

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA
E TECNOLOGIA FLUMINENSE**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS APLICADOS À
ENGENHARIA E GESTÃO**

Rodrigo Gross Ferreira

**ALGORITMO GENÉTICO APLICADO À OTIMIZAÇÃO DO PLANEJAMENTO DE
ATRACAÇÃO DE NAVIOS EM CAIS CONTÍNUOS COM RESTRIÇÕES DE MARÉ**

Campos dos Goytacazes / RJ

2023

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA
E TECNOLOGIA FLUMINENSE**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS APLICADOS À ENGENHARIA E
GESTÃO**

Rodrigo Gross Ferreira

**ALGORITMO GENÉTICO APLICADO À OTIMIZAÇÃO DO PLANEJAMENTO DE
ATRACAÇÃO DE NAVIOS EM CAIS CONTÍNUOS COM RESTRIÇÕES DE MARÉ**

Prof. Dr. Frederico Galaxe Paes

(Orientador)

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, no Curso de Mestrado Profissional em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão (MPSAEG), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão.

Campos dos Goytacazes / RJ

2023

Biblioteca
CIP - Catalogação na Publicação

F383 Ferreira, Rodrigo Gross
ALGORITMO GENÉTICO APLICADO À OTIMIZAÇÃO DO
PLANEJAMENTO DE ATRACAÇÃO DE NAVIOS EM CAIS
CONTÍNUOS COM RESTRIÇÕES DE MARÉ / Rodrigo Gross
Ferreira -2023.
84 f.: il. color.

Orientador: Frederico Galaxe Paes

Dissertação (mestrado) -- Instituto Federal de Educação, Ciência
e Tecnologia Fluminense, Campus Campos Centro, Curso de
Mestrado Profissional em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão,
Anton Dakitsch, RJ, 2023.

Referências: f. 76 a 80.

1. Problema de Alocação de Berços Contínuo (PABC). 2.
Otimização Combinatória. 3. Planejamento de Embarque. 4.
Algoritmos Genéticos. I. Paes, Frederico Galaxe, orient. II. Título.

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA FLUMINENSE

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS APLICADOS À
ENGENHARIA E GESTÃO

Rodrigo Gross Ferreira

ALGORITMO GENÉTICO APLICADO À OTIMIZAÇÃO DO PLANEJAMENTO
DE ATRACAÇÃO DE NAVIOS EM CAIS CONTÍNUOS COM RESTRIÇÕES DE
MARÉ

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, no Curso de Mestrado Profissional em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão (MPSAEG), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão.

Aprovado em 31 de julho de 2023.

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 FREDERICO GALAXE PAES
Data: 03/08/2023 15:35:21-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Frederico Galaxe Paes, Doutor em Engenharia de Produção pela UFF
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense

(Orientador)

Documento assinado digitalmente
 MILTON ERTHAL JUNIOR
Data: 03/08/2023 16:57:33-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Milton Erthal Junior, Doutor em Produção Vegetal pela UENF Instituto
Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense

Documento assinado digitalmente
 CARLOS LEONARDO RAMOS POVOA
Data: 03/08/2023 18:01:03-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Carlos Leonardo Ramos Povoá, Doutor em Ciências de Engenharia pela UENF
Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro

Documento assinado digitalmente
 MARCOS COSTA ROBOREDO
Data: 03/08/2023 18:07:43-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Marcos Costa Roboredo, Doutor em Engenharia de Produção pela UFF
Universidade Federal Fluminense

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação a minha esposa e meu filho, cujo apoio inabalável me impulsionaram a superar os desafios constantes em minha jornada acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a Deus, pois ele me deu a saúde, sabedoria e força necessária para superar todas as adversidades dessa jornada, colocando as pessoas certas em meu caminho que fizeram toda a diferença no processo de construção do conhecimento.

Agradeço meus queridos pais, que se sacrificaram, se dedicaram, abdicaram de projetos pessoais para que seus filhos tivessem a oportunidade de estudar. Vocês foram o início de tudo e jamais alcançaria o que alcancei sem esse apoio!

Expresso minha gratidão a minha esposa por me estimular a manter-se firme em momentos difíceis e jamais me deixar sair do meