)$$

Quando todos os elementos acima são colocados para operação simultaneamente, existem dois momentos em especial que devem ser analisados com cuidado: (1) entrada e; (2) saída de um objeto em um espaço. O motivo desta atenção especial se dá pela ocupação parcial de um objeto durante a sua entrada. Portanto, além de não estar completamente posicionado no espaço ainda, ele deve respeitar a distância de segurança durante a sua entrada (quando existe um eventual objeto em sua frente), sem que ocorra um choque com outro objeto. Da mesma forma, a saída do objeto deverá ser identificada para que o objeto, mesmo desocupando uma determinada partição, exerça restrição fazendo com que ele gradativamente vá liberando o espaço. Em ambos os casos, existe uma variação da dimensão do objeto ao longo do tempo, por estar deixando uma região de fronteira e ao mesmo tempo, não ocupando as partições subsequentes. Este movimento pode ser observado na figura abaixo (Figura 36).

Figura 36 – Etapas de entrada e saída de um objeto



Fonte: Mota (2013)

Desta forma, utilizando a técnica proposta por este autor em (MOTA et al., 2013), pode-se conferir um emprego da simulação de eventos discretos para se modelar um sistema complexo como um sistema marítimo. Os resultados atingidos em testes desta técnica se mostraram bastante robustas durante o processo de validação apresentando aderência com dados reais deste sistema, ao mesmo tempo em que demonstrou facilidade na identificação de gargalos operacionais, quando analisado o aumento da movimentação do mesmo.

Conseqüentemente, este modelo se tornou uma ferramenta poderosa para se testar as diversas políticas de gestão do canal, variando as distâncias de segurança, bem como a liberação ou não do cruzamento das embarcações. Em termos da gestão portuária como um todo, estes testes podem levar a economia no investimento em infraestrutura, uma vez que poderá avaliar o impacto de uma dragagem, ou da instalação de novos terminais ao longo do canal em uma fase de projeto conhecida como FEL I.

Em termos computacionais, esta técnica apresenta uma proposta relevante para a análise de um empreendimento portuário, dado que cada replicação do modelo foi executada em um tempo inferior a 2 minutos. E, ao mesmo tempo, a realidade de objetos físicos pode ser observada em diversas situações dentro de um sistema logístico.

Um exemplo de aplicação desta técnica em contextos logísticos é a modelagem de um armazém, conforme reportado por HENDERSON et al. (2012). Neste caso, o uso de simulação para estimação do número de carros transportadores e empilhadeiras pode ser observado em MARIANO e KURI-MORALES, (2012). Nestes casos, como

um armazém possui o seu espaço interior extremamente restrito, como o cruzamento de empilhadeiras em um corredor de dois porta-palets. Desta forma, a avaliação de suas operações sob a ótica de espaço físico poderá direcionar a decisões mais precisas.

Outros exemplos onde esta técnica poderá aprimorar a precisão dos resultados também foram reportados por CHAN e PRAKASH (2012). Mesmo quando considerado o contexto portuário, SUBRAMANYA (2012) utilizou a simulação de eventos discretos para avaliar sua capacidade. Porém, estas análises correm o risco de estarem simplificadas em um ponto vital do sistema, que é a interação entre suas entidades, levando o tomador de decisões às conclusões simplórias em termos de alocação dos recursos.

3.3.2. Dados de Entrada

Os dados utilizados para entendimento do sistema portuário em questão são dados primários, uma vez que foram coletados diretamente no fenômeno em estudo, sendo manipulado pela primeira vez para composição deste trabalho. Desta forma, antes do uso destes no modelo, foi necessário seu tratamento e identificação de valores discrepantes (*outliers*), bem como identificação de suas medidas de posição (média, moda, mediana) e medidas de dispersão (amplitude, desvio padrão) e parâmetros das distribuições de probabilidade que indicaram melhor aderência com os dados para incorporação no modelo.

3.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A MODELAGEM PROPOSTA

Com o objetivo descritivo do método aplicado para solução do problema em estudo, este capítulo explorou os principais detalhes da implementação proposta pelo autor. Fundamentando-se em técnicas clássicas de pesquisa operacional, uma estrutura colaborativa de modelos com diferentes paradigmas foi apresentada. A ordem de entrada dos navios gerada por um algoritmo de otimização de programação alimentando um modelo de simulação de eventos discretos que traz todo o realismo da operação portuária poderá levar o tomador de decisão a escolhas mais favoráveis e precisas no contexto operacional do sistema estudado.

Em seguida, apresenta-se no contexto do porto de Santos (litoral do estado de São Paulo) de forma detalhada como o método proposto pode ser aplicado, gerando políticas de acesso ao canal, e ampliando sua eficiência.

Este estudo baseia-se em dados históricos de 2007 até 2013, e basicamente três cenários serão comparados: (1) operação histórica; (2) operação otimizada sem cruzamento de embarcações; e (3) operação com cruzamento de embarcações e conclusões tiradas da análise destes cenários.

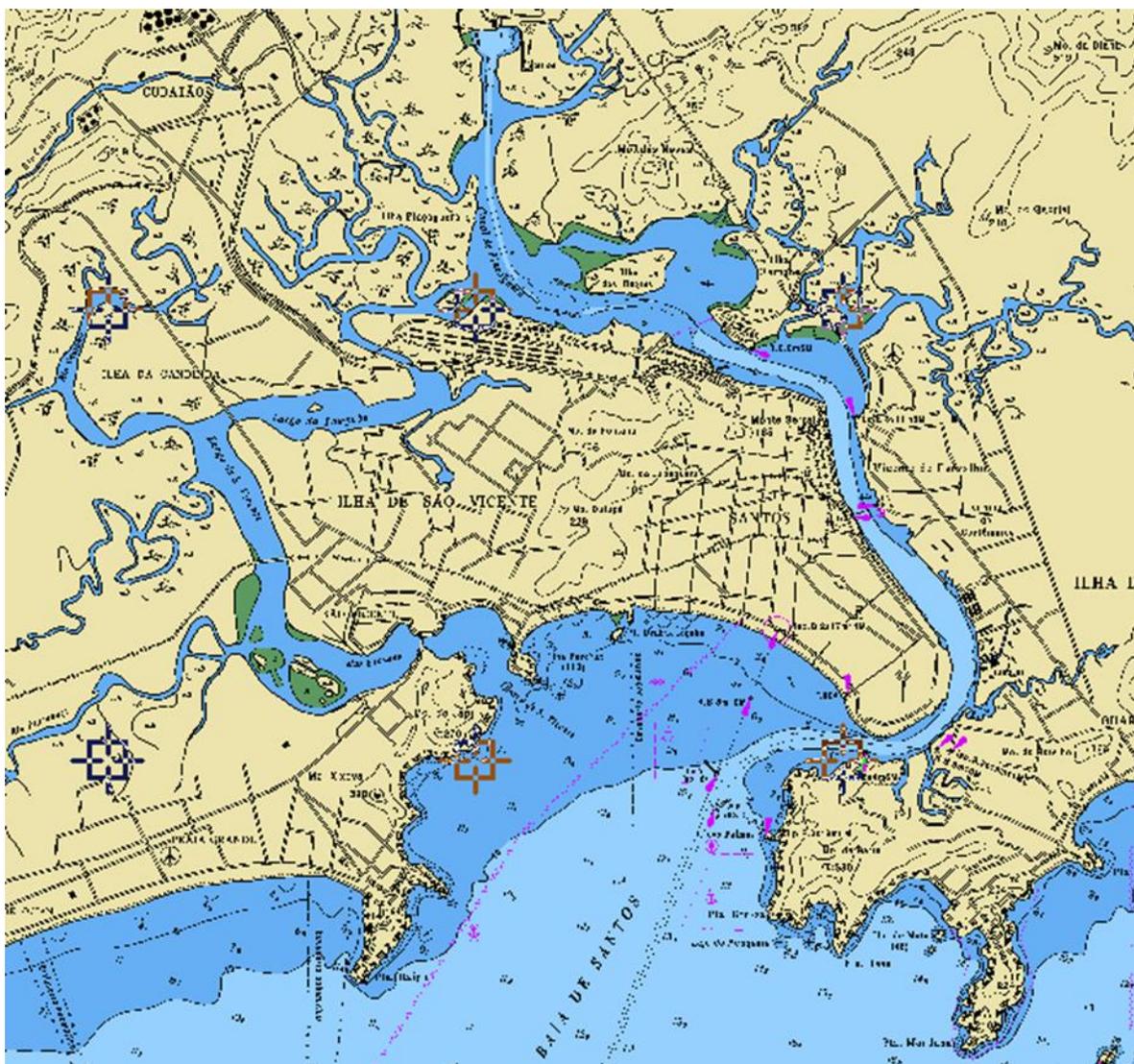
4. APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE SOLUÇÃO NO PORTO DE SANTOS

4.1. O PORTO DE SANTOS

O Porto de Santos, maior porto brasileiro, deve sua importância econômica não somente pela sua proximidade ao maior mercado consumidor e produtor, mas também, pela disposição geográfica do Brasil, que dá ao porto acesso privilegiada até as regiões centrais do país. O crescimento da economia brasileira e o consequente aumento dos volumes exportados pelo país expôs a realidade nacional de poucas alternativas logísticas. A demanda de movimentação de contêineres no porto de Santos, por exemplo, deverá saltar dos atuais 4 Milhões de teus (equivalente a contêiner de 20 pés) por ano para 7 Milhões até 2016. Os grãos agrícolas, incluindo fertilizantes, passarão dos atuais 25 Milhões de toneladas por ano para cerca de 40 Milhões. Como porto concentrador de cargas, Santos pode ainda esperar volumes bem maiores. Há ainda uma grande demanda reprimida de minérios e grãos líquidos, com volumes estimados que até justifiquem a construção de um novo complexo portuário inteiro. Porém, a exploração de petróleo abaixo da camada de sal na bacia de Santos motivará o crescimento da indústria de serviços marítimos na região e, conseqüentemente, será introduzido um tráfego de embarcações de apoio *Off-Shore*. Em que parem essas demandas futuras crescentes, a oferta de infraestrutura e capacidade portuária deverá sofrer grandes transformações para que o porto possa, de fato, capturá-la.

Em termos geográficos, o porto de Santos está situado na cidade de Santos, estado de São Paulo. Possui calado que varia de 12,9 até 11 metros dependendo do quanto se afasta do oceano. Suas curvas e estreitamentos dificultam a navegação, motivando a operação conservadora em mão única. Na carta náutica a seguir podem-se observar os detalhes da estrutura portuária deste sistema (Figura 37).

Figura 37 – Carta náutica do porto de Santos



Fonte: <http://www.mar.mil.br/>

Atualmente, segundo relatório do BNDES (2013) há no Porto de Santos uma escassez de recursos de infra e superestrutura, sobretudo espaços e acessos. Nesse cenário de desenvolvimento acelerado, nem todos os volumes poderão ser movimentados e deverão procurar outros portos. Portanto, será fundamental que se mitigue esta falta de capacidade de modo a racionalizar e priorizar os investimentos mais prementes do Porto de Santos.

Os principais entraves físicos ao desenvolvimento atual do porto de Santos estão associados às questões de infraestrutura retro portuária e acesso terrestre, das dúvidas relacionadas à capacidade do canal de acesso, de espaços para crescimento e da dragagem, embora essa última tenha apresentado progressos

recentemente. O canal de acesso ao porto apresenta atualmente restrições quanto ao cruzamento de navios. Embora não seja um sério entrave, poderá vir a ser no futuro e constituir em um entrave irremovível sugerindo expansões *Off-Shore*. A capacidade desse canal de acesso em função das possíveis obras de alargamento e impactos na forma de operação deve ser avaliada cuidadosamente.

Por fim, o número de terminais deve ser ampliado já que aqueles existentes estão com uma ocupação maior do que a ideal. Algumas expansões já estão ocorrendo no ano de 2014 ou na iminência de ocorrer. Os terminais em Santos são organizados conforme apresentado no APÊNDICE deste documento.

4.2. TRATAMENTO DE DADOS

Para estudo do sistema, bem como alimentação de ambos os modelos, foi realizada uma extensiva análise de dados que vai desde a coleta dos dados primários até a estimação dos parâmetros a serem utilizados nos modelos. Esta análise teve a duração de três meses para estudo piloto, e foi extensível a um ano, para estudo completo dos cenários propostos. A metodologia de coleta de dados proposta por este trabalho pode ser representada pelo diagrama abaixo (Figura 38).

Figura 38 – Metodologia de coleta de dados



Fonte: o autor

4.2.1. Coleta de dados

Existem duas fontes de dados primárias para o estudo em questão: (1) Site do porto de santos (www.portodesantos.com.br), que fornece a relação de navios já reconhecidos em fila pelo porto (fundeados), informando seu nome, destino, horário de chegada, porte, nacionalidade, cumprimento, etc.; e também (2) Site da praticagem (www.sppilots.com.br), que fornece os dados operacionais de movimentação dos navios, tais quais: momento de marcação, início de manobra, calado, rebocador em uso, etc. A consolidação destas duas fontes, neste estudo irá se limitar ao uso do item número 2, dados da praticagem, uma vez que por se tratar de um estudo operacional, deseja-se conhecer o nível de congestionamento do sistema e informações sobre os navios que efetivamente percorreram o canal de

acesso ao porto de Santos. Para tal estudo, a fonte de número 1 apresenta dados incompletos e imprecisos, pois é desconhecida a regra de marcação dos dados de chegada. Como extensão deste estudo, poder-se-á incorporar a informação dos dados dos navios fundeados.

Cabe ressaltar que existem outras fontes de informações referentes ao sistema em estudo: (1) datamar (www.datamar.com.br); (2) ANTAQ (www.antaq.gov.br). Porém, optou-se por utilizar dados públicos, de fácil acesso e completos, para que a programação de navios possa ser reproduzida em qualquer sistema portuário que disponibilize tais dados.

Uma vez eleita à base de dados em uso, passa-se ao processo de aquisição destes dados. Para tal, foi criado um *script* na linguagem *Python* (www.python.org) que realizasse a aquisição automática dos dados pelo período piloto de três meses. Durante este período, visitas periódicas (uma a cada 30 minutos) foram realizadas no site, adquirindo toda a lista de movimentações realizadas pela praticagem. Este período foi ajustado de forma empírica para que se evitasse perder qualquer tipo de movimentação e por segurança optou-se por esta frequência. Além disso, foram realizadas inspeções automatizadas (uma a cada 12 horas) para confirmação das atividades do sistema de coleta de dados.

Após os 3 meses de coleta, os arquivos foram explorados para análise. Sendo um total de aproximadamente 300.000 registros, estes dados brutos precisaram passar por uma etapa de limpeza para que pudessem ser analisados. Um novo *script* em *Python* fora utilizado para este fim. Embora os dados primários fossem de boa qualidade e precisão, algumas inconsistências foram encontradas:

- Campos de eventos vazios
- Campos de origem ou destino vazios
- Datas invertidas (principalmente quando o apontamento indicava mudança de dias (ex. 11/06/15 11:50 PM e 12/06/15 12:10 AM)).
- Apontamentos incompletos

Como estes dados primários são apontados manualmente pela equipe da praticagem, estes tipos de erros e falhas podem ser considerados mínimos em relação ao conjunto de dados coletados (inferior a 1% de toda a amostra). Com exceção dos apontamentos incompletos que pode ter sido causado por alguma falha

de comunicação entre o sistema automatizado desenvolvido e o website da praticagem por motivos como: falta de energia, queda de Internet, serviço indisponível, dentre outros.

A seguir, observa-se o procedimento descrito para tratamento dos dados, inicialmente com os dados no formato bruto do website da praticagem (Figura 39).

Figura 39 – Dados brutos do site da praticagem

NAVIO	MV	LOC#1	LOC#2	POB	INÍCIO	PASSAG	FIM	AGENTE	CALADO	BORDO	TUG
STAR RENEE	S	TEG		18/06 01:30	18/06 01:30	18/06 02:12	18/06 02:30	CARGILL	13,30		WS
CHEMBULK HOUSTON	S	AL 3		18/06 02:00	18/06 02:00	18/06 03:17	18/06 03:30	ISS MARINE	6,20		SN
NICHIRIN	S	COS 4		18/06 02:00	18/06 02:00	18/06 04:06	18/06 04:15	BRAZSHIPPING	9,17		SN
NAVIOS SERENITY	S	19		18/06 02:00	18/06 02:00	18/06 02:50	18/06 03:00	BLUE OCEAN	9,95		WS
VITOSHA	S	ULT		18/06 02:30	18/06 02:30	18/06 04:10	18/06 04:30	ORION	6,70		SR
CEMTEX VENTURE	S	OUT 2/3		18/06 03:00	18/06 02:50	18/06 04:21	18/06 04:45	WILSON SONS	13,42		WS
PIO GRANDE	E		COS 4	18/06 05:00	18/06 05:00	18/06 05:15	18/06 07:10	ORION	6,06	BB	WS

Fonte: o autor

Em seguida, são apresentados os dados coletados pelo sistema automatizado (Figura 40).

Figura 40 – Dados brutos após coleta pelo sistema automatizado

Time: 11:32:43 03/16/15 CISNE BRANCO S OUT 1 30/03 10:00 CAPIMAR 4,80
Time: 11:32:43 03/16/15 SERGIO BUARQUE DE HOLANDA S AL 2 15/03 00:30 15/03 00:30 15/03 02:02 15/03 02:20 PETROBRÁS 9,70 WS
Time: 11:32:43 03/16/15 AMALTHIA M AL 1 11/15/03 01:00 15/03 01:00 15/03 02:00 PETROBRÁS 6,70 BB WS
Time: 11:32:43 03/16/15 AEGEAN HIGHWAY S ITEV 15/03 01:00 15/03 01:00 15/03 01:47 15/03 02:05 FREE SHIPPING 8,80 WS
Time: 11:32:43 03/16/15 MSC ENGLAND S BTP-2 15/03 03:00 15/03 03:00 15/03 04:26 15/03 04:45 MSC 9,40 WS

Fonte: o autor

E por fim, os dados disponíveis para análise (Figura 41).

Figura 41 – Dados após tratamento e limpeza para análise

Vessel Name	Movement Type	Origin	Destination	Marcação POB	INÍCIO Manobra	PASSAGEM CABO	FIM Manobra	AGENTE	CALADO	Dia	Mes	Ano
SERGIO BUARQUE DE HOLANDA	S	AL 2	BARRA	15/3/15 12:30 AM	15/3/15 12:30 AM	15/3/15 2:02 AM	15/3/15 2:20 AM	PETROBRÁS	9,70	15	3	2015
AEGEAN HIGHWAY	S	TEV	BARRA	15/3/15 1:00 AM	15/3/15 1:00 AM	15/3/15 1:47 AM	15/3/15 2:05 AM	FREE SHIPPING	8,80	15	3	2015
MSC ENGLAND	S	BTP-2	BARRA	15/3/15 3:00 AM	15/3/15 3:00 AM	15/3/15 4:26 AM	15/3/15 4:45 AM	MSC	9,40	15	3	2015
MSC CORUNA	S	BTP-3	BARRA	15/3/15 10:00 AM	15/3/15 10:00 AM	15/3/15 11:07 AM	15/3/15 11:25 AM	MSC	8,70	15	3	2015
PETREL ARROW	S	13/14	BARRA	15/3/15 11:00 AM	15/3/15 11:00 AM	15/3/15 11:56 AM	15/3/15 12:10 PM	TRANSCHEM	7,20	15	3	2015
VELSHEDA	S	OUT 2/3	BARRA	15/3/15 12:30 PM	15/3/15 12:30 PM	15/3/15 1:26 PM	15/3/15 1:50 PM	CARGONAVE	12,88	15	3	2015
BALTIC WINTER	S	29	BARRA	15/3/15 1:30 PM	15/3/15 1:30 PM	15/3/15 2:07 PM	15/3/15 2:30 PM	RELIANCE	7,77	15	3	2015
KP ALBATROSS	S	TERMG	BARRA	15/3/15 2:00 PM	15/3/15 2:00 PM	15/3/15 2:34 PM	15/3/15 3:00 PM	ALPHAMAR	6,10	15	3	2015
VENEZIA	S	TC 2	BARRA	15/3/15 2:00 PM	15/3/15 2:00 PM	15/3/15 2:51 PM	15/3/15 3:05 PM	CSAV	12,55	15	3	2015

Fonte: o autor

Desta forma, foi iniciado o processo de tratamento de dados.

4.2.2. Consolidação

O banco de dados piloto em estudo reflete todas as movimentações realizadas no canal de acesso a porto de Santos compreendidas entre os dias 16/03/2015 até 17/06/2015. Inicialmente a base constava com aproximadamente 300.000 registros, que após limpeza e tratamento foi reduzida para 2.709 registros. O processamento do *script* de limpeza levou da ordem de segundos para ser efetuado e levava em consideração critérios como: (1) redundância de dados; (2) falta ou inconsistência de informações; (3) organização e classificação dos dados quanto ao momento de sua ocorrência.

As variáveis extraídas desta base de dados são descritas na tabela abaixo (Tabela 10).

Tabela 10 – Dados primários coletados para estudo

Variável	Descrição
Reading Time	Instante de leitura do dado
Vessel Name	Nome do navio apontado
Movement Type	Tipo de movimento (Entrada (E), Saída (S), Movimentação interna (M ou P)
Origin	Local de partida do navio (BARRA ou TERMINAIS)
Destination	Local de destino do navio (BARRA ou TERMINAIS)
Marcação POB	Instante em que o navio foi agendado para a manobra
INÍCIO Manobra	Instante em que a manobra foi efetivamente realizada
PASSAGEM CABO	Instante em que a manobra foi concluída, iniciando procedimentos
FIM Manobra	Instante em que o navio está pronto para operação
AGENTE	Armador que comanda o navio
CALADO	Calado registrado pelo prático no instante da manobra
BORDO	Sentido da atracação
TUG	Rebocador responsável por auxiliar a manobra

Dos dados descritos acima, os dados quantitativos (Marcação POB, INÍCIO Manobra, PASSAGEM CABO, FIM Manobra) foram utilizados para compor a linha de tempo do navio descrita anteriormente, as demais variáveis qualitativas serviram para classificar e agrupar os dados para as análises propostas a seguir.

Inicialmente, os dados foram classificados segundo a variável qualitativa “*Movement Type*”, pois esta classifica o movimento do navio apontado quanto à sua entrada, saída, ou movimentação interna. Portanto, todas as estatísticas a seguir são apresentadas distintamente para estes três tipos de movimento.

As análises apresentadas são divididas em três grupos: (1) Análises temporais; (2) Análises operacionais; (3) Análises geoespaciais. O detalhamento das análises é apresentado no ANEXO deste documento.

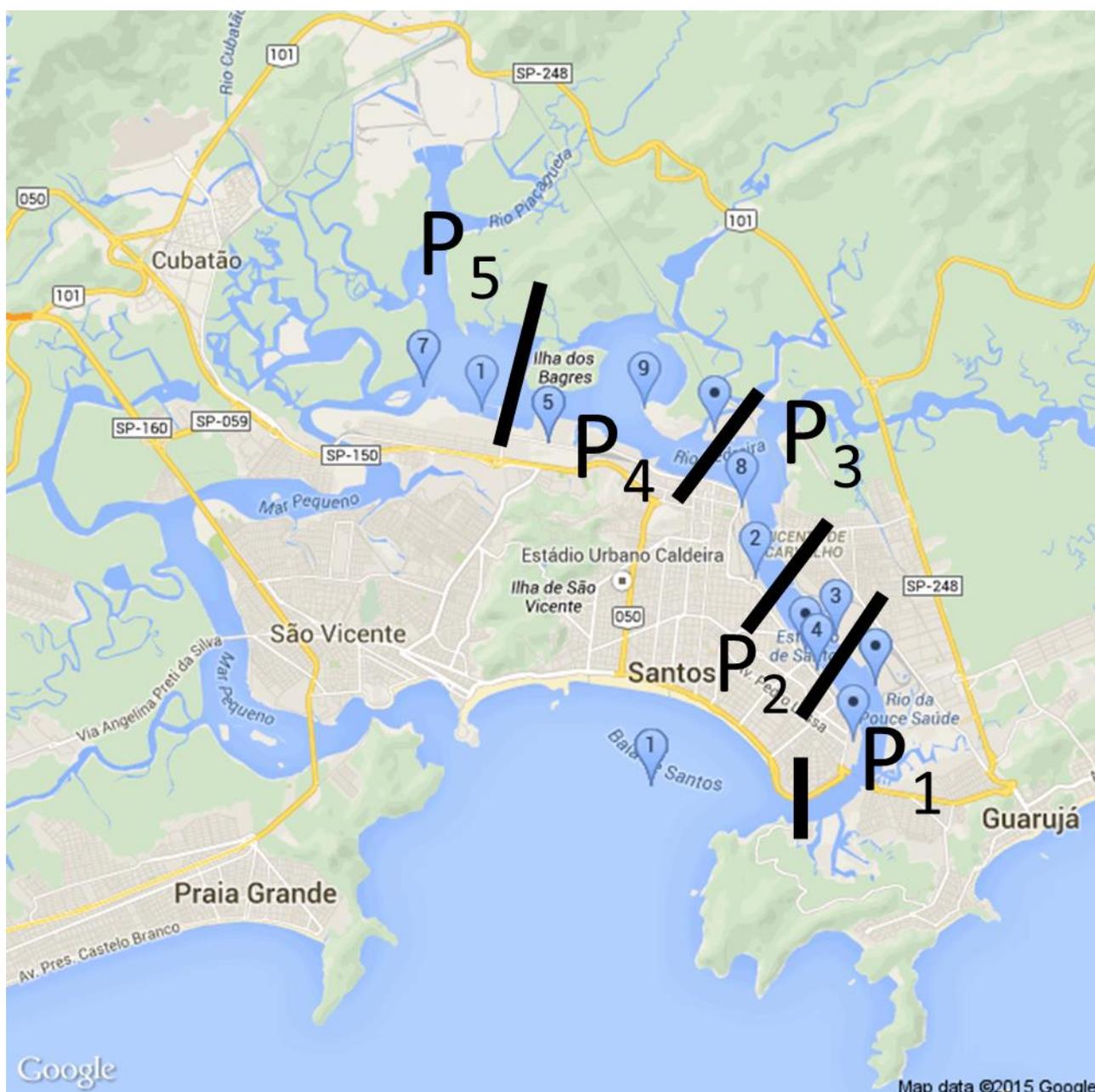
4.2.3. Conclusões e discussões sobre os dados

Através da análise proposta nesta seção do documento observa-se que o foco do estudo se dá na entidade que sofre transformação no sistema, ou seja, o navio. Infelizmente, boa parte das estatísticas divulgadas sobre este sistema é agregada na unidade de massa, ou volume. Desta forma, apresenta-se o volume atendido mensalmente por um terminal, mas é fundamental que tal estatística tenha a visão do navio, ou seja, quantos navios foram atendidos, qual sua performance no sistema. Assim, sobre o ponto de vista de programação o aumento do fluxo de navios irá gerar uma maior eficiência do canal, dado que independente do porte da embarcação, os bloqueios gerados são semelhantes. Isso não implica na mensuração da performance dos berços e terminais (que devem ser medidos em massa/ volume) pois possuem finalidades diferentes.

4.3. MODELAGEM CONCEITUAL

Para caráter conceitual, o canal de acesso ao porto de Santos foi segmentado da seguinte forma (Figura 42):

Figura 42 – Imagem Canal de Santos – partições



Fonte: o autor

Conforme mencionado anteriormente, cada partição possui propriedades particulares que serão utilizadas em momentos adequados em ambos os modelos. Estas propriedades podem ser observadas na tabela a seguir

No apêndice B estão as informações geográficas do posicionamento de cada terminal em análise no presente estudo. Embora estas localizações sejam apresentadas de forma aproximada, é suficiente para a distinção da partição em que determinado terminal se localiza. Alguns terminais apresentam nomes comerciais

diferente daqueles nomes ou códigos observados nos dados coletados. Por este motivo, a coluna observação da presente tabela busca esclarecer tal ambiguidade.

Em relação à movimentação diária de entrada de navios no canal de Santos, percebe-se que o atendimento não apresenta a mesma regularidade da operação mensal, com atendimento de aproximadamente 15 navios por dia na média, porém apresentando dias em que este atendimento chega a aproximadamente 25 navios. Embora apresente uma dispersão elevada, a média das distribuições claramente sofre aumento com o afastamento da posição do terminal em relação ao início do canal. Assim, este trabalho utiliza os valores médios encontrados nestes dados, podendo em investigação futura levar a variabilidade em consideração, tornando as variáveis de tempo de processamento como variáveis aleatórias.

4.3.1. Classificação dos tempos de manobra por partição

Tabela 11 – Classificação dos tempos de manobra por partição

Partição Referencia	Tipo de movimento	Número de Manobras	Tempo médio de Manobra (minutos)	Tempo Incremental (minutos)
P1	E	88	58,3	
P1	S	81	55,7	
P1 Total		169	57,1	
P2	E	205	64,9	6,6
P2	S	202	64,4	8,7
P2 Total		407	64,7	
P3	E	181	74,8	9,9
P3	S	191	72,5	8,0
P3 Total		372	73,6	
P4	E	258	75,7	6,8
P4	S	257	77,3	4,8
P4 Total		515	76,5	
P5	E	266	102,0	20,6
P5	S	274	98,7	21,4
P5 Total		540	100,3	8,7

A Tabela 11 indica o resultado do tratamento de dados referente aos tempos de navegação segundo os dados analisados. Com os tempos apurados em minutos devido ao rápido cruzamento das partições centrais do canal, foi estipulado o tempo incremental que corresponde à diferença de tempo de navegação em relação à partição imediatamente anterior, no sentido de entrada do navio. Como no modelo desenvolvido cada partição representa um recurso independente que deverá ser

vencido pelo navio, os tempos incrementais irão popular as matrizes de tempo do modelo apresentado na seção 3.2.

O tempo médio de manobra, agora apresentado através da Tabela 11 indica o tempo de navegação observado dentro do conjunto de navios direcionados àquela partição. Observa-se um tempo elevado concentrado nas partições 1 e 5, e este fato se deve ao movimento mais longo da primeira partição, uma vez que o navio deve vencer a inércia, sair da área de fundeio e iniciar a movimentação em direção à entrada do canal. Por outro lado, a partição 5 que se encontra na porção final do canal acumula os navios direcionados à operação daqueles que ainda irão percorrer o canal de Piaçaguera. Estes devem vencer um percurso significativamente maior e com menor velocidade devido às características físicas deste trecho do canal de Santos.

4.3.2. Classificação dos tempos de operação

Tabela 12 – Classificação dos tempos de operação

Partição	Número de Atracações	Tempo médio de Permanência (minutos)
P1	8	4.798,1
P2	22	2.969,5
P3	18	2.844,9
P4	31	1.640,2
P5	35	1.288,9

Na Tabela 12 são apresentados os tempos médios de permanência observados nos navios que operaram na partição a que se refere. Percebe-se que o tempo médio de permanência é bastante elevado, da ordem de dias (entre 1 e 3 aproximadamente). Isso reflete a dificuldade em se programar a operação de um terminal, uma vez que a saída de um navio deve ser antecipada com esta mesma ordem de grandeza. Assim, a atualização destes dados, bem como detalhamento dos tempos referentes a cada terminal pode aumentar a precisão das decisões tomadas pelo método proposto.

Tabela 13 – Tempos de operação

Partição	Tempo de Manobra (minutos)		Tempo de Permanência (minutos)
	Entrada	Saída	
P1	58,3	55,7	4.798,1
P2	6,6	8,7	2.969,5
P3	9,9	8,0	2.844,9
P4	6,6	4,8	1.640,2
P5	20,6	21,4	3.710,6

Estes dados se referem à conclusão da etapa final do tratamento e apuração para incorporação no modelo de otimização desenvolvido. Estes poderão ser revisitados e atualizados em momentos futuros para maior precisão dos resultados apresentados, bem como sua variação para geração e proposição de cenários.

4.4. MODELO DE OTIMIZAÇÃO

Uma vez tratados os dados, as informações são incorporadas ao modelo. Os dados apurados foram utilizados para a configuração do roteiro (percurso enfrentado por cada navio ao se direcionar a um terminal), tempo de processamento (duração do percurso) e lista de trabalhos (lista de navios programada para entrada do canal em determinado dia). Importante ressaltar que estes elementos são incorporados ao sistema antes da execução da otimização. Existe a possibilidade de atualização destes dados durante o processo de otimização que caracterizaria o sistema como dinâmico, porém este estudo está fora do escopo do atual trabalho.

No caso de um canal de acesso aos terminais portuários, o roteiro indica a sequência das partições ocupadas pelo navio, bem como o terminal a ser ocupado pelo navio. As informações de roteiro são descritas como restrições físicas (ou *hard*), uma vez que não demandam atualizações constantes devido à posição física de um terminal. Portanto este conjunto de informação uma vez apurado só demanda atualização caso um novo terminal inicie ou encerre sua operação.

Os tempos de processamento incorporado no modelo foram apresentados na Tabela 13, e representam para o sistema parâmetros dinâmicos (ou *soft*), uma vez que devem ser atualizados periodicamente para maior precisão do planejamento. A cada partição, tanto no sentido da ida quanto no sentido de retorno, bem como a cada

terminal em estudo está associado um tempo de processamento que pode representar tanto a navegação quanto à operação de um navio. Os tempos mencionados, que embora sejam variáveis aleatórias conforme apresentado nos histogramas do ANEXO deste documento, são tratadas como variáveis determinísticas no presente estudo, deixando o estudo estocástico das mesmas para trabalhos futuros.

A lista de navios representa o conjunto de navios que estão fundeados preparando para a realização da entrada no canal de acesso aos terminais portuários. Sendo a mesma modificada diariamente e representa um dado de cenário no presente estudo. Sob a premissa de que todos os navios em fila deverão atracar no porto, pretende-se através do sistema de otimização definir qual a ordem em que os navios deverão entrar no canal de maneira a garantir um melhor uso do recurso. Portanto, para o presente trabalho, foi definida uma lista de navios a partir dos dados históricos estudados e a ordem de entrada dos navios será modificada pelo mecanismo de otimização de forma a propor um melhor uso e melhor ocupação do sistema. Portanto, para construção dos cenários em estudo, foram utilizados os navios que se apresentaram preparados para entrada do canal no dia 01/01/2007.

Tabela 14 – Dados históricos de navios atracados em Santos utilizados no estudo

ID	Nome do Navio	Destino	Partição	Boca	Carga
1	NEUSA	AL 2	P6	9,2	15.000
2	COSTA FAVOLOSA	25	P3	11,2	70.000
3	BBC SCANDINAVIA	CORTE	P2	11,7	60.000
4	MSC PREZIOSA	32	P2	5,9	63.000
5	E.R. DENMARK	VAL	P5	13,4	49.235
6	MAERSK LAVRAS	BTP-2	P5	12,6	60.000
7	SINGAPORE BRIDGE	BTP-1	P5	9,3	66.000
8	GRANDE FRANCIA	CS 1	P6	13,6	63.950
9	MOUNT HIKURANGI	13/14	P3	10,0	64.584
10	TIANZUO	OUT 2/3	P4	10,8	95.005
11	MONTE VERDE	TC 2	P5	9,6	60.000
12	HANZE GOTEBOG	TERMG	P1	14,8	67.000
13	HYUNDAI PLATINUM	CS 4	P6	11,5	66.000
14	SIBI	COS 4	P6	13,8	43.800
15	CIELO DI CAPALBIO	31	P2	12,0	30.000
16	TEAL ARROW	32/33	P2	16,3	64.984
17	NORD CETUS	38	P1	9,4	60.000
18	BOW OCEANIC	DOW	P1	8,1	66.022
19	ALIANCA EUROPA	EMB-2	P4	13,6	65.000
20	JIN HAO	23	P3	12,2	34.000

Concluída a etapa de pré-otimização, o sistema possui todas as informações necessárias para a realização da otimização. A otimização foi realizada em três etapas: (1) Construtiva (FIFO); (2) Busca local; (3) Meta-heurística. Como resultado de cada uma destas etapas se tem uma proposta de programação de entrada dos navios e, idealmente, a redução do intervalo de tempo necessário para o processamento (*Makespan*). Diz-se idealmente, pois existe a possibilidade de que logo na primeira etapa a melhor solução já seja alcançada, mas independente desta possibilidade, a solução de cada etapa irá passar pela avaliação e tentativa de melhoria em cada uma das etapas seguintes.

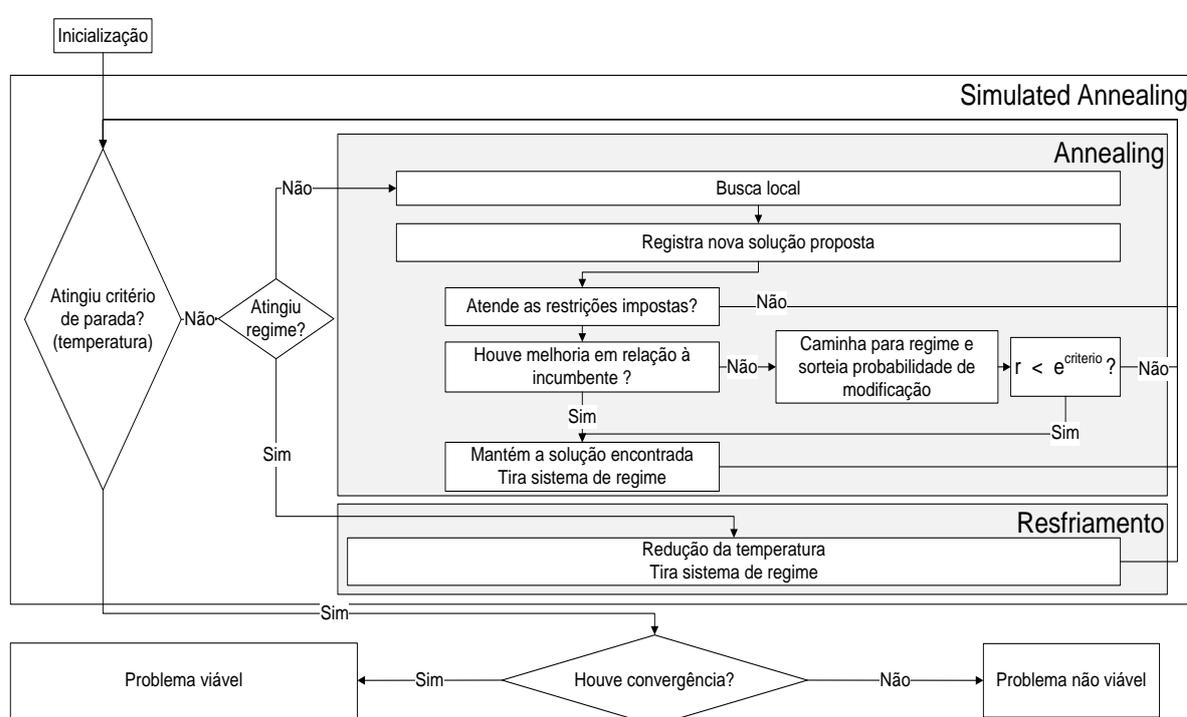
Organizados de maneira sequencial na primeira etapa, utiliza-se a ordem de chegada como critério, portanto, nenhuma avaliação de destino, tempo de processamento e compatibilidade para o cruzamento em seu trajeto é realizada. Embora seja uma regra muito simples, ela é empregada pela maior parte dos sistemas logísticos (inclusive portuários) por trazer consigo um aspecto qualitativo de “justiça”, já que o atendimento se dá na mesma ordem de chegada à região de fundeio (FIFO – *First in, First out*). O presente trabalho visa quebrar tal paradigma de “justiça”, uma vez que se acredita que o planejamento do sistema, buscando um funcionamento racional com critérios quantitativos pode beneficiar as operações portuárias como um todo, de maneira a todos envolvidos obter ganhos (tanto no tempo de espera, quanto nos custos da operação).

Na etapa de busca local (segunda etapa) inicia-se o processo de otimização propriamente dito. Nesta etapa, cada navio da lista de navio é associado a um tipo de trabalho (descrito na seção 3.2) e suas restrições conjuntivas e disjuntivas são aplicadas. Assim, o grafo direcional é construído (de agora em diante denominado “grafo problema”). Logo, diversas operações serão realizadas neste grafo para a busca de uma melhor solução. O uso da heurística de busca local 2-opt (seção 3.2.4.4) se aplica na troca do sentido das restrições disjuntivas. Portanto, cada navio é avaliado em pares se existe benefício em se ceder a frente para algum outro na lista de navio. Caso o impacto seja benéfico ao sistema (em termos da redução do tempo total de processamento), esta troca é realizada e novas tentativas são realizadas até que um número finito de pares de restrição seja avaliado.

Em alguns casos, as trocas podem levar o sistema à infactibilidade, conforme descrito na seção 2.3.1.1, uma vez que a configuração proposta pode conter “*deadlocks*”, portanto nesta etapa é realizada uma verificação de vizinhança dos nós antes da alocação do tempo para o mesmo.

Por fim, a solução factível resultante da etapa anterior será avaliada através do algoritmo evolutivo escolhido para o presente trabalho: *Simulated Annealing*. O procedimento de busca por uma melhor solução pode ser observado no diagrama abaixo (Figura 43).

Figura 43 – Diagrama descritivo do Simulated Annealing

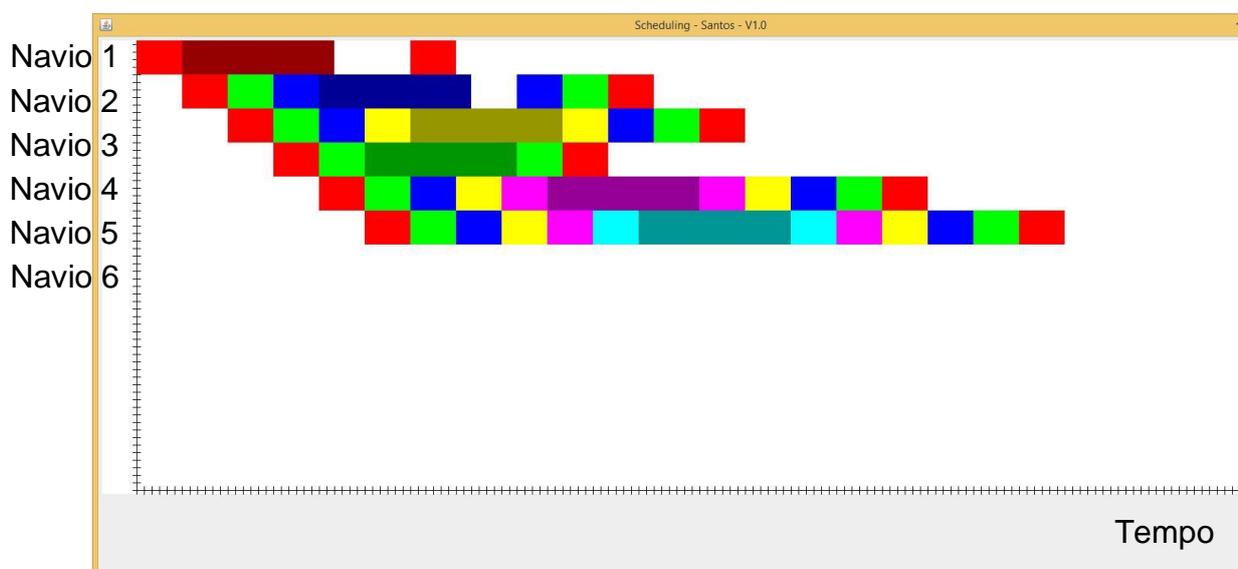


Fonte: o autor

Devido à natureza do problema, o algoritmo descrito gera um elevado número de infactibilidades devido à troca aleatória de sentido dos arcos disjuntivos.

Uma vez alcançado o resultado, faz-se necessária a visualização da programação proposta pelo algoritmo. A figura a seguir (Figura 44) apresenta o exemplo de uma programação FIFO.

Figura 44 – Programação gerada pela ferramenta desenvolvida (Programação FIFO)

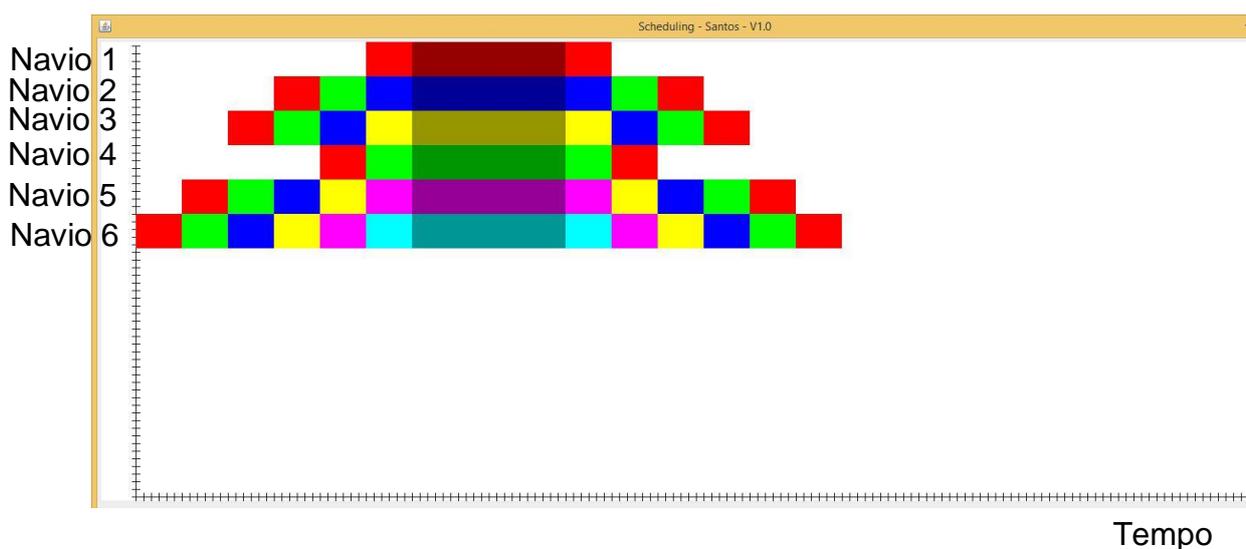


Fonte: o autor

O programa de visualização foi desenvolvido utilizando bibliotecas de JavaFX (CRANE, 2009).

Esta solução foi modificada de maneira significativa ao se realizar as etapas 2 e 3, com a redução do tempo de processamento total dos navios (Figura 45).

Figura 45 – Programação gerada pela ferramenta desenvolvida (Programação otimizada – melhoria de 5% do makespan)



Fonte: o autor

A análise da função objetivo durante a execução do algoritmo de otimização pode ser realizada através da Figura 46.

Figura 46 – Acompanhamento do processo de busca local do algoritmo



Fonte: o autor

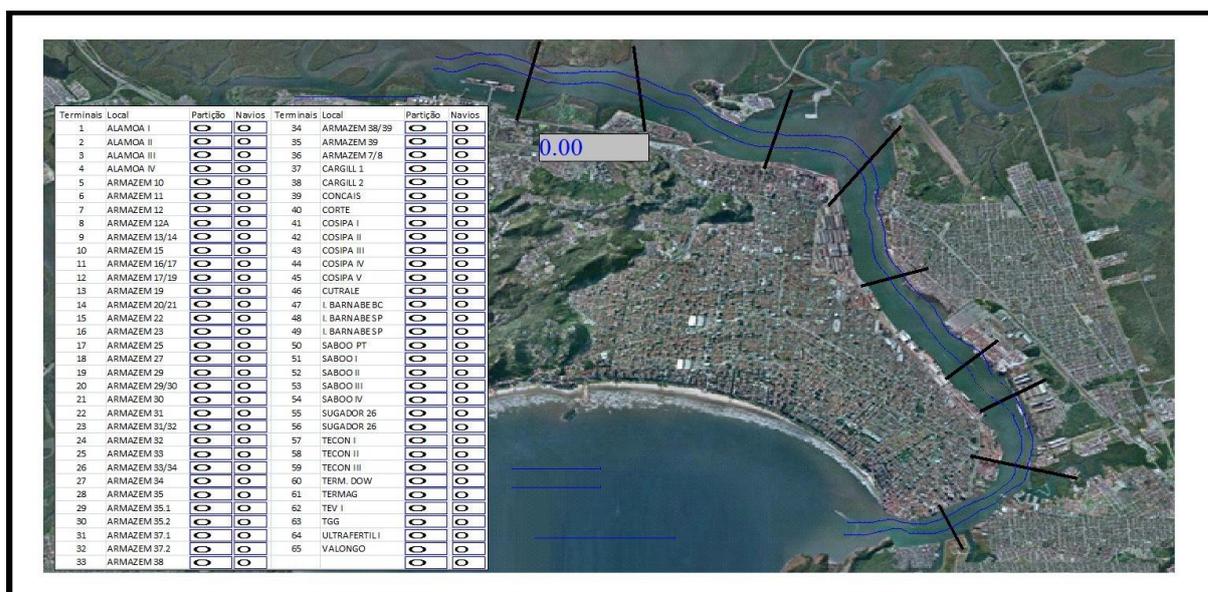
Observa-se na Figura 46 a dinâmica de busca do algoritmo proposto para solução do problema em estudo. A linha contínua horizontal representa o valor alcançado pela função objetivo e as barras verticais partindo do eixo das ordenadas indicam a frequência em que uma solução foi visitada na busca por um tempo de operação mais baixo. Percebe-se no primeiro terço do gráfico uma rápida melhoria da função objetivo com baixa repetição das soluções. Isto indica que nesta faixa a busca apresenta alta eficiência na busca, pois rapidamente apresenta redução. No segundo terço, observam-se barras verticais maiores, o que indica que as melhorias geradas pela busca local não são mais tão significativas quando comparadas com a parte anterior. Por fim, no ultimo terço observa-se pouca melhoria na função objetivo e grande repetição de resultados o que indica que a heurística já esgotou seu potencial e agora a melhoria não é mais significativa. Nesta fase a busca deve ser abandonada através da definição de um critério de saída que identifique a entrada nesta fase. Foi observado que aproximadamente 30% das iterações da busca permaneceram nesta parte do gráfico.

Uma vez escolhida uma solução considerada boa pelos três passos anteriores, ela será avaliada pelo modelo de simulação para avaliação dos indicadores de desempenho operacionais descritos na seção 3.3.

4.5. MODELO DE SIMULAÇÃO

O modelo desenvolvido utilizou o software de simulação de eventos discretos chamado ARENA, e possui certa tradição na modelagem de processos portuários. Abaixo, observa-se uma tela da animação do modelo desenvolvido (Figura 47).

Figura 47 – Imagem do modelo de simulação desenvolvido



Fonte: o autor

Neste modelo observa-se uma visão aérea do canal de acesso aos terminais do porto de Santos, com a divisão das partições de acordo com os dados apresentados na seção 4.2.

Durante a execução do modelo, observa-se o fluxo de navios entrando e saindo do canal, respeitando as regras de cruzamento no cenário em estudo. A tabela da esquerda representa o número de navios atracado em determinado terminal (ou berço, dependendo da forma em que o terminal aponta seus dados). Desta forma, para cada terminal, tem-se de maneira visual a informação de capacidade de atracação, bem como o número atual de navios atracados. Neste sistema ainda observa-se duas filas principais: (1) área de fundeio; e (2) aguardo para saída. A fila referente à área de fundeio está localizada no mapa próximo à mesma região em que os navios se encontram para aguardar seu momento de entrada. Já a fila de saída representa uma forma abstrata de indicar os navios que aguardam a saída. No sistema real, cada navio se encontra no berço ocupado, porém eles respeitam a

liberação para a ordem de saída como se estivessem sendo agrupados em uma fila virtual.

Cada partição possui sua configuração independente, conforme representado na Tabela 15. Estas configurações indicam parâmetros como: (1) Largura; (2) Comprimento; (3) Velocidade (navios regulares ou específicos, no caso da existência destes); (4) Tempo de navegação e manobra caso a embarcação conte com restrições de bloqueio e giro.

Por se tratar de casos muito específicos, este estudo não contará com o tráfego de navios específicos e as manobras contarão com o tempo mínimo previsto que é o caso da ausência de restrição e giro. Para casos futuros, estas restrições poderão ser ativadas para casos de análise de frotas específicas.

Tabela 15 – Dados empregados na experimentação do modelo (Santos, 2012)

		Partição										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Partição Largura (Metros)		210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210
Tamanho Fração da Partição Comprimento (Metros)		100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Partição Velocidade - Navios Regulares(nós)		7	7	6	7	7	7	8	7	6	7	6
Partição Velocidade - Navios Específicos (nós)		8	8	6	8	8	8	8	7	6	7	6
Tempo de navegação e manobra (minutos)	Sem restrição e sem giro	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
	Sem restrição e com giro	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
	Com restrição	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90

Na Tabela 16 podem ser observados os parâmetros gerais incorporados ao modelo para se configurar os cenários em estudo. Especial atenção ao parâmetro de índice 8, pois este será alvo da experimentação de se ter ou não um canal restritivo no que se refere à navegação em mão dupla.

Tabela 16 – Parâmetros gerais do modelo

ID	Parâmetros	Valores
1	Distância entre navios atracados (m)	20
2	Espaçamento entre navios regulares navegando no canal (m)	2000
3	Espaçamento entre navios específicos navegando no canal (m)	2000
4	Calado limite para navio ser considerado restritivo (m)	11
5	% de manobras sem restrição e sem giro	75%
6	Número de Berços	59
7	Tempo de simulação (dias)	3650
8	Restrição de boca (PIANC) ligada? (0-Não; 1-Sim)	1
9	Navios simultâneos da frota específica	1
10	Grids por particao	200
11	Tamanho do Grid	10
12	Duração dos bloqueios diários (h)	1
13	Percentual de bloqueio do canal	0%
14	Leitura de programação (0-não (Arena Gera dados) ; 1-sim (Leitura de TXT))	1
15	Sistema de Comboio (0-Não; 1-Sim)	0
16	Livre acesso pelos navios da Petrobras (0-Não; 1-Sim)	0
17	Animação (0-Não; 1-Sim)	0
18	# de replicações	10

Os demais parâmetros não serão detalhados por fugir ao escopo do presente estudo, sendo explicado em documento anexo a este documento.

A programação dos navios poderá seguir critérios determinísticos (de acordo com o presente estudo), ou estocásticos em casos de estudos de capacidade do porto. Para configuração destes cenários de capacidade, os dados da Figura 48 são empregados. Nestes casos, as configurações dos terminais quanto ao tipo de sua frota, numero de berços, dimensões dos navios, e tempo de atendimento são configurados. Por se tratarem de variáveis aleatórias, dos estes campos alimentam distribuições de probabilidade que alimentarão o modelo. No caso do presente estudo, somente os dados de tempo de atendimento serão utilizados, pois o objetivo é a verificação do tempo de atendimento dos navios em programação gerada pelo algoritmo de otimização apresentado na seção 3.2.

Seguindo as etapas de um estudo de simulação, precisa-se certificar de que o modelo é válido, portanto confiável para a experimentação. A tabela a seguir apresenta os dados de validação do modelo comparado com os dados operacionais reportados pelo porto de Santos na sua operação de 2012 (Tabela 17).

Tabela 17 – Principais indicadores avaliados

KPI	Dados	Modelo	Unidade	Desvio
Número de navios:	6.327	6.294	#/ano	-0,5%
Calado médio:	11,4	11,5	(m)	0,9%
Comprimento médio:	212,4	213,1	(m)	0,3%
Largura média:	30,7	30,6	(m)	-0,3%
Tempo médio de permanência no canal	42	41	(hora)	-1,8%
Estadia	70,7	70,6	(hora)	-0,1%
Total de Carga Transportada:	94	94	(Mtpa)	0,0%
Tempo de Operação	37,5	37,4	(hora)	-0,2%
Tempo médio percurso canal	1,36	1,36	(hora)	-0,2%

4.6. RESULTADOS

Desenvolver um modelo operacional, com horizonte diário, decidindo a ordem de entrada no sistema através da otimização e testando a consequência de tal programação através da simulação para testar o impacto das incertezas inerente ao processo. A programação gerada pode ser observada através da ferramenta desenvolvida para este fim, ilustrada nas figuras (Figura 44 e Figura 45).

4.7. CENÁRIOS

Através do teste de uma programação de chegada de navios baseada no histórico de movimentação entre os anos de 2007 e 2012, foram realizadas análises com modelo desenvolvido (Tabela 14). Esta programação indicará os navios disponíveis para o despachador autorizar a entrada rumo aos terminais. Partindo da mesma lista de 20 navios, foi gerada uma nova lista de 40 navios, para que desta forma sempre houvesse 2 navios tentando acessar o mesmo terminal e conseqüentemente fila para acesso ao mesmo. Assim, três cenários serão avaliados:

1. Cenário 1 (PIANC): neste cenário, a largura do navio irá impactar no cruzamento do mesmo com os navios que transitam no sentido contrário.
2. Cenário 2 (Liberado): agora, o cruzamento dos navios é livre independente do sentido percorrido.

3. Cenário 3 (Bloqueado): neste, somente um navio poderá percorrer o canal por vez, independente do sentido.

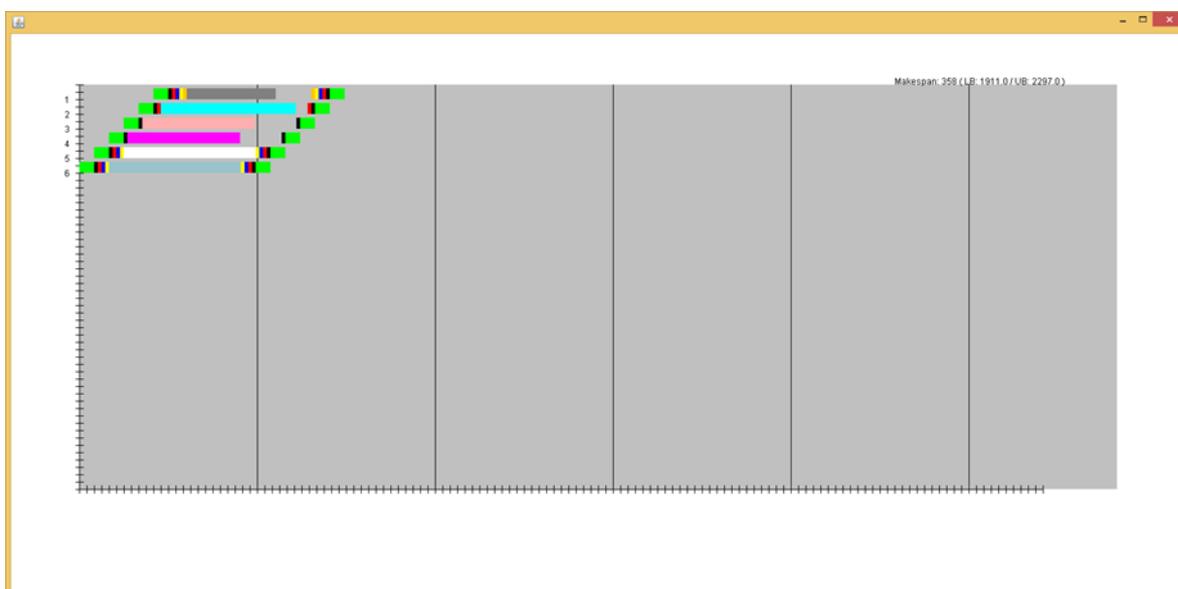
Dentro de cada cenário, três perfis de soluções serão apresentados:

1. FIFO (F): solução em que prevalece a ordem de chegada dos navios na programação original
2. Otimizado (O): solução apresentada pelo problema ao ser otimizado, com programação recomendada pelo modelo de otimização (Gurobi)
3. Heurístico (H): solução apresentada pelo problema ao ser resolvido pela heurística desenvolvida, com programação recomendada pelo modelo

4.7.1. Detalhamento Perfil 1: FIFO (F)

Neste experimento, o simulador irá dar entrada dos navios na ordem de sua chegada, a tabela abaixo indica a ordem em que o navio ingressou no canal (Figura 49).

Figura 49 – Resultado FIFO (exemplo)



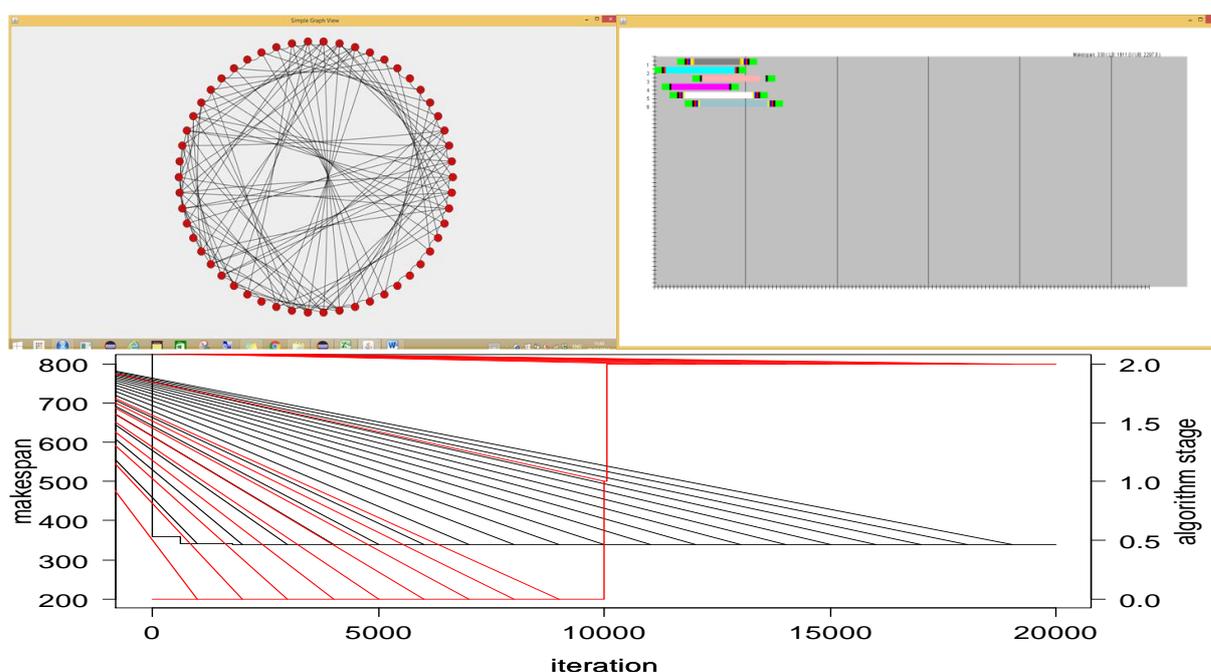
Fonte: o autor

Este resultado indica a operação regular do porto, onde os navios são atendidos na ordem em que se apresentam para a autoridade portuária. Esta ordem, embora apresente uma grande facilidade de implementação, retrata perdas para o sistema por não identificar oportunidades de melhor aproveitamento dos seus recursos.

4.7.2. Detalhamento perfil 2: Otimizado (O)

Neste experimento, o otimizador irá ditar qual a sequência em que os navios entrarão no canal (Figura 50).

Figura 50 – Resultado otimizado: grafo problema (esq. topo), Gantt (dir. topo), histórico resultados (inferior)



Fonte: o autor

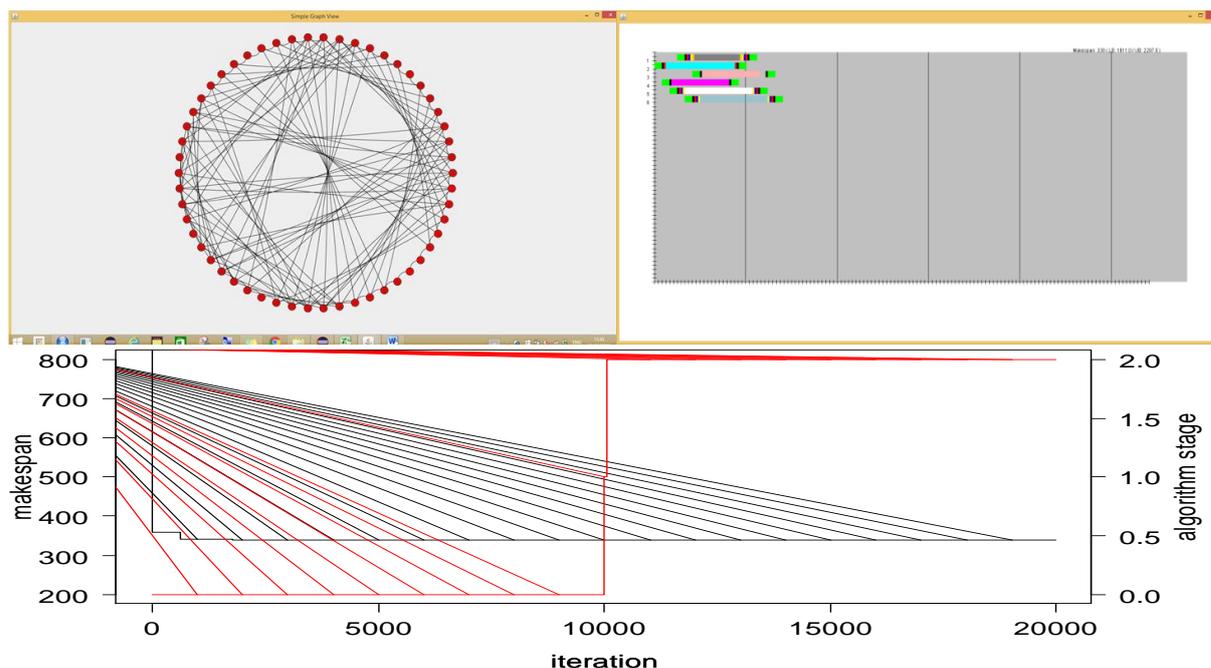
Neste cenário observa-se um melhor aproveitamento do sistema uma vez que a ordem FIFO foi rompida para priorizar os navios que apresentam um maior tempo de processo.

Esta mudança ficou evidente na Figura 50 uma vez que navios de operação mais rápida foram posicionados após navios de operações mais demoradas. Esta dinâmica lança mão da ideia de “caminho crítico”, uma vez que as tarefas mais demoradas tendem a impactar de maneira significativa na performance do sistema como um todo. Da mesma forma, tarefas mais velozes tendem a apresentar maior flexibilidade no tocante ao seu início, por possuírem folgas que servem como opções para o tomador de decisões.

4.7.3. Detalhamento Perfil 3: Heurístico (H)

Neste experimento, o simulador irá dar entrada dos navios na ordem de sua chegada, a tabela abaixo indica a ordem em que o navio ingressou no canal (Figura 51).

Figura 51 – Resultado heurístico: grafo problema (esq. topo), Gantt (dir. topo), histórico resultados (inferior)



Fonte: o autor

Este resultado indica a operação regular do porto, onde os navios são atendidos na ordem em que se apresentam para a autoridade portuária. Esta ordem, embora apresente uma grande facilidade de implementação, retrata perdas para o sistema por não identificar oportunidades de melhor aproveitamento dos seus recursos. Uma vez definida a forma de análise, serão detalhados os resultados alcançados em cada cenário, bem como seus respectivos perfis e uma análise global será apresentada.

4.8. CENÁRIO 1 (PIANC)

O cenário 1 (PIANC) representa as considerações de restrições da largura da boca da embarcação para liberar ou não o cruzamento dos navios em sentidos opostos. Estas regras podem ser detalhadamente exploradas em (1995).

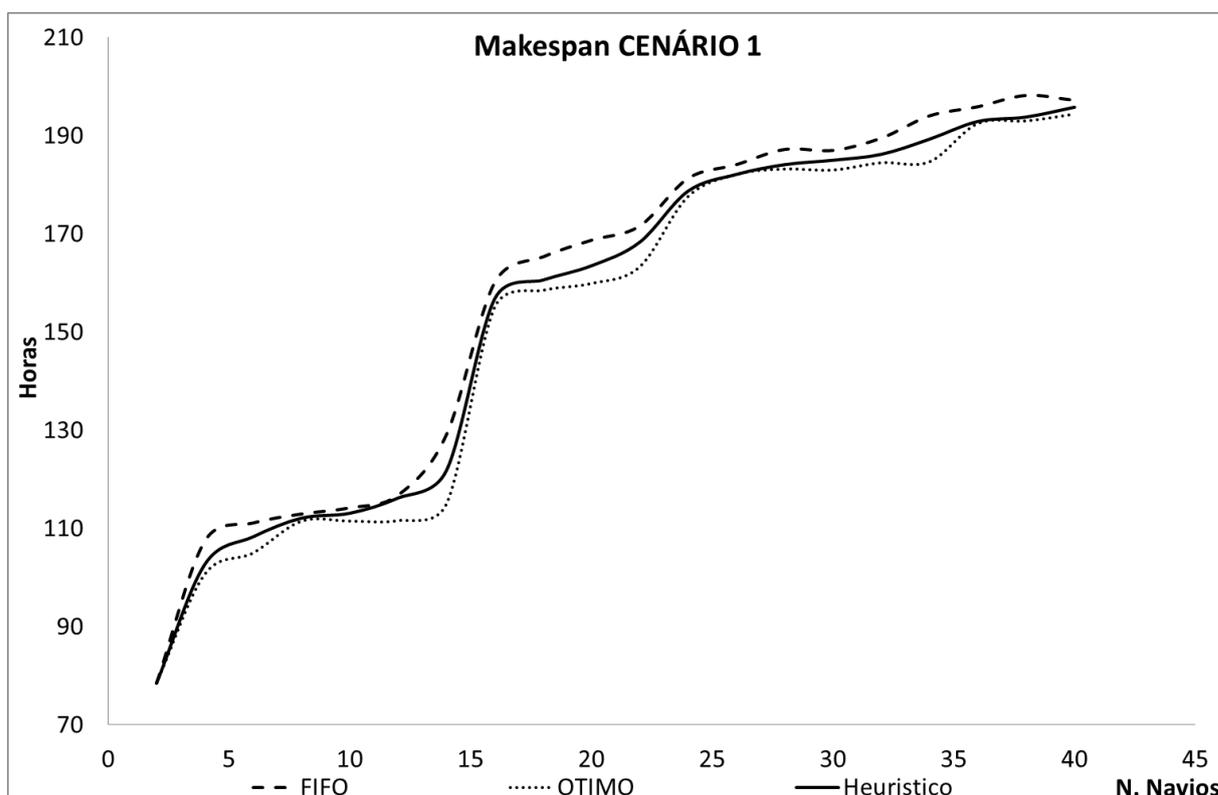
4.8.1. Resumo executivo cenário 1 (PIANC):

Tabela 18 – Resumo cenário 1 (PIANC)

			2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	
Makespan	Horas	F	78,5	107,5	111,1	112,9	114,2	116,8	129,1	160,1	165,3	168,7	171,6	181,3	184,1	187,2	187,0	189,5	194,0	195,9	198,2	197,2	
		O	78,5	100,7	105,0	111,5	111,5	111,6	115,0	155,1	158,5	159,9	163,3	177,6	182,1	183,2	183,0	184,5	184,7	192,5	193,0	194,4	
		%	0,0%	6,3%	5,5%	1,3%	2,4%	4,5%	10,9%	3,1%	4,1%	5,2%	4,8%	2,0%	1,1%	2,1%	2,1%	2,6%	4,8%	1,7%	2,6%	1,4%	
		H	78,5	102,7	108,3	112,1	113,1	116,2	121,8	156,8	160,6	163,5	168,3	178,7	182,1	184,1	185,0	186,2	189,3	192,9	193,8	195,8	
		%	0,0%	4,4%	2,5%	0,7%	1,0%	0,5%	5,7%	2,1%	2,9%	3,1%	1,9%	1,4%	1,1%	1,7%	1,1%	1,7%	2,4%	1,5%	2,2%	0,7%	
		%%	0,0%	2,0%	3,1%	0,5%	1,4%	4,1%	5,9%	1,1%	1,3%	2,3%	3,1%	0,6%	0,0%	0,5%	1,1%	0,9%	2,5%	0,2%	0,4%	0,7%	
Espera Entrada	Horas	F	0,9	2,0	3,4	4,4	5,7	6,4	7,4	7,7	8,1	8,7	10,0	9,1	10,5	11,3	12,8	12,8	13,9	14,8	17,7	17,0	
		O	0,9	2,0	3,1	4,0	5,7	6,1	7,1	7,0	6,5	8,6	10,0	8,8	8,9	9,6	11,6	12,6	13,3	13,2	14,2	14,7	
		%	0,0%	0,0%	7,1%	10,4%	0,0%	5,1%	3,9%	9,2%	19,6%	1,0%	0,0%	2,4%	15,1%	15,4%	9,7%	1,1%	4,5%	11,3%	19,7%	13,1%	
		H	0,9	2,0	3,1	4,0	5,7	6,1	6,8	7,7	7,2	7,5	10,0	8,8	9,3	10,1	11,6	11,4	12,1	14,2	15,8	14,9	
		%	0,0%	0,0%	7,1%	10,4%	0,0%	5,4%	8,6%	0,4%	10,2%	13,9%	0,0%	2,4%	11,4%	10,7%	9,5%	11,0%	13,1%	4,2%	10,8%	12,3%	
		%%	0,0%	0,0%	7,1%	10,4%	0,0%	5,4%	8,6%	0,4%	10,2%	13,9%	0,0%	2,4%	11,4%	10,7%	9,5%	11,0%	13,1%	4,2%	10,8%	12,3%	
Espera Saída	Horas	F	0,0	0,0	0,7	0,8	0,5	0,3	1,8	0,9	1,4	0,7	2,0	1,5	0,6	0,4	1,3	0,5	1,9	2,2	1,2	1,9	
		O	0,0	0,0	0,3	0,8	0,4	0,3	1,0	0,8	0,7	0,4	0,5	1,1	0,6	0,2	1,2	0,5	1,6	1,7	0,8	1,5	
		%	0,0%	0,0%	50,8%	0,0%	20,4%	9,1%	47,3%	11,0%	47,5%	33,8%	76,0%	27,2%	0,0%	56,4%	3,9%	11,8%	14,4%	22,9%	35,6%	23,3%	
		H	0,0	0,0	0,3	0,8	0,4	0,3	1,5	0,9	0,7	0,5	0,9	1,4	0,4	0,3	1,3	0,5	1,8	2,0	0,5	1,0	
		%	0,0%	0,0%	50,8%	0,0%	20,4%	3,0%	16,3%	5,5%	51,8%	26,2%	53,5%	6,8%	31,3%	33,3%	0,8%	11,8%	5,9%	7,3%	60,2%	48,7%	
		%%	0,0%	0,0%	50,8%	0,0%	20,4%	3,0%	16,3%	5,5%	51,8%	26,2%	53,5%	6,8%	31,3%	33,3%	0,8%	11,8%	5,9%	7,3%	60,2%	48,7%	
Ocupação Entrada	%	F	50%	75%	83%	88%	90%	92%	93%	94%	94%	95%	95%	92%	88%	93%	90%	94%	94%	94%	94%	97%	98%
		O	50%	75%	83%	88%	90%	92%	93%	94%	94%	95%	91%	92%	85%	93%	90%	91%	88%	92%	89%	93%	
		%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	4,2%	0,0%	3,4%	0,0%	0,0%	3,2%	6,4%	2,1%	8,2%	5,1%	
		H	50%	75%	83%	88%	90%	92%	93%	94%	94%	95%	95%	88%	85%	89%	90%	88%	94%	94%	94%	92%	95%
		%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	4,3%	3,4%	4,3%	0,0%	6,4%	0,0%	0,0%	5,2%	3,1%	
		%%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	4,3%	3,4%	4,3%	0,0%	6,4%	0,0%	0,0%	5,2%	3,1%	
Ocupação Saída	%	F	0%	0%	33%	55%	20%	25%	43%	39%	61%	35%	41%	33%	27%	25%	37%	38%	50%	42%	42%	48%	
		O	0%	0%	17%	38%	20%	25%	43%	38%	28%	25%	41%	26%	12%	22%	30%	38%	44%	40%	37%	38%	
		%	0,0%	0,0%	48,5%	30,9%	0,0%	0,0%	0,0%	2,6%	54,1%	28,6%	0,0%	21,2%	55,6%	12,0%	18,9%	0,0%	12,0%	4,8%	11,9%	20,8%	
		H	0%	0%	17%	38%	20%	25%	43%	39%	44%	35%	32%	26%	27%	22%	37%	31%	26%	40%	21%	43%	
		%	0,0%	0,0%	48,5%	30,9%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	27,9%	0,0%	22,0%	21,2%	0,0%	12,0%	0,0%	18,4%	48,0%	4,8%	50,0%	10,4%	
		%%	0,0%	0,0%	48,5%	30,9%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	27,9%	0,0%	22,0%	21,2%	0,0%	12,0%	0,0%	18,4%	48,0%	4,8%	50,0%	10,4%	
Estadia	Horas	F	78,1	80,9	75,1	79,6	74,4	70,4	70,1	76,3	80,3	79,5	80,1	84,8	89,8	89,1	90,6	90,3	96,3	96,6	100,4	101,5	
		O	78,1	80,7	73,5	79,0	72,0	70,3	69,0	76,2	78,4	79,4	80,1	81,8	89,1	81,5	89,2	82,7	95,7	95,9	97,4	97,1	
		%	0,0%	0,2%	2,1%	0,8%	3,3%	0,1%	1,6%	0,1%	2,4%	0,1%	0,0%	3,5%	0,8%	8,5%	1,5%	8,4%	0,6%	0,7%	3,0%	4,3%	
		H	78,1	80,7	73,5	79,0	72,0	70,1	70,1	75,6	79,2	77,9	80,1	82,9	87,4	87,8	89,5	88,1	92,3	96,6	95,7	101,2	
		%	0,0%	0,2%	2,1%	0,8%	3,3%	0,4%	0,0%	0,9%	1,4%	2,0%	0,0%	2,2%	2,7%	1,5%	1,2%	2,4%	4,2%	0,0%	4,7%	0,3%	
		%%	0,0%	0,2%	2,1%	0,8%	3,3%	0,4%	0,0%	0,9%	1,4%	2,0%	0,0%	2,2%	2,7%	1,5%	1,2%	2,4%	4,2%	0,0%	4,7%	0,3%	

F: perfil FIFO
O: perfil OTIMO
H: perfil HEURISTICO

Figura 52 – Resultados CENÁRIO 1



Fonte: o autor

Remetendo-se ao fato de que no CENÁRIO 1, a largura (BOCA) do navio interfere na ocorrência ou não do cruzamento de navios em direções contrárias, respeitando as regras descritas na seção 2.1.5, observa-se o aumento gradual e irregular período de atendimento (*Makespan*) dos navios com o aumento da frota que acessa o sistema portuário. Dentro dos três perfis que compõe o cenário 1 (FIFO, OTIMO e HEURÍSTICO), percebe-se o comportamento esperado de tais soluções. Ou seja, a solução ótima do problema apresenta os valores mais baixos de *Makespan* pelo fato de encontrar soluções melhores; as programações FIFO apresentam *Makespan* maiores, por se tratar de soluções sem nenhum critério de priorização; e, por fim, as soluções heurísticas que em alguns momentos propõe *Makespan* tão baixos quanto a ótima, e outros, tão altos quanto as FIFO, porém sempre ficando envolta entre os dois perfis.

Algo que chama atenção no gráfico é o degrau observado na faixa entre 15 e 20 navios. Esta irregularidade reflete a entrada de uma sequência de navios destinados às últimas partições do canal, e com maior tempo de operação (associados aos

terminais de minério no fundo do canal) que acaba aumentando o *Makespan* do sistema como um todo. Estes navios, embora elevem o tempo de atendimento do porto, eles, quando programados pelo modelo proposto, podem representar um maior ganho de produtividade (9,9%; 8,1%; 5,4%), quando programados 14, 16 e 18 navios respectivamente e comparados com a solução FIFO que foi praticada pelo porto na ocasião.

Para um porto de baixa movimentação, (região até 6 navios), o modelo não apresentou redução no *Makespan*, indicando baixa recomendação do uso da programação para estes casos. Por outro lado, portos com operação mais intensa (como porto de Santos, por exemplo), o modelo apresenta ganhos reais em sua operação. De forma agregada, ao se analisar toda a variação de navios, percebe-se um ganho médio de 3,3% no *Makespan* do porto, ao se medir a redução média de tempo do tempo de atendimento da solução FIFO em relação à solução Ótima. Embora aparentemente seja um valor baixo, representa um acréscimo aproximado de 190 navios, quando comparado à operação de 2011 com 6.327 navios anuais.

4.9. CENÁRIO 2 (LIBERADO)

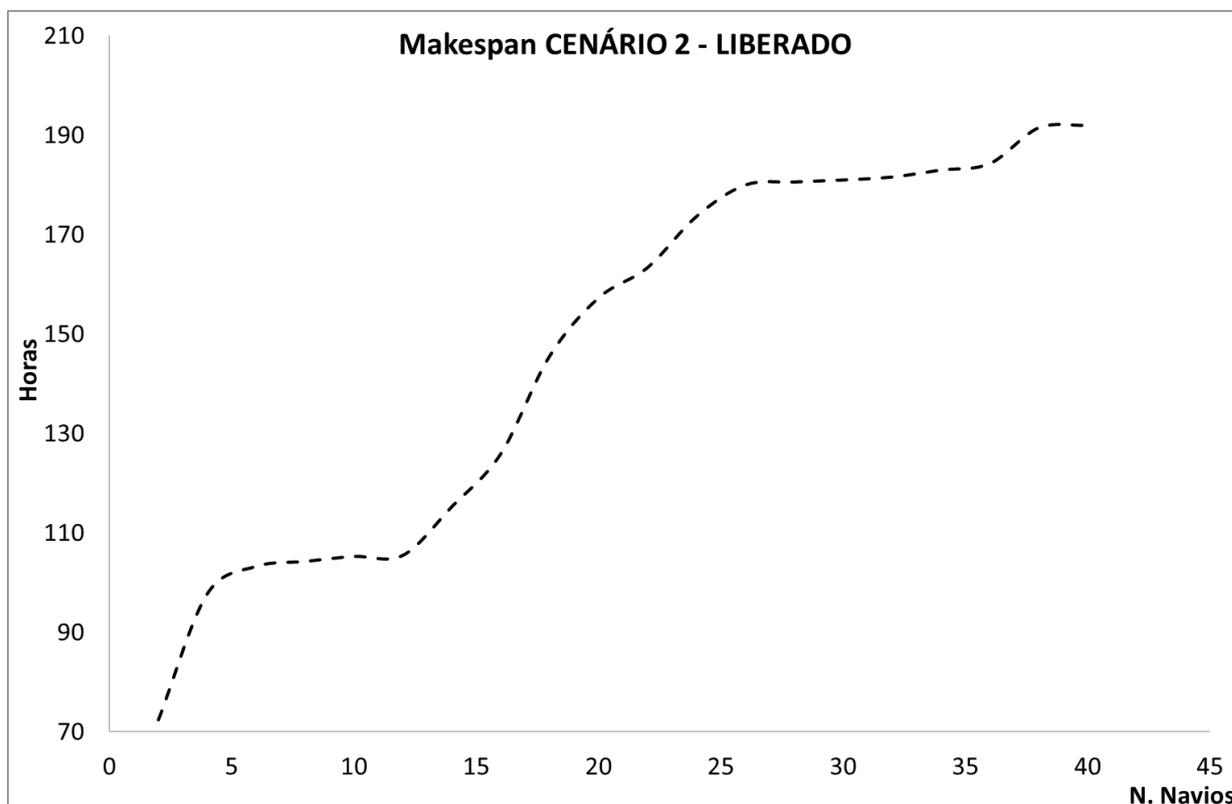
O cenário de cruzamento independente (liberado), por sua vez, apresenta a maior flexibilidade para o uso do canal. Porém o investimento para tal operação é estimado em ordem de milhões, se tornando alto por incluir a necessidade de controle e monitoramento das embarcações. Casos como o canal do Panamá que funciona baseando-se em sistemas de eclusas necessitam operar neste regime, pois os reservatórios operam de forma independente em cada sentido do canal. Assim, o fluxo de entrada (Atlântico – Pacífico) não interfere no fluxo de saída (Pacífico – Atlântico). Ao se resgatar as origens da técnica empregada para a realização da programação, este caso representa a programação em fluxo (flow shop) conforme discutido na seção 2.2.1.2. Portanto, neste cenário o impacto da otimização é nulo, uma vez que a ordem do atendimento de cada terminal não sofre influência na possibilidade ou não do cruzamento. Este cenário servirá como referência para o conhecimento do menor *Makespan* que o sistema em estudo poderá atingir.

4.9.1. Resumo executivo cenário 2 (LIBERADO):

Tabela 19 – Resumo cenário 2 (LIBERADO)

		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
Makespan	Horas	72,4	97,8	103,3	104,3	105,3	105,5	115,3	125,9	145,6	157,3	163,4	173,7	180,0	180,6	181,0	181,6	183,0	184,3	191,5	192,0
Espera Entrada	Horas	0,9	1,2	2,6	3,1	4,2	4,7	4,9	5,0	5,9	6,3	6,6	6,5	7,9	8,2	10,2	9,9	10,8	11,3	13,3	13,5
Espera Saída	Horas	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	1,0	0,1	0,1
Ocupação Entrada	%	50%	50%	67%	63%	70%	67%	64%	63%	61%	60%	64%	58%	62%	61%	63%	63%	65%	69%	71%	75%
Ocupação Saída	%	0%	0%	0%	0%	10%	17%	21%	19%	11%	10%	14%	8%	19%	14%	10%	6%	18%	14%	13%	15%
Estadia	Horas	78,1	80,1	73,6	77,4	70,1	68,2	66,8	73,2	76,8	76,6	76,4	80,3	86,8	85,8	86,6	86,9	91,8	91,6	94,5	95,2

Figura 53 – Resultados CENÁRIO 2 – LIBERADO



Fonte: o autor

4.10. CENÁRIO 3 (BLOQUEADO)

O cenário com cruzamento bloqueado é o mais conservador dentre os verificados. Este aguarda a total saída de um navio para a posterior programação do próximo movimento, que pode ser de entrada ou saída. Esta política provoca uma ociosidade natural no sistema, pois mesmo que navios se direcionem às partições diferentes, devem aguardar até que o canal seja liberado do navio anterior. Em casos de canais com infraestrutura pequena e de difícil acesso, entende-se como inevitável o uso desta política, porém à medida que o sistema logístico se desenvolva, esta política deve ser gradualmente abandonada até seu completo desuso, pois a perda de eficiência observada é alta quando levado em consideração o alto investimento aplicado para a construção e manutenção de um canal de acesso portuário.

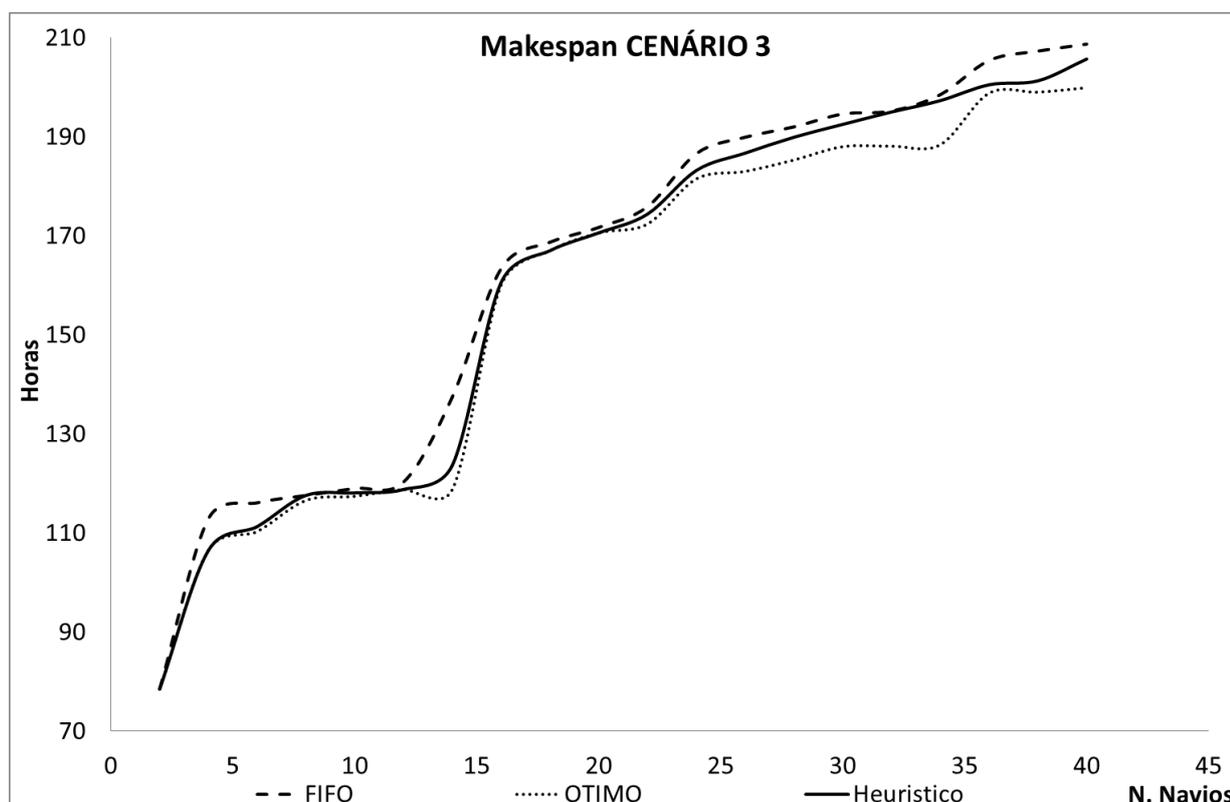
4.10.1. Resumo executivo cenário 3 (BLOQUEADO):

Tabela 20 – Resumo cenário 3 (BLOQUEADO)

			2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
Makespan	Horas	F	78,5	112,9	116,1	117,6	119,0	120,3	137,5	163,4	168,7	171,7	175,9	186,6	189,9	192,0	194,6	195,2	198,5	205,4	207,3	208,7
		O	78,5	106,5	110,3	116,6	117,4	118,8	118,8	160,1	167,0	170,6	172,4	181,5	183,0	185,3	188,0	188,1	188,4	198,8	199,0	199,9
		%	0,0%	5,7%	5,0%	0,9%	1,3%	1,2%	13,6%	2,0%	1,0%	0,6%	2,0%	2,7%	3,6%	3,5%	3,4%	3,6%	5,1%	3,2%	4,0%	4,2%
		H	78,5	106,5	111,3	117,6	118,1	118,8	123,7	160,6	167,0	170,6	174,4	183,2	186,7	189,9	192,5	195,0	197,3	200,5	201,3	205,7
		%	0,0%	5,7%	4,1%	0,0%	0,8%	1,2%	10,0%	1,7%	1,0%	0,6%	0,9%	1,8%	1,7%	1,1%	1,1%	0,1%	0,6%	2,4%	2,9%	1,4%
		%%	0,0%	0,0%	0,9%	0,9%	0,6%	0,0%	4,1%	0,3%	0,0%	0,0%	1,2%	0,9%	2,0%	2,5%	2,4%	3,7%	4,7%	0,9%	1,2%	2,9%
Espera Entrada	Horas	F	0,9	1,9	3,4	4,4	5,3	7,4	7,4	7,7	8,1	9,7	11,7	12,5	13,4	14,2	14,4	16,0	17,1	19,4	21,2	22,1
		O	0,9	1,9	3,4	4,2	5,2	6,4	6,9	7,7	7,8	9,3	9,4	9,5	12,8	13,3	13,8	14,1	14,3	15,1	16,6	17,6
		%	0,0%	0,0%	0,3%	5,6%	1,5%	12,7%	7,3%	0,0%	3,1%	3,9%	19,9%	24,1%	4,8%	6,6%	4,6%	11,6%	16,5%	22,1%	21,5%	20,2%
		H	0,9	1,9	3,1	4,3	5,2	6,0	7,0	7,5	7,6	9,4	9,7	10,5	11,2	11,2	13,9	14,4	17,1	17,8	18,3	22,1
		%	0,0%	0,0%	6,8%	2,9%	1,5%	18,4%	5,4%	2,6%	5,6%	2,8%	17,3%	16,1%	16,8%	21,1%	4,1%	9,9%	0,0%	8,4%	13,5%	0,0%
		%%	0,0%	0,0%	6,8%	2,9%	1,5%	18,4%	5,4%	2,6%	5,6%	2,8%	17,3%	16,1%	16,8%	21,1%	4,1%	9,9%	0,0%	8,4%	13,5%	0,0%
Espera Saída	Horas	F	0,0	0,0	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,9	1,4	1,4	1,7	2,5	3,0	3,1	3,9	4,1	4,9	5,0	5,2	5,9
		O	0,0	0,0	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	1,1	1,1	1,4	2,0	2,2
		%	0,0%	0,0%	69,2%	58,2%	47,8%	42,0%	34,2%	40,7%	57,6%	51,4%	59,5%	70,6%	74,0%	73,5%	77,6%	73,9%	77,1%	72,4%	61,9%	63,8%
		H	0,0	0,0	0,3	0,4	0,5	0,4	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	1,7	1,9	2,4	2,5	2,7	3,6	3,9	3,9
		%	0,0%	0,0%	50,8%	35,8%	30,4%	36,2%	23,7%	38,5%	52,5%	47,9%	56,1%	68,2%	42,3%	39,2%	39,5%	38,4%	44,9%	28,6%	25,6%	33,7%
		%%	0,0%	0,0%	50,8%	35,8%	30,4%	36,2%	23,7%	38,5%	52,5%	47,9%	56,1%	68,2%	42,3%	39,2%	39,5%	38,4%	44,9%	28,6%	25,6%	33,7%
Ocupação Entrada	%	F	50%	75%	83%	88%	90%	92%	93%	94%	94%	95%	95%	96%	96%	96%	97%	97%	97%	97%	97%	98%
		O	50%	75%	83%	88%	90%	92%	93%	93%	94%	95%	95%	96%	96%	96%	97%	97%	97%	97%	97%	98%
		%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
		H	50%	75%	83%	88%	90%	92%	93%	94%	94%	95%	95%	96%	96%	96%	97%	97%	97%	97%	97%	98%
		%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
		%%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Ocupação Saída	%	F	0%	0%	25%	25%	25%	25%	31%	34%	36%	36%	38%	40%	40%	43%	44%	44%	50%	50%	50%	50%
		O	0%	0%	0%	25%	25%	25%	25%	25%	30%	30%	32%	38%	40%	41%	41%	44%	48%	50%	50%	50%
		%	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%	0,0%	0,0%	19,4%	26,5%	16,7%	16,7%	15,8%	5,0%	0,0%	4,7%	6,8%	0,0%	4,0%	0,0%	0,0%	0,0%
		H	0%	0%	17%	17%	20%	20%	21%	21%	30%	30%	32%	38%	40%	41%	41%	44%	49%	50%	50%	50%
		%	0,0%	0,0%	32,0%	32,0%	20,0%	20,0%	32,3%	38,2%	16,7%	16,7%	15,8%	5,0%	0,0%	4,7%	6,8%	0,0%	2,0%	0,0%	0,0%	0,0%
		%%	0,0%	0,0%	32,0%	32,0%	20,0%	20,0%	32,3%	38,2%	16,7%	16,7%	15,8%	5,0%	0,0%	4,7%	6,8%	0,0%	2,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Estadia	Horas	F	68,1	70,9	75,1	79,6	81,2	83,0	84,7	86,3	90,3	91,7	92,4	93,0	93,3	93,4	93,7	94,5	100,9	101,7	105,7	106,6
		O	68,1	70,0	74,5	79,0	80,0	80,7	80,9	81,2	82,7	83,3	85,6	88,8	92,2	92,6	93,2	94,1	96,7	97,7	100,3	102,2
		%	0,0%	1,3%	0,8%	0,8%	1,5%	2,8%	4,5%	5,9%	8,4%	9,2%	7,4%	4,5%	1,2%	0,9%	0,5%	0,4%	4,2%	3,9%	5,1%	4,1%
		H	68,1	70,0	74,5	79,1	80,0	80,7	80,9	81,2	87,3	90,6	90,9	91,0	92,0	92,0	92,5	92,8	100,0	100,0	101,5	106,6
		%	0,0%	1,3%	0,8%	0,6%	1,5%	2,8%	4,5%	5,9%	3,3%	1,2%	1,6%	2,2%	1,4%	1,5%	1,3%	1,8%	0,9%	1,7%	4,0%	0,0%
		%%	0,0%	1,3%	0,8%	0,6%	1,5%	2,8%	4,5%	5,9%	3,3%	1,2%	1,6%	2,2%	1,4%	1,5%	1,3%	1,8%	0,9%	1,7%	4,0%	0,0%

F: perfil FIFO
O: perfil OTIMO
H: perfil HEURISTICO

Figura 54 – Resultado CENÁRIO 3



Fonte: o autor

Quando incorporado o bloqueio completo do canal em ambos os lados durante o ingresso de uma embarcação, a análise do tempo de atendimento também apresenta melhoria na operação do porto. Da mesma forma que apresentado no Cenário 1 (PIANC), a curva que representa as soluções encontradas pela heurística está limitada pelas envoltórias criadas pelas curvas da solução FIFO (superior) e ÓTIMO (inferior).

A inclinação da curva apresentada pelo cenário 3 apresenta uma tendência maior de crescimento, apresentando maior correlação com o número de navios ($\rho = ,9598$; p-value < 0,05); enquanto no cenário 1 ($\rho = ,9447$; p-value < 0,05), embora ambas as correlações sejam altas.

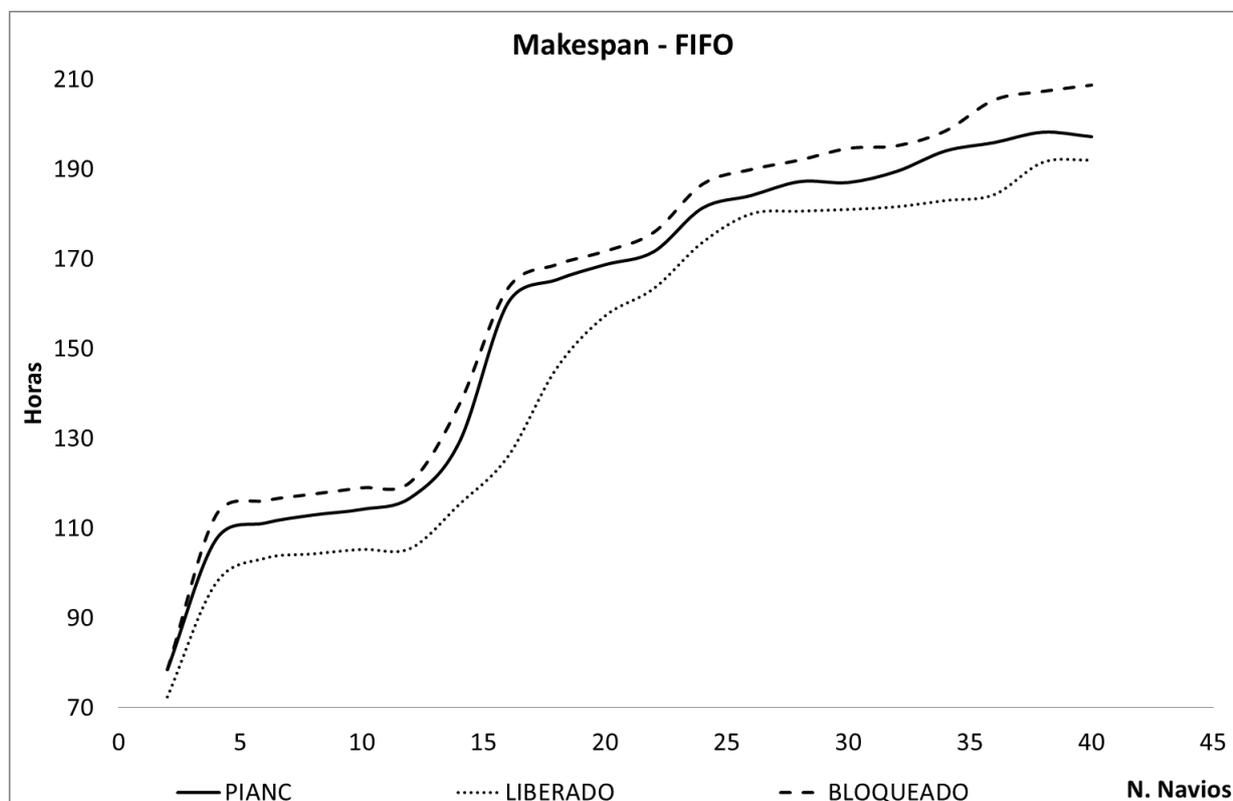
4.10.2. ANÁLISE RESULTADOS

Uma vez compreendido individualmente os cenários, as análises que apresentam maior contribuição às operações portuárias estão nos resultados entre os cenários,

que serão apresentadas a seguir: (1) análise do impacto das políticas; (2) uso da otimização para gerenciar um porto.

4.10.3. Impacto da diferença das políticas:

Figura 53 – Impacto das políticas de cruzamento



Fonte: o autor

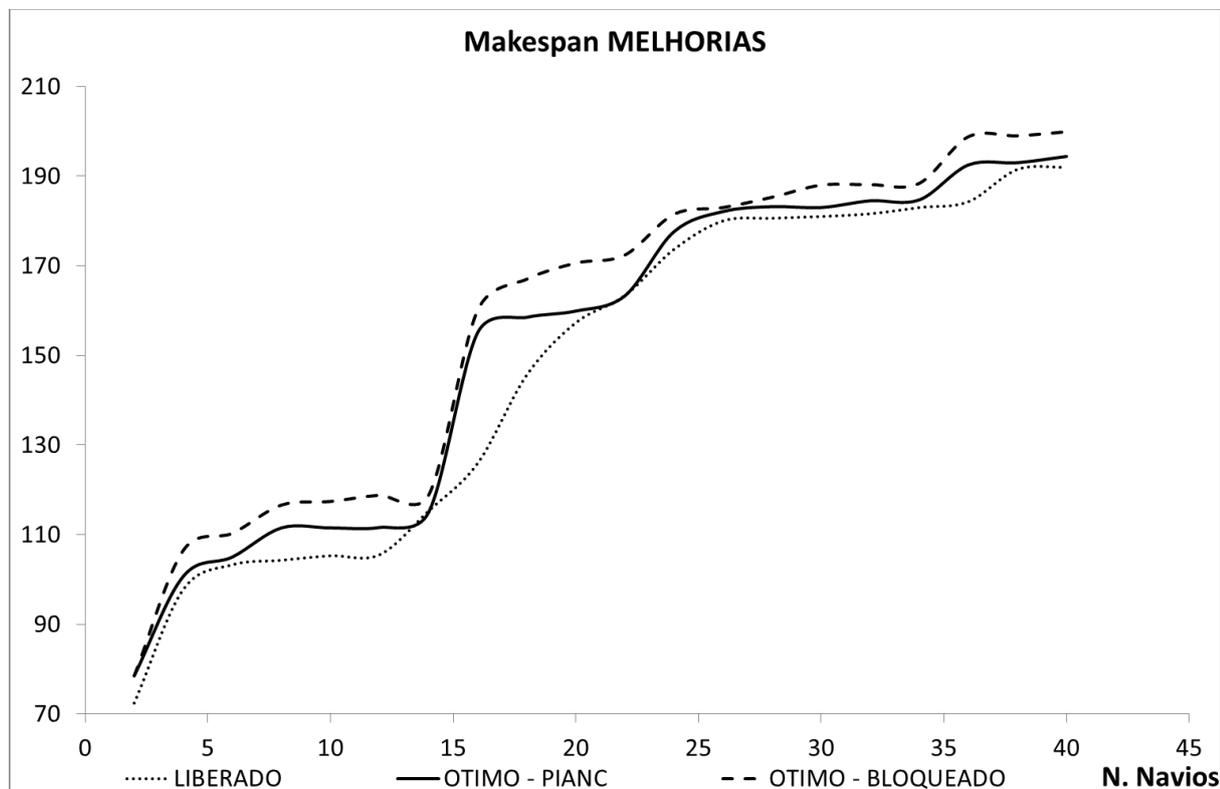
Conforme mencionado anteriormente, a política de cruzamento liberada representa o máximo em flexibilidade operacional do porto, provando segundo a Figura 53 que através desta política, os menores Makespan são atingidos. Por outro lado, o uso de uma política totalmente conservadora como a política BLOQUEADO representa os maiores tempos de atendimento dentro dos cenários estudados.

Neste sentido, a Figura 53 evidencia o benefício do uso da política PIANC, onde o cruzamento entre navios é permitido, desde que entre navios pequenos, ou seja, se levado em consideração a largura da sua boca. O ganho não é muito grande quando simplesmente se passa a operar sob a política PIANC (2,2%, ou seja, aprox. 140 navios se comparado os 6.327 navios de 2011).

Entretanto, este ganho pode ser ampliado ao se incorporar o uso da programação dos navios.

4.10.4. Impacto da gestão pela otimização:

Figura 54 – Análise da melhoria global



Fonte: o autor

Ao se analisar o cenário 1 (PIANC), com o uso da otimização como ferramenta de programação dos navios, percebe-se que esta curva se aproxima significativamente da curva liberada. Esta melhoria representa uma redução do tempo de atendimento de 5,5% em relação à solução FIFO. Assim, o aumento do número de navios seria de aproximadamente 350 navios, ou seja, aproximadamente um navio por dia seria atendido a mais no sistema portuário caso fosse empregada a técnica de programação de produção nos navios, quando associada à aplicação da política de cruzamento PIANC. Desta forma, observa-se, neste caso, um melhor aproveitamento do sistema, uma vez que a ordem FIFO foi rompida para priorizar os navios que apresentam um maior tempo de processo. Esta mudança ficou evidente dado que navios de operação mais rápida foram posicionados após navios de operações mais demoradas. Esta dinâmica lança mão da ideia de “caminho crítico”, uma vez que as tarefas mais demoradas tendem a impactar de maneira significativa na performance do sistema como um todo. Da mesma forma, tarefas mais rápidas

tendem a apresentar maior flexibilidade no tocante ao seu início, por possuem folgas que servem como opções para o tomador de decisões.

5. DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

Para a discussão dos resultados encontrados no presente estudo, são ressaltados pontos referentes à otimização, em seguida sobre a simulação e por fim uma visão geral do sistema, seguida de questões referente à aplicabilidade das soluções encontradas.

5.1. DISCUSSÕES SOBRE TEMAS RELEVANTES DO TRABALHO

5.1.1. Análise das soluções da otimização

Por se tratar de uma abordagem não tradicional do sistema em estudo (continuidade parcial), não foram encontrados valores de referência (*benchmarks*) para estimativa da performance do algoritmo desenvolvido, porém existem referências tradicionais na literatura técnico-científico que podem ser utilizadas como ponto de partida. Problemas de programação de produção foram explorados por (TAILLARD, 1993) e quando modelado o mesmo problema, os resultados alcançados são descritos a seguir. Desta forma, o algoritmo apresentou resultado compatível e adequado para o uso em larga escala.

5.1.2. Análise das soluções da simulação

A ideia de se lançar mão de duas técnicas de modelagem apresentou grande valia nos resultados apresentados, uma vez que embora se pretenda planejar a operação portuária, efeitos estocásticos são de difícil incorporação em um modelo de otimização. Assim, ao invés de se criar um modelo de alta complexidade, difícil aplicação e improvável validação com dados reais operacionais, optou-se pelo uso de dois modelos simples, alta aplicação prática e baixa curva de aprendizagem pelo usuário final que é o tomador de decisão do porto.

5.1.3. Visão holística do sistema

Reconhece-se que sempre quando um esforço é feito para melhoria de um sistema como um todo, algumas partes destes sistemas podem ser prejudicadas. No caso estudado, quando se altera a ordem de entrada ao canal de acesso do porto, eventualmente um navio ou outro pode ser preterido e sofrer atraso. Este efeito é observado em qualquer sistema de priorização. Mas deve-se levar em consideração

que o sistema como um todo será mais bem aproveitado, conseqüentemente as filas serão reduzidas e a espera média (conforme mostrado nas tabelas de resultados) será menor. Portanto, o sistema operando melhor, a produtividade do porto aumenta e conseqüentemente, mais navios são atendidos no mesmo intervalo de tempo. Este efeito pode ser aproveitado pelos armadores que serão menos afetados pelo Demurrage e multas características desta operação.

Outro efeito que esteve fora do escopo deste estudo, mas merece referencia é o sincronismo da entrada do navio com a operação do terminal. Como existem momentos precisamente alocados à entrada e saída do canal, os terminais precisarão ficar atentos para sua produtividade, pois a não liberação para entrada de um navio pode acarretar atrasos em todo o porto e prejudicar o sistema (ou a si mesmo, pois seu navio deverá ser novamente agendado para o próximo dia e não simplesmente atrasado para a próxima entrada). Assim, uma ferramenta onde esta programação é visível para todos os terminais poderá identificar gargalos e baixa produtividade exercida pelos terminais, motivando seu investimento em processos e tecnologias que entreguem maior produtividade.

5.1.4. Aplicabilidade das soluções encontradas

Conforme apresentado anteriormente, o amadurecimento do entendimento deste problema abriu margem para sua aplicação em diversos contextos logísticos, pois o acesso de um veículo ao seu ponto de operação quando este está sujeito a um recurso de acesso compartilhado com outros veículos pode ser presenciado em operações logísticas rodoviárias, aéreas, ou outros contextos marítimos (rios e lagos). Portanto, espera-se que este estudo seja o ponto de início para o estudo que passará a ser conhecido como “Problemas de Programação de Operações Logísticas” (Logistics Scheduling).

5.2. CONCLUSÕES

O sistema proposto apresentou resultados satisfatórios para provar o ponto defendido neste trabalho: o da existência de margem para melhorias na operação portuária no caso do uso de uma ferramenta de otimização que gerencie a fila do canal de acesso ao porto.

O uso de critérios quantitativos facilita a aceitação da ferramenta por traduzir em números rotineiramente utilizados pela equipe operacional do porto, porém critérios qualitativos também podem ser discutidos como redução do número de navios na área de fundeio, portanto não impactando a paisagem urbana da cidade de Santos, bem como impactos ambientais nesta operação.

Adicionalmente, ambos os modelos demonstraram robustez no tratamento do problema, resolvendo em um tempo razoável os exemplos explorados no capítulo anterior. A otimização era resolvida na ordem de segundos, e a simulação na ordem de minutos, portanto o processo como um todo levava um tempo inferior à uma hora.

O uso de ferramentas quantitativas para o melhor uso de um sistema produtivo apresenta reporte de longa data em literatura técnico-científico. Porém, este uso está sujeito ao nicho em que as ferramentas foram desenvolvidas e através de uma evolução natural podem ser aplicadas em diferentes áreas com a mesma eficiência se forem realizadas as adaptações necessárias.

Originada em um ambiente de manufatura, a técnica de programação de produção apresenta terreno bastante fértil quando modelada adequadamente em um ambiente logístico. A área de estudo denominada de Programação Logística (*Logistics Scheduling*) proposta por esta dissertação representa uma destas evoluções. A inviabilidade de interrupção entre determinadas etapas do processo no caso logístico não é observada no caso da manufatura devido à presença de estoques intermediários, bem como o uso repetitivo de determinados recursos do sistema pelo mesmo trabalho pode ser facilmente endereçado em um sistema de manufatura através da aquisição de um novo equipamento. Porém no caso de um sistema logístico, ambas as restrições não podem ser facilmente contornadas pelo elevado custo de infraestrutura e impactam de maneira significativa a operação do sistema.

Esta técnica, ao ser aplicada no sistema portuário do canal de acesso ao porto de Santos demonstrou que uma redução de 5,5% no tempo de operação diário dos navios podem ser alcançados lançando-se mão ao uso da mesma infraestrutura já instalada no sistema. Logicamente que ganhos muito maiores podem ser alcançados com o investimento em atualização dos equipamentos dos terminais, bem como obras de significativo custo como dragagem e alargamento do canal, ou até mesmo abertura do canal pelo lado de São Vicente, tornando o mesmo um fluxo contínuo

sem a necessidade de retorno do navio, mas uma pergunta vem à tona: “Estas obras são realmente necessárias para o ganho de competitividade do sistema portuário de Santos?”, a resposta a este questionamento baseando-se no presente estudo é: “Não”.

Deve-se, obviamente, ressaltar que nenhuma ferramenta computacional tem como objetivo substituir a experiência de um analista tomador de decisão de sistemas complexos como um sistema portuário, e a ferramenta deverá dar suporte à experiência acumuladas por anos de trabalho. Mas a ferramenta proporciona a sugestão e identificação de opções operacionais bastante eficientes que pode não ser encontrada quando a busca é realizada manualmente. O sistema descrito analisou na ordem de milhares de soluções ao longo das três etapas no processo de otimização, este valor supera a capacidade de análise do homem.

Outro fator de significativo impacto no presente estudo foi o processo de tratamento de dados. Para se chegar aos tempos de navegação em cada partição, bem como os tempos de processamento, uma massa enorme de dados foi analisada utilizando diversas ferramentas estatísticas. Isto abre margem para a discussão do papel de uma analista de dados no processo de modelagem de um sistema complexo.

Ferramentas de visualização de dados, *data mining*, *big data* são temas atuais e que são fundamentais para a elaboração de um modelo. O tratamento destas bases de dados consomem um esforço computacional elevado e superiores às ferramentas tradicionais, como planilhas eletrônicas. Portanto, é importante que competências relacionadas a estudos estatísticos e programação sejam levadas em consideração para a formação de uma equipe de modelagem.

Desta forma, sugere-se a revisão das metodologias tradicionais de modelagem, nas quais o processo de aquisição e tratamento de dados é apresentado apenas como uma etapa da modelagem. Este estudo demonstrou que esta etapa é crítica para a compreensão do sistema, podendo levar ao questionamento de premissas ou observação de comportamentos imprevisíveis dos componentes do sistema.

Finalmente, o emprego de tecnologias complementares no desenvolvimento de projetos de modelagem demonstrou-se de grande valia, uma vez que as diferentes técnicas da pesquisa operacional (estatística, modelos determinísticos e estocásticos) podem cumprir seu papel de representação de um sistema com suas

características peculiares, e cumprir seu principal papel que é o auxílio na tomada de decisão.

Através dos passos descritos por este trabalho, o presente sistema pode ser expandido para a otimização dinâmica, através da incorporação dos dados de pré-otimização no processo de otimização, com a inclusão da etapa de aquisição de dados o sistema pode operar em tempo real, capturando a fila de Santos, executando a otimização e propondo uma sequência melhor que a executada.

Existem sistemas semelhantes que poderão ser modelados utilizando a mesma técnica proposta neste estudo: (1) Tubarão – ES; (2) Terminal de produtos diversos (TPD) – ES; (3) Porto de Ubu – ES; (4) Ponta da Madeira – PA.

Em termos matemáticos, existe um vasto campo de pesquisa e investigação no tocante à melhoria das heurísticas empregadas neste trabalho. Logicamente que o mesmo problema pode ser abordado através de diferentes heurísticas e ferramentas computacionais, porém a natureza do problema se mostrou facilmente tratável com as escolhas feitas por este trabalho. Assim, dentro de uma faixa de 40 navios, tanto a solução ótima determinística quanto a aproximada, heurística escolhidas foram robustas o suficiente para o problema estudado.

Finalmente, as contribuições apresentadas por este trabalho podem ser resumidamente apresentadas na Tabela 21.

Tabela 21 – Lista de contribuições (continua)

Tópico	Descrição	Contribuição
<i>flow shop x job shop</i>	Geralmente aplicado utilizando padrões industriais, no caso de serviços logísticos, raramente um processo pode ser totalmente representado utilizando um único padrão de roteiros.	A apresentação de cenários em que se é mais bem modelado por um padrão e cenários por outros levanta a discussão de que com um sistema híbrido pode-se ganhar precisão na modelagem
Viés do dono do navio	De maneira geral, a literatura apresenta problemas de roteirização ignorando as incertezas associadas às operações do cliente a receber o modal.	Uma programação de acesso às operações do cliente pode reduzir esta incerteza, por otimizar não somente os recursos do dono do navio, mas do sistema como um todo
Proposta alternativa ao FIFO	Buscando uma “justiça” na chegada dos modais ao seu ponto de operação, existe uma prática comum que é a FIFO, por julgar-se respeitar a ordem de chegada.	Ao apresentar uma regra de despacho baseada na otimização da ocupação do recurso de acesso ao ponto de operação, busca-se uma maior eficiência nas operações logísticas, garantindo que o tempo de espera seja o menor possível.
Otimização e simulação	A literatura trata dois importantes pilares da pesquisa operacional de maneira disjunta e independente (revistas específicas, conferências e trabalhos)	Ao se apresentar de maneira coordenada o uso dos dois pilares em uma única estrutura, sendo a otimização com seu papel de gerar soluções e a simulação de à testar as soluções geradas, expande-se o conceito de modelagem.
Aquisição de dados	O trabalho de modelagem apresenta tradicionalmente dificuldade em se conseguir dados precisos e adequados para incorporação aos modelos, gerando desde simplificações exageradas até interrupção na construção do modelo	O uso de ferramentas computacionais apropriadas pode romper esta limitação. Ao apresentar, neste trabalho, o uso de <i>Python</i> associado ao processo de aquisição de dados públicos pela <i>Internet</i> abre-se uma janela de oportunidades para construção de modelos mais precisos e mais realistas, incorporando-se técnicas de <i>big data</i> no contexto de modelagem matemática.

(continuação) Tabela 21 – Lista de contribuições

Tópico	Descrição	Contribuição
<i>Partial no-wait</i>	Flexibilização do conceito de continuidade aplicado à problemas de programação de produção	Ao se identificar que um sistema logístico pode apresentar características de continuidade (uma vez iniciado o percurso, não deve ser interrompido) em determinadas etapas, porém pode ser interrompido (ao termino de sua operação, pode esperar para sair do sistema) em outras etapas, expande-se o conceito de <i>no-wait</i> presente na literatura para o <i>partial no-wait</i> em que se pode tirar vantagem deste efeito para se atingir melhores programações (tanto em termos de menor <i>Makespan</i>) quanto em termos de maior realismo.

5.3. TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho, por se concentrar na modelagem experimental através da simulação poderá ter seu escopo estendido através de um estudo analítico de filas, confrontando os resultados com filas de regime M/M/m, M/G/m, ou até mesmo G/G/m para verificação e análise comparativa dos resultados.

Outro desdobramento para o presente trabalho pode ser a inclusão de uma via de retro-alimentação dos resultados do modelo de simulação, ajustando os tempos de processamento dos navios pelas partições e pelo terminal, visando criar um indicador de desvio entre o *Makespan* gerado pela otimização, e o gerado pela simulação. Sabe-se que os efeitos estocásticos irão afetar negativamente neste indicador, e o estudo das variáveis aleatórias temporais poderão ser enriquecedoras no âmbito da otimização determinística.

Referências

- AHUJA, R. K.; MAGNANTI, T. L.; ORLIN, J. B. **Network flows: theory, algorithms and applications**. [s.l: s.n.]. v. 1
- ALFREDINI, P.; ARASAKI, E. **Obras e gestão de portos e costa**. São Paulo: Editora Blucher, 2009.
- ALMAZ, O. A.; ALTIOK, T. Simulation modeling of the vessel traffic in Delaware River: Impact of deepening on port performance. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 22, p. 146–165, 2012.
- BANKS, J. et al. **Discrete-Event System Simulation**. [s.l.] Prentice Hall, 2000.
- BAZARAA, M. S.; JARVIS, J. J.; SHERALI, H. D. **Linear programming and network flows**. [s.l.] John Wiley & Sons, 2011.
- BNDES**. Disponível em: <www.bndes.gov.br>.
- BRUCKER, P.; BRUCKER, P. **Scheduling algorithms**. [s.l.] Springer, 2007. v. 3
- CASAVANT, T. L.; KUHL, J. G. A taxonomy of scheduling in general-purpose distributed computing systems. **Software Engineering, IEEE Transactions on**, v. 14, n. 2, p. 141–154, 1988.
- CHAN, F. T. S.; PRAKASH, A. Inventory management in a lateral collaborative manufacturing supply chain: a simulation study. **International Journal of Production Research**, v. 50, n. 16, p. 4670–4685, 2012.
- CHURCHMAN, C. W.; WEST, C. **The systems approach**. [s.l.] Dell New York, 1968.
- CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e simulação de eventos discretos**. [s.l.] Afonso C. Medina, 2006.
- CODESP**. Disponível em: <www.codesp.gov.br>. Acesso em: 26 dez. 2013.
- CODESP. Santos se mantem como principal porto de contêineres da América Latina**. Disponível em: <<http://www.portodesantos.com.br/pressRelease.php?idRelease=873>>. Acesso em: 28 nov. 2015.
- CRANE, B. D. Getting Started with JavaFX. **RefCardz**, n. 0076-6879 (Print), p. 1–6, 2009.
- DANTZIG, G. B.; FULKERSON, D. R. Minimizing the number of tankers to meet a fixed schedule. **Naval Research Logistics Quarterly**, v. 1, n. 3, p. 217–222, 1954.
- DASGUPTA, S.; PAPADIMITRIOU, C. H.; VAZIRANI, U. V. **Algorithms**. 2006.
- DONG, X.; HUANG, H.; CHEN, P. An improved NEH-based heuristic for the permutation flowshop problem. **Computers and Operations Research**, v. 35, n. 12, p. 3962–3968, 2008.
- EDELKAMP, S.; SCHROEDL, S. **Heuristic search: theory and applications**. [s.l.] Elsevier, 2011.
- FAGERHOLT, K.; RONEN, D. Bulk ship routing and scheduling: solving practical problems may provide better results. **Maritime Policy & Management**, v. 40, n. 1, p. 48–64, 2013.
- FONTES, D. B. M. M.; GONÇALVES, J. F. Heuristic solutions for general concave minimum cost network flow problems. **Networks**, v. 50, n. 1, p. 67–76, 2007.

FRAMINAN, J. M.; GUPTA, J. N. D.; LEISTEN, R. A review and classification of heuristics for permutation flow-shop scheduling with makespan objective. p. 1–31, 2002.

G1. **Navios esperam até 16 dias para atracar em porto do país, diz MDIC.** Disponível em: <<http://g1.globo.com/economia/noticia/2013/03/navios-esperam-ate-16-dias-para-atracar-em-porto-do-pais-diz-mdic.html>>. Acesso em: 28 nov. 2015a.

G1. **Entenda os principais pontos da MP dos Portos aprovada pelo Congresso.** Disponível em: <<http://g1.globo.com/politica/noticia/2013/05/entenda-os-principais-pontos-da-mp-dos-portos-aprovada-pelo-congresso.html>>. Acesso em: 28 nov. 2015b.

HANSEN, R. C. **Eficiência global dos equipamentos: uma poderosa ferramenta de produção/manutenção para aumento dos lucros.** Porto Alegre: Bookman, 2006.

HENDERSON, S. G. et al. **A simulation model to improve warehouse operations** Proceedings, Winter Simulation Conference. **Anais...**2012

HENTENRYCK, P. VAN; MICHEL, L. **Constraint-based local search.** [s.l.] The MIT Press, 2009.

HUNDT, R. Loop recognition in c++/java/go/scala. **Proceedings of Scala Days**, v. 2011, 2011.

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF LIGHTHOUSE AUTHORITIES AND INTERNATIONAL MARITIME PILOTS ASSOCIATION. **Approach Channels: Preliminary Guidelines.** [s.l.] Pianc, 1995.

JACKMAN, J.; DE CASTILLO, Z. G.; OLAFSSON, S. Stochastic flow shop scheduling model for the Panama Canal. **Journal of the Operational Research Society**, v. 62, n. 1, p. 69–80, 2010.

LEISERSON, C. E. et al. **Introduction to algorithms.** [s.l: s.n.].

LEUNG, J. Y.-T. **Handbook of scheduling. Algorithms, models and performance analysis.** [s.l: s.n.].

LI, X.; ZHAO, H. Greedy Algorithm Solution of Flexible Flow Shop Scheduling Problem. **International Journal of Computer Science and Network Security**, v. 9, n. 11, p. 9–12, 2009.

LIN, S. Computer solutions of the traveling salesman problem. **Bell System Technical Journal**, The, v. 44, n. 10, p. 2245–2269, 1965.

MANNE, A. S. Linear programming and sequential decisions. **Management Science**, v. 6, n. 3, p. 259–267, 1960.

MARIANO, C. H.; KURI-MORALES, A. F. Complex componential approach for redundancy allocation problem solved by simulation-optimization framework. **Journal of Intelligent Manufacturing**, p. 1–20, 2012.

MATTFELD, D. C. **Evolutionary Search and the Job Shop: Investigations on Genetic Algorithms for Production Scheduling** (Heidelberg, Germany: Physica-Verlag). 1996.

MEINDL, S. C.; OTHERS. **Supply Chain Management: Strategy, Planning, and Operation-5/E.** [s.l: s.n.].

Ministério dos Transportes. Disponível em: <<http://www.transportes.gov.br/>>.

Acesso em: 26 dez. 2013.

MORTON, T.; PENTICO, D. W. **Heuristic scheduling systems: with applications to production systems and project management**. [s.l.] John Wiley & Sons, 1993. v. 3

MOTA, D. DE O. DESENVOLVIMENTO DE APLICAÇÃO COMPUTACIONAL PARA UM PROBLEMA DE SEQUENCIAMENTO UTILIZANDO ALGORITMO BRANCH AND BOUND. 2007.

MOTA, D. DE O. et al. **Physical objects on navigation channel simulation models** Simulation Conference (WSC), 2013 Winter. **Anais...**2013Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=6721710&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D6721710>

MOTA, D. DE O. **Measuring impact of optimization in a maritime system**. Boston: [s.n.].

MOTA, D. DE O.; PEREIRA, N. N. **Impacto de Políticas de Gestão de Canal de Navegação**COPINAVAL, 2013Disponível em: <http://www.copinaval.org/venezuela/downloads/ct_04_03.pdf>

MUROVEC, B.; ŠUHEL, P. **A repairing technique for the local search of the job-shop problem**European Journal of Operational Research. **Anais...**2004

Organização Mundial do Comércio.

PAPADIMITRIOU, C. H.; STEIGLITZ, K. **Combinatorial optimization: algorithms and complexity**. [s.l.] Courier Dover Publications, 1998.

PINEDO, M. **Scheduling: theory, algorithms, and systems**. [s.l.] Springer, 2012.

PRECHELT, L. An empirical comparison of C, C++, Java, Perl, Python, Rexx and Tcl. **IEEE Computer**, v. 33, n. 10, p. 23–29, 2000.

PRESS, W. H. et al. **Numerical Recipes (Cambridge**Cambridge Univ. Press, , 1992.

RONEN, D. Cargo ships routing and scheduling: Survey of models and problems. **European Journal of Operational Research**, n. 4, 1983.

ROSS, S. M. **Introduction to probability models**. 10th editi ed. Los Angeles: Academic press, 2010.

SAYGIN, C.; KILIC, S. E. Integrating flexible process plans with scheduling in flexible manufacturing systems. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 15, n. 4, p. 268–280, 1999.

SUBRAMANYA, K. N. Machine Capacity Estimation in a Process Industry using Simulation Modeling--A Case Study. **International Journal of Social Sciences and Humanities**, v. 1, n. 1, p. 8–12, 2012.

TAILLARD, E. **Benchmarks for basic scheduling problems**European Journal of Operational Research, 1993.

TAVAKKOLI-MOGHADDAM, R. et al. A hybrid method for solving stochastic job shop scheduling problems. **Applied Mathematics and Computation**, v. 170, n. 1, p. 185–206, 2005.

VAIRAKTARAKIS, G. L.; CAI, X. **The value of processing flexibility in multipurpose machines**IEE Transactions (Institute of Industrial Engineers),

2003. Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0038588557&partnerID=40&md5=7e26894e9a65122c35980106dde504d6>>

VOLLMANN, T. E.; BERRY, W. L.; WHYBARK, C. D. Manufacturing planning and control systems. 1997.

WAGNER, H. M. An integer linear-programming model for machine scheduling. **Naval Research Logistics Quarterly**, v. 6, n. 2, p. 131–140, 1959.

WINSTON, W. L.; GOLDBERG, J. B. Operations research: applications and algorithms. 1994.

ZHANG, G.; GAO, L.; SHI, Y. An effective genetic algorithm for the flexible job-shop scheduling problem. **Expert Systems with Applications**, v. 38, n. 4, p. 3563–3573, 2011.

APÊNDICE A – Descrição e localização dos principais terminais portuários que operam no canal de Santos

(continua) Descrição dos principais terminais do porto de Santos

Tipo de terminal	Principais produtos	Nome	Descrição
Granéis Líquidos	Petróleo Químicos	Alamoia	Localizado no lado esquerdo da entrada da cidade de quem vem de SP, manuseia petróleo e derivados. Stolt e Vopak, (somente químicos).
		Dow Chemicals	Localizado na entrada do porto, na margem esquerda, quase ao lado da balsa que vai para o Guarujá. Opera carga própria
		Ilha Barnabé	Localizada em frente da Alfândega (no centro da cidade), mas do outro lado do canal do porto. Instalações estão arrendadas pela Codesp. Brasterminais e Ultra, mas ambas também só operam com químicos.
Containers	Containers	Santos Brasil	O maior deles e localizado na margem esquerda.
		Libra Terminais	O segundo maior no porto e está localizado numa área de cais contíguo que se inicia no armazém 37 (quase Ponta da Praia) e vai até o armazém 33.
		Tecondi Rodrimar	Localizados no Cais do Sabo , na entrada da cidade

(continuação) Descrição dos principais terminais do porto de Santos

Tipo de terminal	Principais produtos	Nome	Descrição
Granéis Sólidos	Grãos Açúcar	ADM	Armazém 39 na Ponta da Praia
		Dreyfus (Coimbra)	Armazém 38 (Corredor de Exportação)
		Caramurú	Na retro área do terminal da Dreyfus e se utiliza do berço do armazém 38 para atracação e carregamento de seus navios
		Cutrale	Margem esquerda / Guarujá (embarque de grãos e CPP)
		Cargill	Margem esquerda / Guarujá (embarque de grãos e CPP)
		Moinho	Armazém 30 (importação de trigo)
		Tegrão	Armazém 26 (importação de trigo)
		Rumos e outros	Terminais de açúcar localizados entre o armazém 23 e armazém 15, na parte antiga do porto (centro da cidade).
		Noble e Bunge	Armazém 12A onde a Noble exportando grãos e a Bunge descarregando trigo importado, disputam o mesmo berço de atracação (12A)

(continua) Localização dos principais terminais do porto de Santos:

Terminal	Latitude	Longitude	Obs:	Partição
11	-23.938046	-46.322308	Bunge	P3
12-A	-23.934711	-46.319346	Porto Paquetá	P3
13/14	-23.937555	-46.315076		P3
15	-23.937555	-46.315076	Rodrimar	P3
16/17	-23.944910	-46.314819		P3
19	-23.944910	-46.314819	Cosan (Rumo)	P3
20/21	-23.947385	-46.312877	Cooperçucar	P3
23	-23.947969	-46.311986	Bandeirantes	P3
22	-23.947969	-46.311986	Bandeirantes	P3
25	-23.950680	-46.312126	Passageiros	P3
29	-23.960622	-46.304798	Citrosuco	P2
29A	-23.960622	-46.304798	Citrosuco	P2
29/30	-23.960622	-46.304798	Citrosuco	P2
30	-23.960622	-46.304798	Citrosuco	P2
31	-23.964475	-46.302094		P2
31/32	-23.964475	-46.302094		P2
32	-23.967798	-46.299841	NST	P2
32/33	-23.967798	-46.299841		P2
33/34	-23.967798	-46.299841		P2
35.1	-23.9285969	-46.3325423		P4
35.2	-23.9285969	-46.3325423		P4
37.1	-23.9285969	-46.3325423		P4
37M	-23.9285969	-46.3325423		P4
38	-23.9808333	-46.2925		P1
39	-23.967257	-46.3006652		P2
AGEO	-23.9192771	-46.3345961		P4
AL 1	-23.9200715	-46.3670857		P6
AL 2	-23.9200715	-46.3670857		P6
AL 3	-23.9200715	-46.3670857		P6
AL 4	-23.9200715	-46.3670857		P6
BTP-1	-23.925646	-46.353728		P5
BTP-2	-23.925646	-46.353728		P5
BTP-3	-23.925646	-46.353728		P5
CORTE	-23.961502	-46.2961753	Santos Brasil	P2
COS 2	-23.9152314	-46.378906	Cosipa (Usiminas)	P6
COS 3	-23.9152314	-46.378906	Cosipa (Usiminas)	P6
COS 4	-23.9152314	-46.378906	Cosipa (Usiminas)	P6
COS 5	-23.9152314	-46.378906	Cosipa (Usiminas)	P6
CS 1	-23.9152314	-46.378906	Cosipa (Usiminas)	P6
CS 1/2	-23.9152314	-46.378906	Cosipa (Usiminas)	P6
CS 4	-23.9152314	-46.378906	Cosipa (Usiminas)	P6
CS2/3	-23.9152314	-46.378906	Cosipa (Usiminas)	P6
CTRL	-23.965824	-46.2903612		P2

Terminal	Latitude	Longitude	Obs:	Partição
DOW	-23.970468	-46.28817		P1
(continuação) Localização dos principais terminais do porto de Santos:				
EMB-1	-23.9236674	-46.3203023		P4
EMB-2	-23.9236674	-46.3203023		P4
EMBR.	-23.9236674	-46.3203023		P4
LARGO	-23.925072	-46.313124	Largo Santa Rita	P4
FRIG	-23.9320886	-46.3252006		P4
IB BC	-23.9192771	-46.3345961		P4
IB SP	-23.9192771	-46.3345961		P4
PCGRA	-23.9192771	-46.3345961		P4
OUT 1	-23.9192771	-46.3345961	Desconhecido	P4
OUT 2/3	-23.9192771	-46.3345961	Desconhecido	P4
SAIPEM 1	-23.9949658	-46.297759		P1
SAIPEM 2	-23.9949658	-46.297759		P1
T37	-23.9285969	-46.3325423		P4
TC	-23.925646	-46.353728		P5
TC 1	-23.925646	-46.353728		P5
TC 2	-23.925646	-46.353728		P5
TC 3	-23.925646	-46.353728		P5
TEAG	-23.9716351	-46.2822485		P1
TEG	-23.9152314	-46.378906		P6
TERMG	-23.9704296	-46.2880158		P1
TEV	-23.9589366	-46.3011544		P2
TGG	-23.965824	-46.2903612		P2
ULT	-23.9152314	-46.378906		P6
VAL	-23.925646	-46.353728		P5
BARRA	-23.9891275	-46.3331979		P0

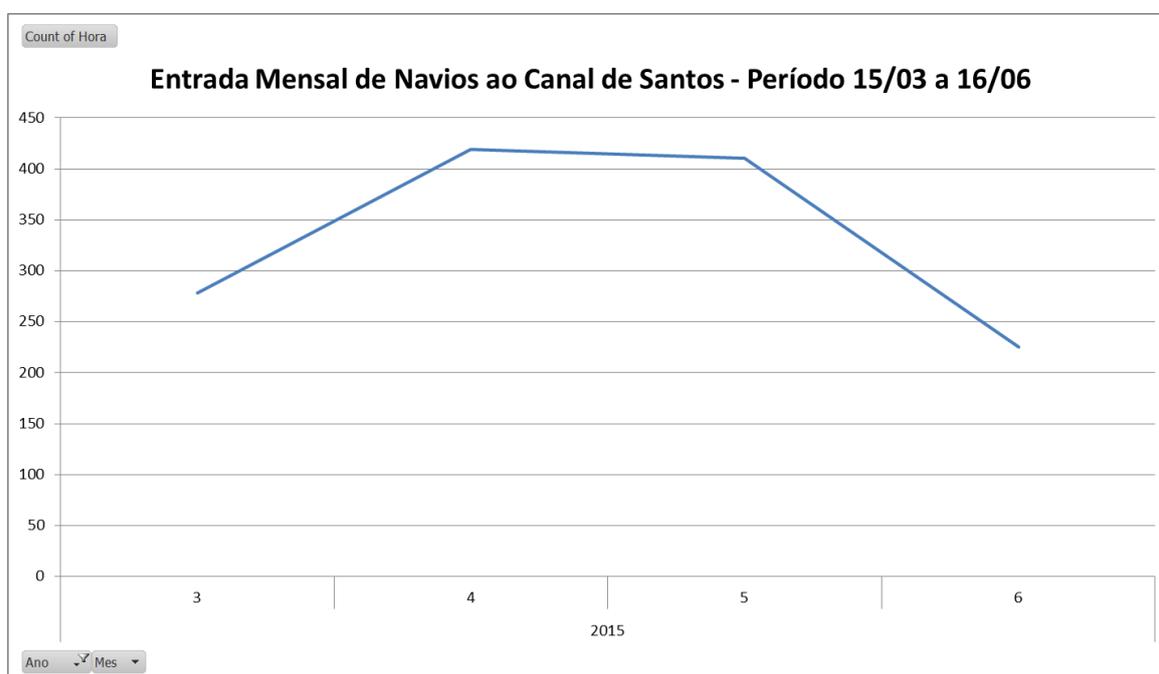
APÊNDICE B – Análise dos dados coletados para configuração dos modelos

Análises temporais

Neste grupo de análises, a variável de estudo será a de INÍCIO Manobra, uma vez que esta representa a tomada de decisão de entrada ou saída do navio. E o número de entradas ou saídas de navios será estratificado em meses, dias e horas para se analisar o sistema.

Entrada Mensal

Entrada mensal de navios ao canal de Santos – Período de 15/03 a 16/06

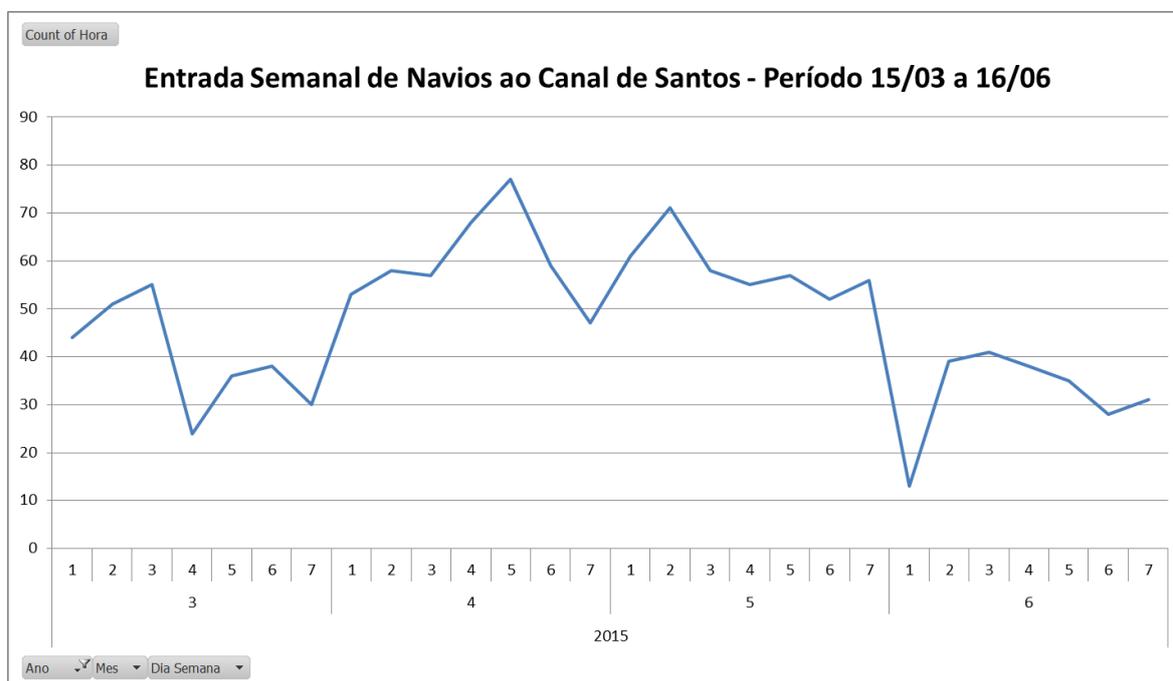


Fonte: o autor

Em relação à movimentação mensal de entrada de navios no canal de Santos, percebe-se que houve um atendimento regular de aproximadamente 400 navios por mês.

Entrada Semanal

Entrada semanal de navios ao canal de santos – Período 15/03 a 16/06

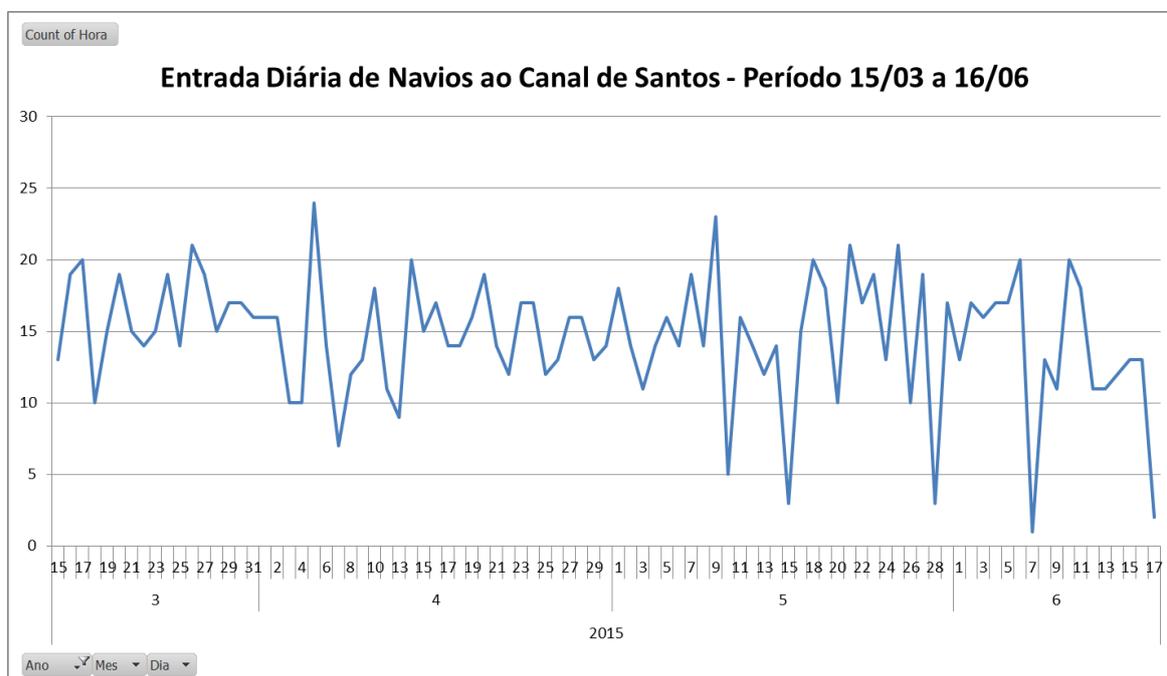


Fonte: o autor

Em relação à movimentação semanal de entrada de navios no canal de Santos, não foi observada nenhuma sazonalidade semanal em suas operações.

Entrada Diária

Entrada diária de navios ao canal de Santos – Período 15/03 a 16/06

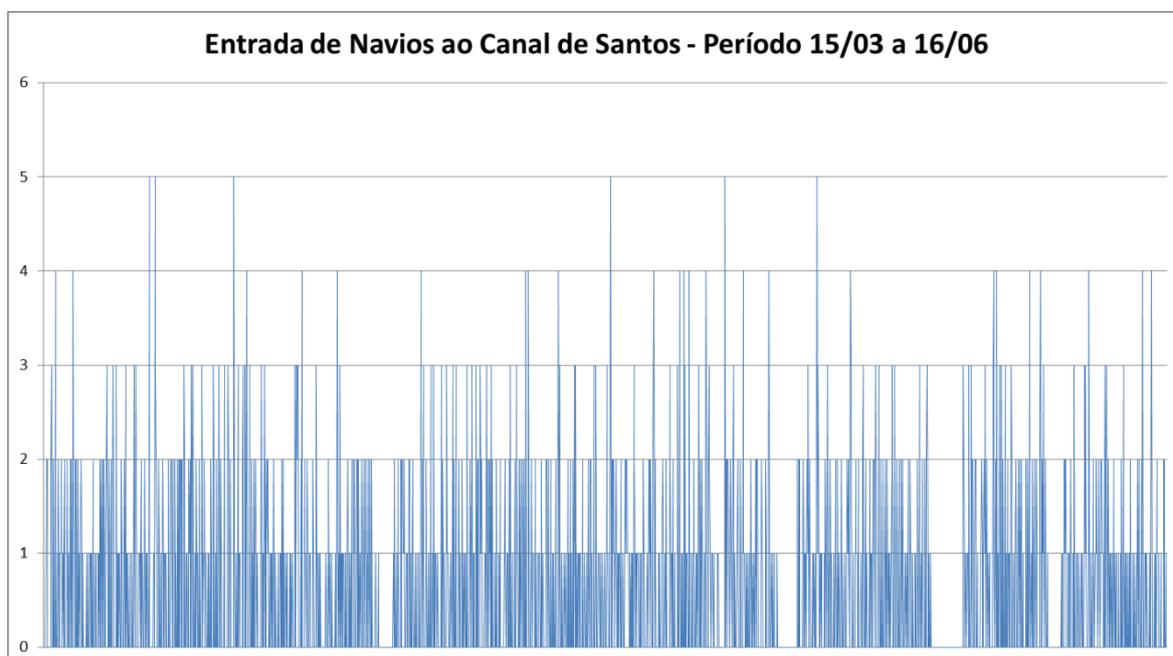


Fonte: o autor

Em relação à movimentação diária de entrada de navios no canal de Santos, percebe-se que houve o atendimento não apresenta a mesma regularidade da operação mensal, com atendimento de aproximadamente 15 navios por dia na média, porém apresentando dias em que este atendimento chega a aproximadamente 25 navios.

Entrada Horária

Entrada de navios ao canal de Santos – Período 15/06 a 16/06

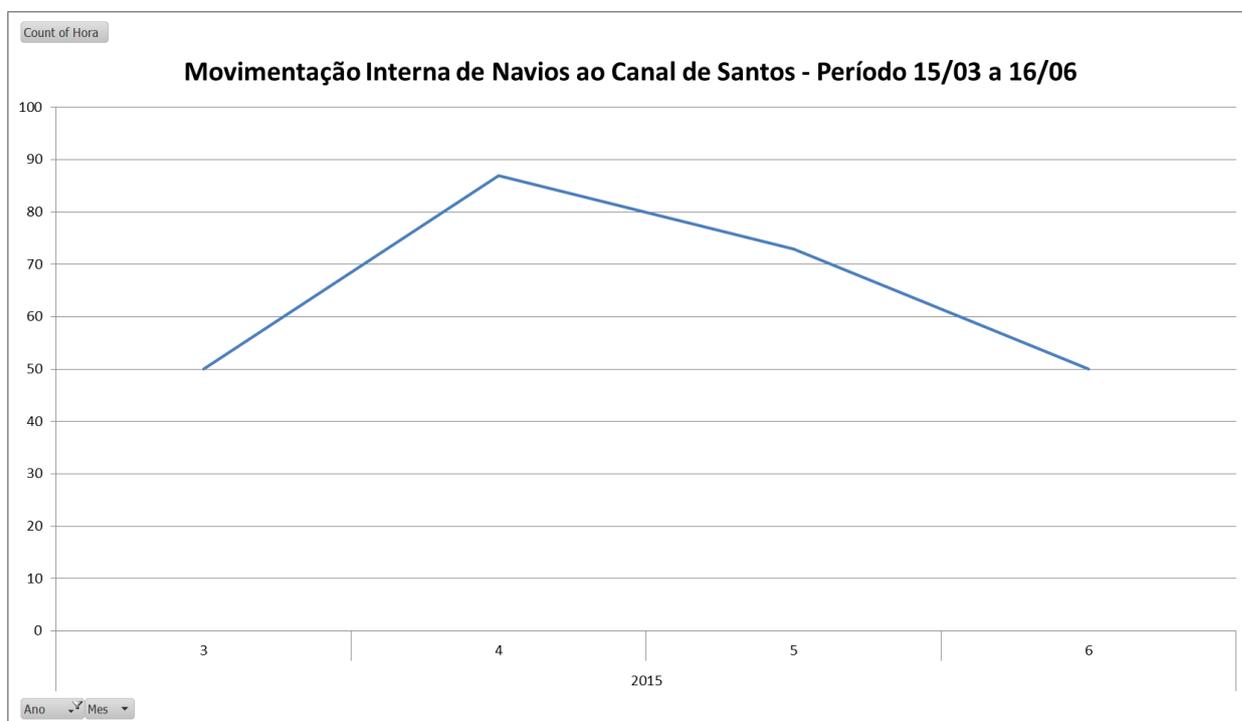


Fonte: o autor

Quando a entrada de navios é analisada com intervalo horário, percebe-se o grande impacto na variabilidade de sua operação. Embora apresente picos de 5 navios por hora, este valor é pouco frequente, sendo este valor oscilante entre 1 e 2 navios, chegando a momentos com nenhuma entrada.

Movimentação Interna Mensal

Movimentação interna de navios ao canal de Santos – Período 15/03 a 16/06

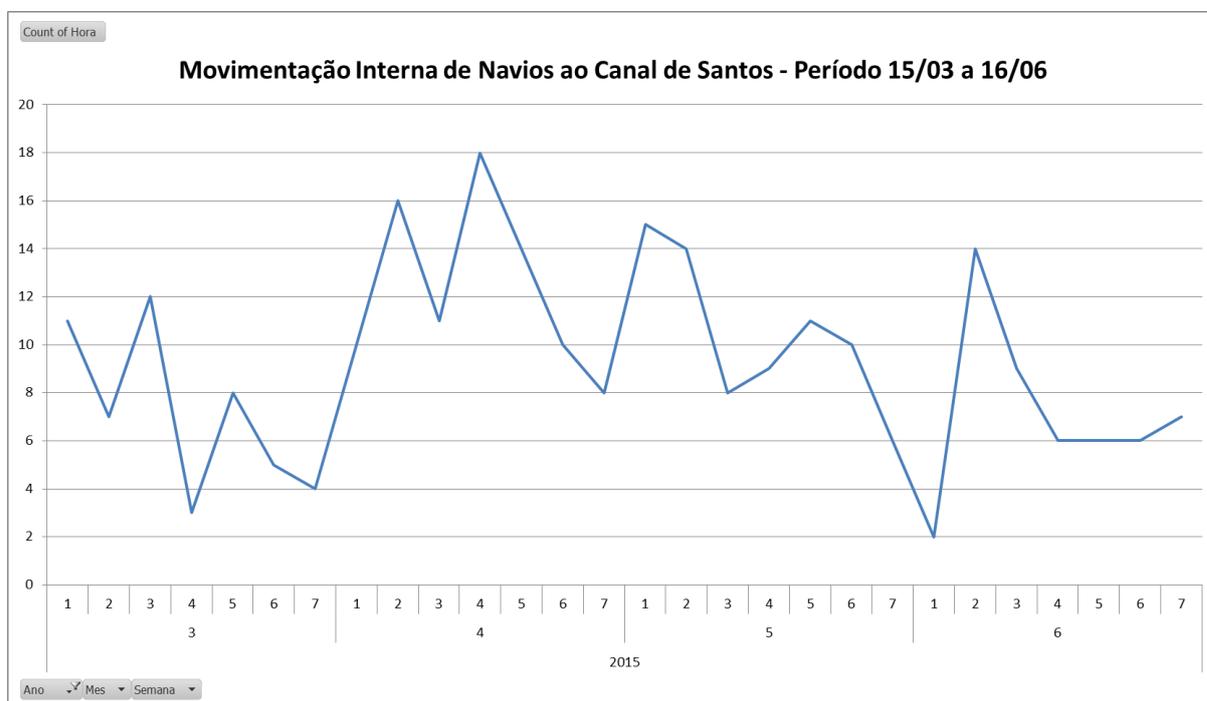


Fonte: o autor

Em relação à movimentação mensal de entrada de navios no canal de Santos, percebe-se que houve um atendimento regular de aproximadamente 400 navios por mês.

Movimentação Interna Semanal

Movimentação interna de navios ao canal de Santos – Período 15/03 a 16/06

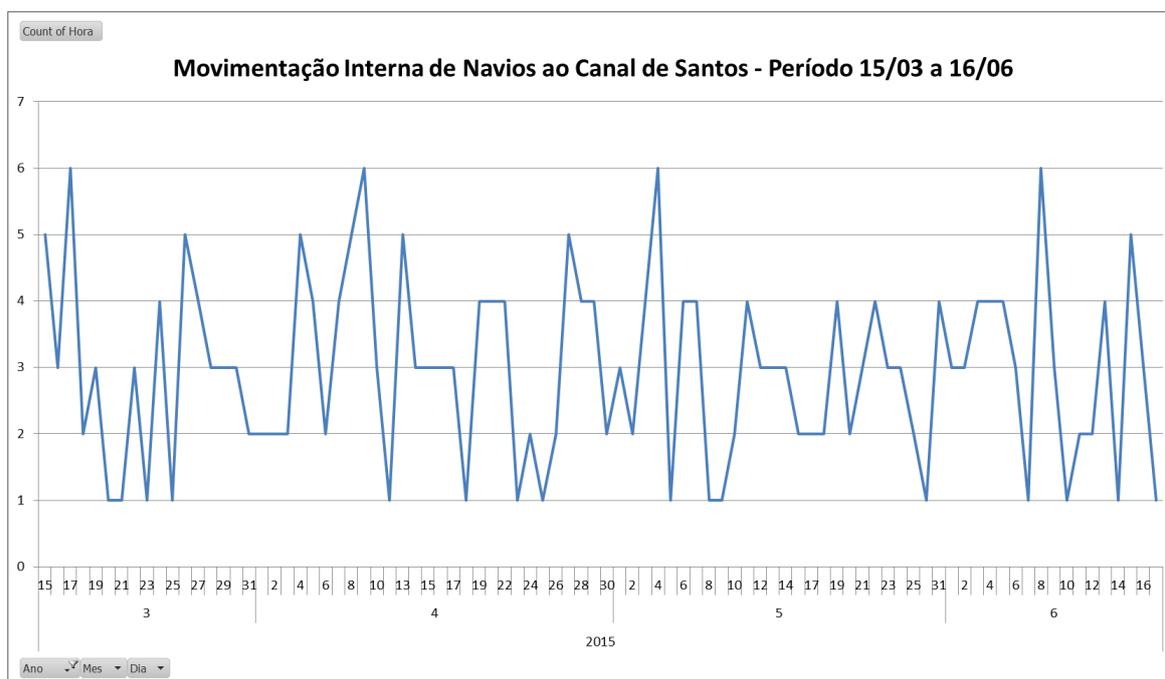


Fonte: o autor

Em relação à movimentação semanal de entrada de navios no canal de Santos, não foi observada nenhuma sazonalidade semanal em suas operações.

Movimentação Interna Diária

Movimentação interna diária do canal de Santos – Período 15/03 a 16/06

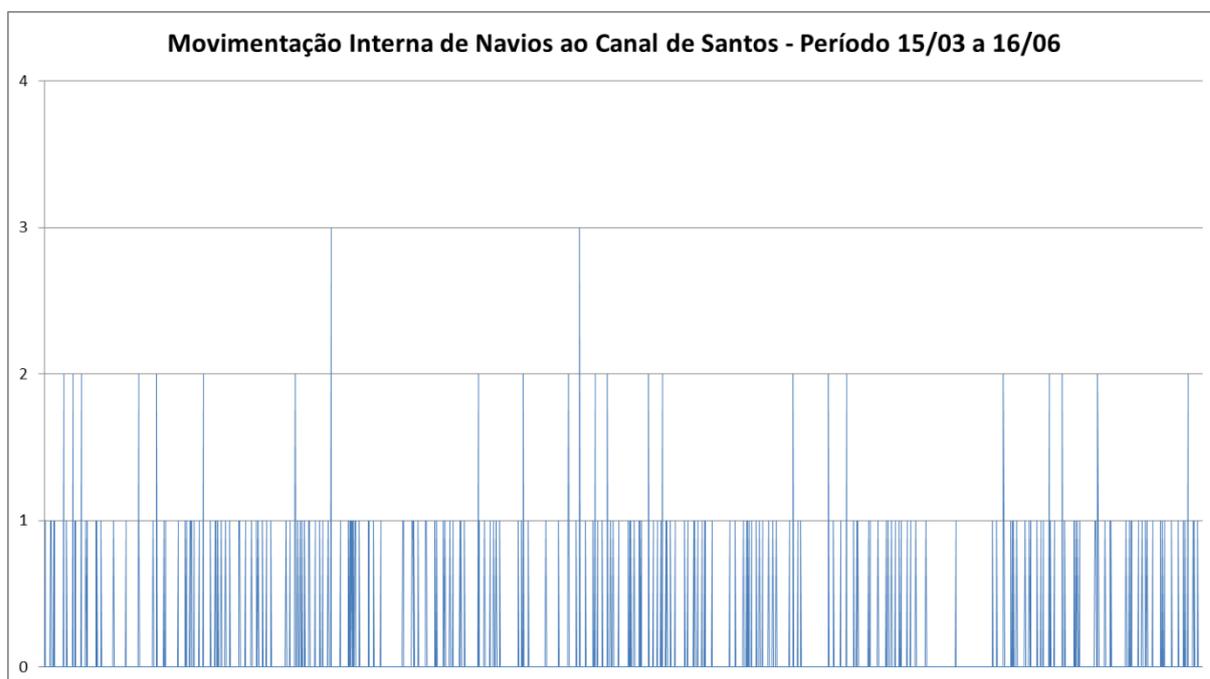


Fonte: o autor

Em relação à movimentação interna diária de navios no canal de Santos, percebe-se que houve o atendimento é inexpressivo e não apresenta grande volume e regularidade da operação diária, com atendimento médio de aproximadamente 3 navios por dia, porém apresentando dias em que este atendimento chega a aproximadamente 6 navios, não sendo relevante para o presente estudo.

Movimentação Interna Horária

Movimentação interna horária de navios ao canal de Santos – Período 15/03 a 16/06

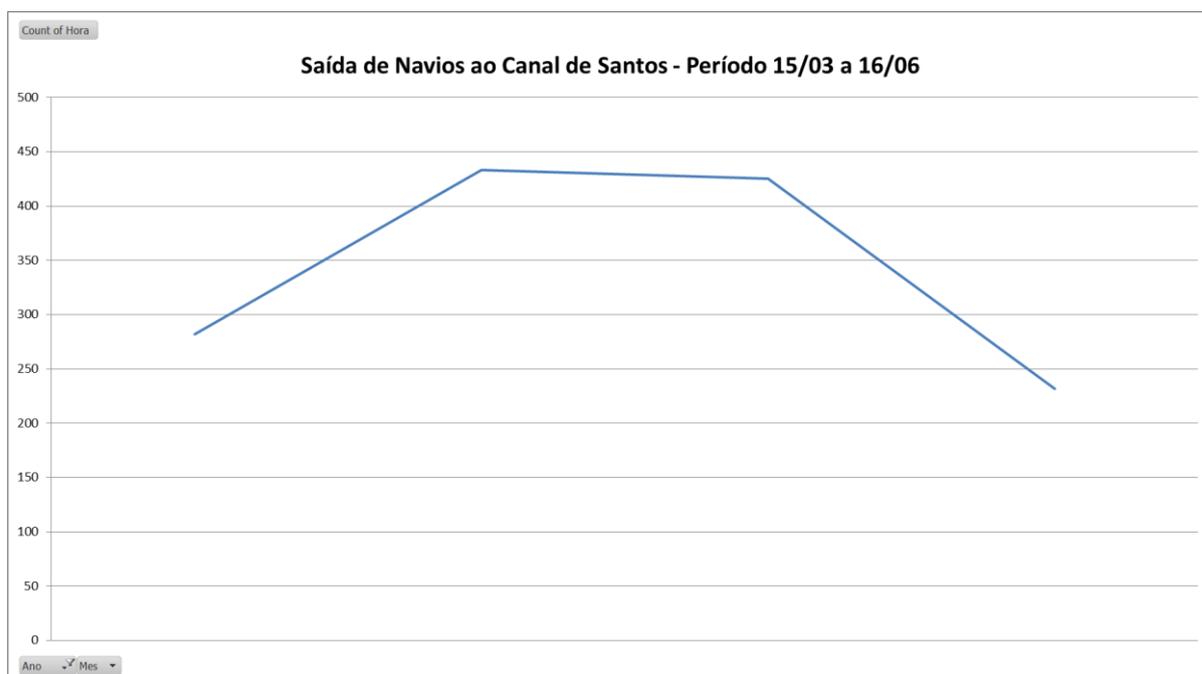


Fonte: o autor

Quando a entrada de navios é analisada com intervalo horário, percebe-se o grande impacto na variabilidade de sua operação. Embora apresente picos de 5 navios por hora, este valor é pouco frequente, sendo este valor oscilante entre 1 e 2 navios, chegando a momentos com nenhuma entrada.

Saída Mensal

Saída mensal de navios do canal de Santos – Período 15/03 a 16/06

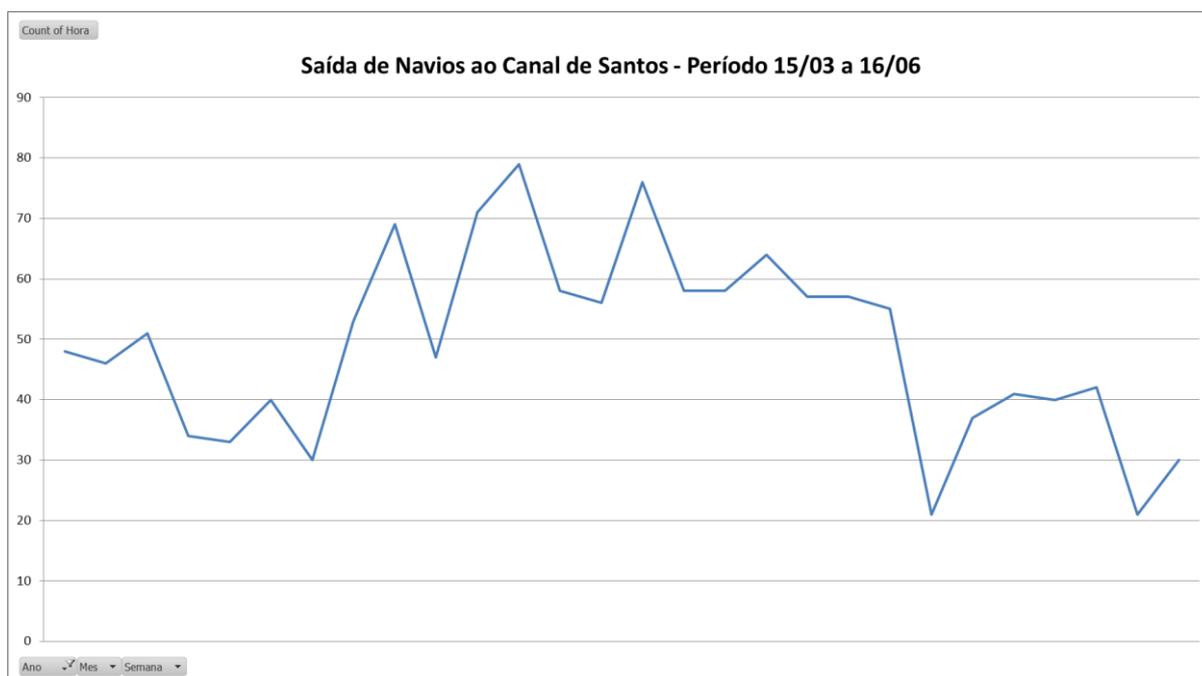


Fonte: o autor

Movimento simétrico ao da entrada, este valor embora sirva para registro, a agregação mensal não apresenta aplicação prática no presente estudo.

Saída Semanal

Saída semanal de navios do canal de Santos – Período 15/03 à 16/06

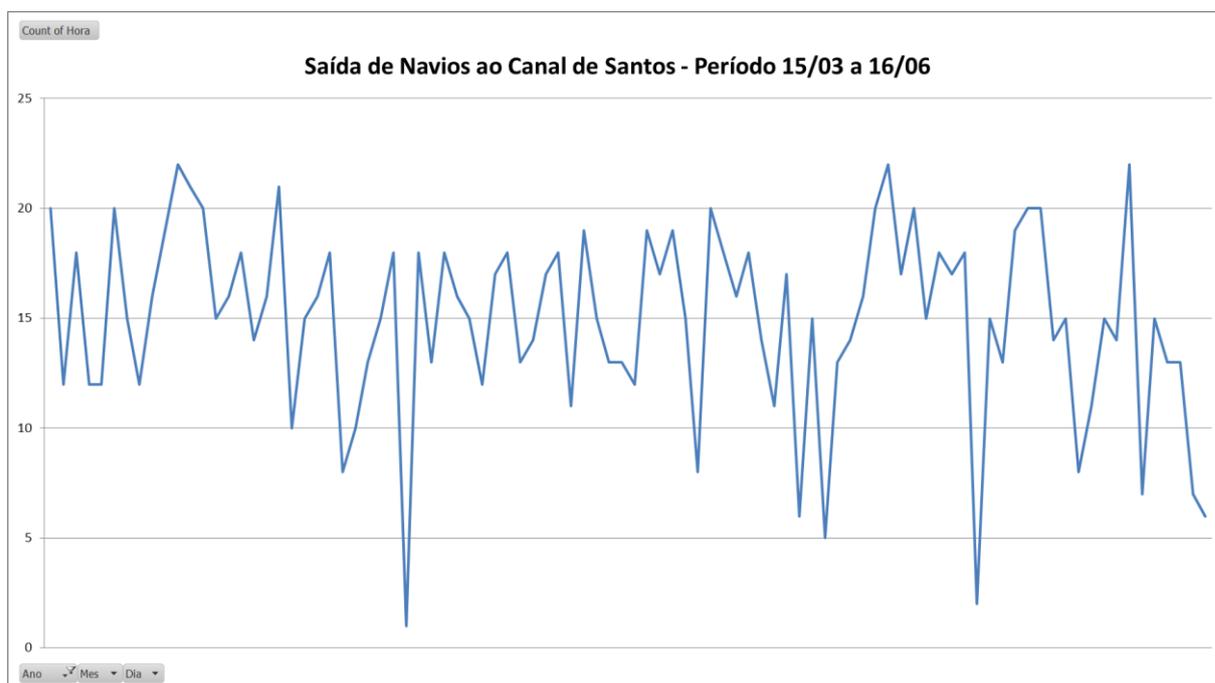


Fonte: o autor

Percebe-se a irregularidade semanal na saída de navios, quando em determinados momentos tem-se um baixo fluxo de saída (borda da curva) e outros um alto fluxo (centro da curva).

Saída Diária

Saída diária de navios do canal de Santos – Período 15/03 a 16/06

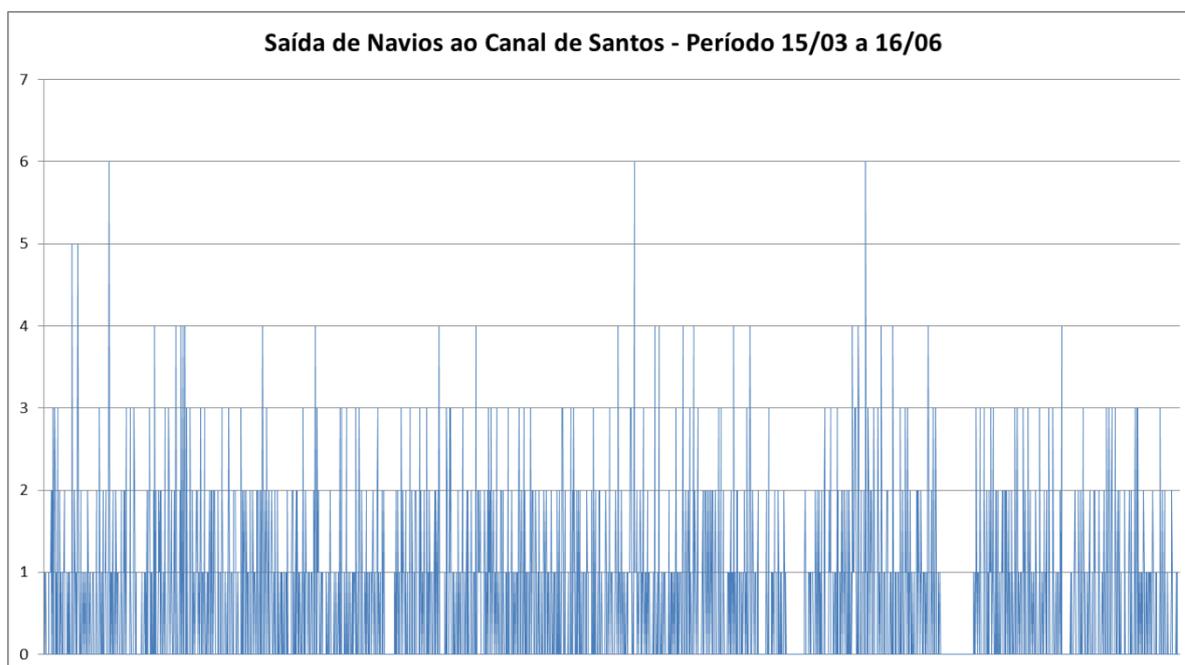


Fonte: o autor

Em relação à movimentação diária de saída de navios no canal de Santos, percebe-se que houve o atendimento de aproximadamente 15 navios por dia na média, porém apresentando dias em que este atendimento chega a aproximadamente 25 navios. Embora a saída apresente uma maior regularidade em torno da média, percebe-se momentos em que a saída fica bastante ociosa, com reduzido número de manobras desta natureza.

Saída Horária

Saída horária de navios do canal de Santos – Período 15/03 16/06



Fonte: o autor

A saída horária do canal possui valores médios entre 1 e 2 navios, porém momentos extremos levam à saída de até 6 embarcações. Este gráfico apresenta bastante relevância no presente estudo, uma vez que a programação de navios possui como objetivo indireto tornar a operação mais regular, pois a oscilação frequente na ocupação de recurso leva o mesmo à perda de eficiência e consequente mau uso. Desta forma, pretende-se com a aplicação das técnicas propostas neste trabalho uma maior suavização na frequência de saída de navios do canal, favorecida pela previsibilidade proposta pelo método descrito.

Análises operacionais

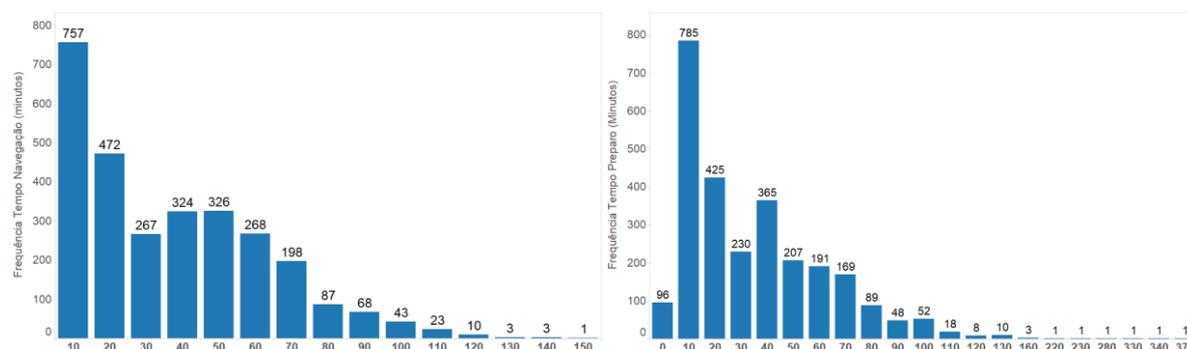
Neste grupo de análises, as variáveis de estudo serão as de (1) INÍCIO Manobra, (2) PASSAGEM CABO, e (3) FIM Manobra. A diferença entre as variáveis 2 e 1 indicam a duração da manobra com o navio navegando até o terminal de destino. Já a diferença entre 3 e 2 representam o tempo após a navegação do canal, mas ainda em preparo para seu objetivo final (atracar, ou navegar pelo oceano). Caso o navio esteja entrando no canal, este tempo representa sua pré-operação. Caso esteja saindo, o tempo representa os tramites burocrático para liberação da embarcação. Todas as análises apresentadas nesta seção tem como referência o dado INÍCIO Manobra, uma vez que é de conhecimento que o campo Marcação POB representa uma estimativa de momento em que a manobra ocorra, mas esta ocorre efetivamente no instante apresentado em INÍCIO Manobra.

A análise operacional foi realizada seguindo um nível decrescente de agregação, iniciando com análise do porto como um todo, em seguida, apresentado por tipo de movimentação e por fim, uma análise operacional por terminal.

Porto

Um histograma agregado em operações portuárias pode prover uma visão geral da variabilidade enfrentada pelo porto em suas operações.

Tempos de navegação (esquerda) e preparo em minutos (direita)



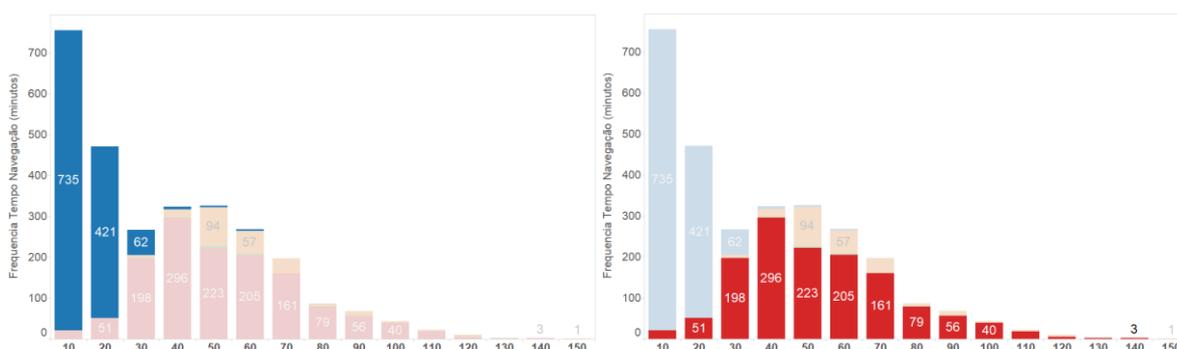
Fonte: o autor

Percebe-se, no caso de tempos de navegação, uma distribuição bimodal com alta frequência de tempos muito curto (inferiores a 10 minutos) deixando margem para dúvidas quanto ao apontamento destes dados. A segunda moda (ao redor de 50 minutos) apresenta maior consonância com a realidade vivenciada no porto de

Santos. Observação semelhante pode ser observada no histograma de preparo do navio (pré-operação).

Tipo de movimentação

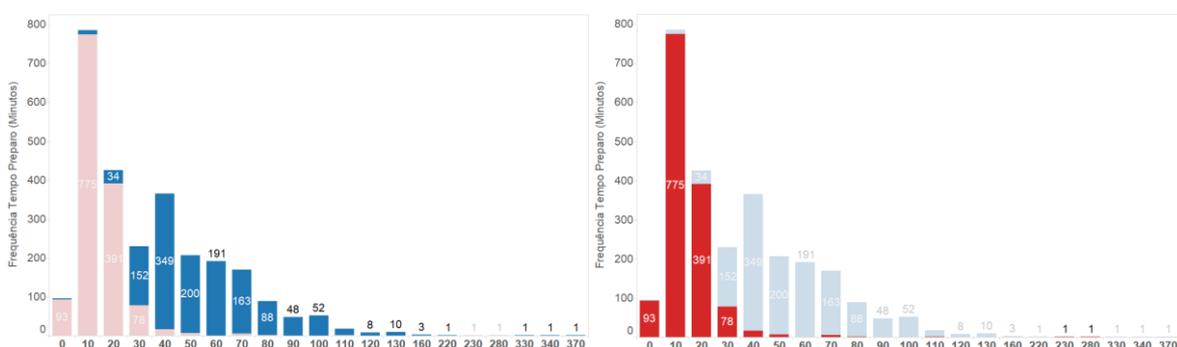
Tempo de navegação na entrada (esquerda) e saída (direita)



Fonte: o autor

Quando os dados são estratificados em seus tipos de movimentação, com destaques para o procedimento de entrada e saída, percebe-se que a entrada apresenta um comportamento exponencial e a saída um comportamento triangular. Novamente, esta diferenciação das curvas de probabilidade de aderência ao processo levanta dúvidas quanto ao seu processo de coleta. Uma vez que não existem motivos para que a navegação de entrada e saída possuam diferentes naturezas (quer seja exponencial ou triangular).

Tempo de preparo na entrada (esquerda) e saída (direita)



Fonte: o autor

Já o tempo de preparo, embora possuam médias e dispersões diferentes, ambas apresentam comportamento triangular. Esta característica está mais realista, uma

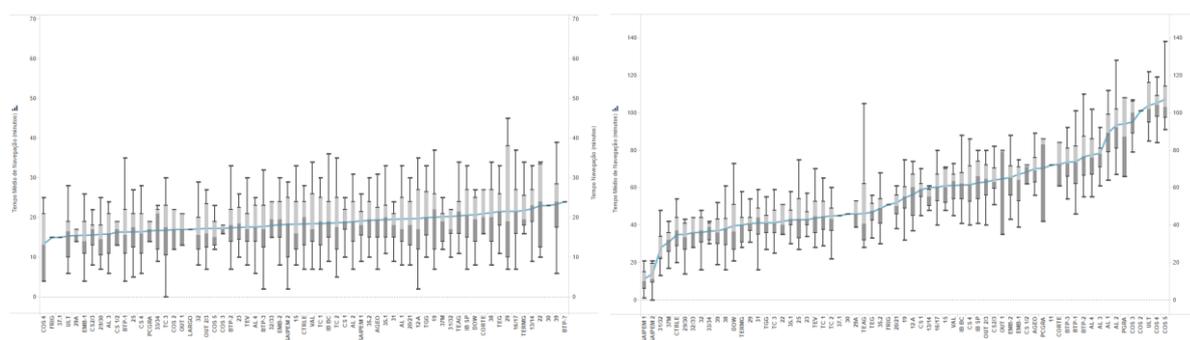
vez que os procedimentos de pré e pós-operação podem ser compostos por diferentes tipos de checagem e verificações, além de atividades burocráticas como emissão de nota fiscal e documentações.

Terminal

Ao se realizar a análise por terminal, pode ser observada (através dos dados) a distribuição dos mesmos ao longo do canal, auxiliando, desta forma, a validação dos dados de georeferência (latitude e longitude) utilizados para posicionar os terminais em determinadas partições.

Tempo de navegação

Tempo de navegação na entrada (esquerda) e saída (direita)



Fonte: o autor

Novamente, o diferente perfil dos dados causa estranheza por não se existir motivos estatísticos para que a distribuição dos dados de saída seja diferente dos dados de entrada.

Tempo de preparo

Tempo de preparo na entrada (esquerda) e saída (direita)

oportunidade em relação à outra movimentação (entrada ou saída), os números confirmam que ela não tem impacto na limitação da capacidade do porto. Porém, com o aumento da ocupação do mesmo, estas movimentações podem vir a gerar restrições operacionais e deverão ser incorporadas em estudos posteriores.

Observa-se uma grande concentração de entrada e saída de navios na região dos terminais de containers, por serem navios de operação mais rápida e que tem crescido de maneira significativa no mercado marítimo. A análise por tipo de navio está fora do escopo do presente estudo, podendo ser alvo de futuras investigações em trabalhos acadêmicos.

Estatísticas Descritivas

A análise dos dados coletados pelo procedimento descrito foi apresentada abaixo de maneira crescente de detalhamento para eventual uso futuro. Adicionalmente, eles podem ser utilizados como histórico e registro das fontes que alimentaram os modelos propostos pelo presente trabalho.

Agregada

Estatísticas descritivas

Rótulos	Contagem		Media (minutos)	
	Tempo Navegação	Tempo Pré-Operação	Tempo Navegação	Tempo Pré-Operação
Entrada (E)	1332	1332	18,5	61,0
Mov. (M) Interna	246		66,1	
Saída (S)	1370	1370	58,3	19,4

Dados de entrada dos navios, por terminal.

Entrada

(continua) Análise estatística por terminal

Row Labels	# atracções	Navegação (minutos)	Pré-Operação (Minutos)
12-A	25	19,7	60,3
13/14	13	22,2	56,7
15	14	18,4	48,5
16/17	32	21,6	51,5
19	17	20,1	64,5
20/21	35	19,7	58,1
22	4	23,0	48,2
23	16	17,5	57,2
25	25	16,4	47,7
29	9	21,6	50,1
29/30	10	15,8	47,4
29A	2	15,5	52,0

(continuação) Análise estatística por terminal

Row Labels	# atracções	Navegação (minutos)	Pré-Operação (Minutos)
30	1	23,0	37,0
31	16	19,6	42,8
31/32	7	20,3	44,7
32	14	17,1	44,1
32/33	3	18,0	42,0
33/34	8	16,7	43,9
35.1	24	19,5	41,1
35.2	33	19,3	42,7
37.1	1	15,0	45,0
37M	10	20,2	38,5
38	23	21,2	42,0
39	34	23,4	40,5
AGEO	10	19,4	65,8
AL 1	28	19,6	89,4
AL 2	42	19,0	86,7
AL 3	27	15,8	77,8
AL 4	24	17,7	85,1
BTP-?	1	24,0	76,0
BTP-1	53	16,4	79,8
BTP-2	66	17,4	82,4
BTP-3	47	17,7	74,7
CORTE	3	21,0	74,0
COS 2	2	17,0	125,5
COS 3	7	17,3	119,4
COS 4	8	13,4	114,1
COS 5	12	17,3	128,1
CS 1	21	18,8	71,6
CS 1/2	3	16,3	73,7
CS 4	27	16,4	78,2
CS2/3	20	15,6	65,7
CTRL	21	18,4	44,4
DOW	19	20,7	38,4
EMB-1	43	15,5	61,6
EMB-2	57	18,2	66,8
FRIG	1	15,0	60,0
IB BC	27	18,6	61,2
IB SP	33	20,6	67,9
LARGO	1	17,0	43,0
OUT 1	3	17,0	43,0
OUT 2/3	12	17,2	44,8
PCGRA	3	16,7	63,3
SAIPEM 1	14	19,1	29,4
SAIPEM 2	11	18,3	30,7

TC 1	34	18,5	45,6
(conclui) Análise estatística por terminal			
Row Labels	# atracções	Navegação (minutos)	Pré-Operação (Minutos)
TC 2	57	18,7	43,4
TC 3	56	16,8	47,9
TEAG	12	20,4	44,2
TEG	23	21,5	40,4
TERMG	9	21,8	41,0
TEV	42	17,6	44,4
TGG	35	20,0	50,8
ULT	22	15,4	114,8
VAL	20	18,4	67,1

Dados de movimentação interna dos navios, por terminal.

Movimentação interna

(continua) Análise estatística de movimentações internas

Origin	Destination	# atracções	Navegação (minutos)
11	15	1	60,0
11	35.2	4	57,5
11	37M	1	60,0
11	39	3	65,0
11	AL 1	9	66,1
11	AL 2	4	60,0
11	AL 4	1	60,0
11	BTP-1	4	57,5
11	BTP-2	3	56,7
11	CS 4	1	60,0
11	CS2/3	1	30,0
11	CTRLE	1	60,0
11	EMB-2	1	60,0
11	OUT 2/3	1	60,0
11	TC 1	2	55,0
11	TC 2	2	62,5
11	TEG	1	60,0
11	TGG	1	60,0
12-A	33/34	1	60,0
12-A	AL 2	1	60,0
12-A	TERMG	1	60,0
13/14	13/14	2	35,0
13/14	15	1	60,0
13/14	25	1	60,0
13/14	AL 1	1	60,0
15	16/17	1	30,0
15	31	11	62,7

Origin	Destination	# atracções	Navegação (minutos)
15	37.1	1	60,0
(continuação) Análise estatística de movimentações internas			
16/17	11	1	50,0
16/17	19	1	30,0
16/17	CS 4	1	60,0
19	11	1	30,0
19	19	1	55,0
20/21	16/17	1	60,0
23	TERMG	2	55,0
30	31	1	40,0
31	15	5	60,0
31	30	1	55,0
31/32	15	1	60,0
32	25	1	60,0
32	31	1	135,0
32/33	31	1	60,0
32/33	32/33	1	60,0
33/34	12-A	1	70,0
33/34	PCGRA	1	80,0
33/34	PGRA	1	50,0
35.1	38	1	40,0
35.2	11	2	52,5
35.2	39	1	35,0
35.2	AL 1	2	60,0
35.2	TC 2	1	60,0
35.2	TGG	1	40,0
37.1	16/17	2	70,0
37M	11	1	60,0
38	39	1	60,0
39	11	4	61,0
39	AL 1	2	60,0
39	BTP-2	1	70,0
39	EMB-2	1	60,0
AL 1	11	5	60,0
AL 1	16/17	1	60,0
AL 1	35.2	1	70,0
AL 1	AL 1	6	120,0
AL 1	BTP-2	1	60,0
AL 1	CS2/3	2	60,0
AL 1	EMB-2	1	60,0
AL 1	IB SP	1	60,0
AL 1	TC 3	1	80,0
AL 2	11	4	60,0
AL 2	39	1	70,0

AL 2	AL 2	3	70,0
AL 2	CS 4	1	45,0
(continuação) Análise estatística de movimentações internas			
Origin	Destination	# atracções	Navegação (minutos)
AL 2	IB BC	1	75,0
AL 3	33/34	1	120,0
AL 3	IB BC	1	65,0
AL 3	IB SP	1	70,0
AL 4	IB BC	1	75,0
AL 4	IB SP	1	40,0
AL 4	TC 3	1	90,0
BTP-1	11	4	57,5
BTP-1	BTP-1	1	90,0
BTP-1	TC 1	10	82,4
BTP-1	TC 2	1	60,0
BTP-1	TC 3	1	87,0
BTP-1	TEV	1	80,0
BTP-2	11	2	105,0
BTP-2	35.2	1	80,0
BTP-2	OUT 2/3	1	60,0
BTP-2	TC 2	1	60,0
BTP-3	TC 1	7	81,9
CORTE	CS 4	1	60,0
COS 2	COS 4	1	60,0
CS 1	CS 1	1	85,0
CS 1	CS2/3	1	60,0
CS 1/2	CS 1/2	1	60,0
CS 4	11	2	52,5
CS 4	35.2	1	50,0
CS2/3	11	1	60,0
CS2/3	12-A	1	40,0
CS2/3	39	1	60,0
CS2/3	CS2/3	2	45,0
CS2/3	TC 2	1	60,0
CTRL	BTP-2	1	60,0
DOW	IB BC	6	70,8
DOW	IB SP	3	75,0
EMB-1	13/14	1	60,0
EMB-1	BTP-2	1	60,0
EMB-1	TC 1	4	80,0
EMB-1	TC 2	5	76,0
EMB-1	TC 3	4	73,5
EMB-2	11	3	50,0
EMB-2	TC 2	3	76,7
EMB-2	TC 3	4	77,7

IB BC	AL 4	2	60,0
IB BC	DOW	3	70,0
IB SP	35.1	1	60,0

(continuação) Análise estatística de movimentações internas

Origin	Destination	# atracções	Navegação (minutos)
IB SP	AL 3	2	57,5
IB SP	AL 4	1	60,0
LARGO	BTP-1	1	45,0
OUT 2/3	AL 2	1	60,0
OUT 2/3	EMB-1	1	50,0
TC 1	11	2	57,5
TC 1	BTP-1	1	75,0
TC 1	BTP-2	1	60,0
TC 1	EMB-1	1	60,0
TC 1	EMB-2	4	75,0
TC 2	11	3	60,0
TC 2	16/17	1	80,0
TC 2	BTP-1	1	80,0
TC 2	EMB-1	2	70,0
TC 2	EMB-2	1	60,0
TC 3	11	1	60,0
TC 3	AL 1	1	60,0
TC 3	BTP-2	1	70,0
TC 3	BTP-3	1	58,0
TC 3	TC 1	1	50,0
TEG	11	1	60,0
TERMG	23	1	90,0
TEV	CS 1	1	60,0
TGG	11	1	60,0
TGG	39	1	50,0
VAL	VAL	1	75,0

Dados de saída dos navios, por terminal.

(continua) Análise estatística de saída

Row Labels	# atracções	Navegação (minutos)	Pré-Operação (Minutos)
11	1	72,0	18,0
12-A	24	56,3	18,9
13/14	11	60,0	16,0
15	13	61,1	18,9
16/17	38	60,3	18,0
19	21	54,7	20,4
20/21	35	51,9	21,2
22	3	42,0	21,3

23	17	42,9	20,1
25	28	42,8	17,9
29	10	40,9	20,1
29/30	10	35,0	23,5

(continuação) Análise estatística de saída

Row Labels	# atracções	Navegação (minutos)	Pré-Operação (Minutos)
29A	2	46,0	26,5
30	1	46,0	19,0
31	19	41,1	20,2
31/32	5	28,0	31,0
32	11	36,1	23,5
32/33	2	36,0	24,0
33/34	6	115,7	59,7
35.1	22	42,7	18,5
35.2	31	49,0	21,0
37.1	1	45,0	15,0
37M	9	31,0	22,3
38	21	38,1	22,7
39	33	36,9	22,8
AGEO	10	70,2	15,3
AL 1	30	89,2	18,4
AL 2	42	93,5	19,0
AL 3	26	78,3	17,1
AL 4	26	77,6	16,7
BTP-1	47	73,8	18,4
BTP-2	70	76,4	18,2
BTP-3	45	73,6	19,4
CORTE	2	72,5	17,5
COS 2	1	101,0	19,0
COS 3	8	95,1	50,5
COS 4	10	105,2	17,1
COS 5	14	107,2	18,4
CS 1	19	59,0	18,9
CS 1/2	3	68,3	19,0
CS 4	29	61,6	16,3
CS2/3	21	64,1	16,4
CTRLE	22	35,0	22,5
DOW	10	39,7	20,3
EMB-1	39	67,1	15,8
EMB-2	57	65,5	17,2
FRIG	1	51,0	9,0
IB BC	31	61,4	17,0
IB SP	35	62,6	16,4
OUT 1	3	64,7	15,3
OUT 2/3	12	63,0	17,4

PCGRA	3	70,3	9,7
PGRA	3	94,0	7,7
SAIPEM 1	15	11,3	31,2
SAIPEM 2	10	14,0	30,0
TC 1	51	44,4	18,4

(conclusão) Análise estatística de saída

Row Labels	# atracções	Navegação (minutos)	Pré-Operação (Minutos)
TC 2	67	45,0	19,5
TC 3	65	41,3	20,3
TEAG	13	46,2	20,0
TEG	23	47,0	19,9
TERMG	12	40,0	18,2
TEV	44	43,7	18,8
TGG	35	41,1	20,5
ULT	22	103,9	17,5
VAL	20	61,1	16,4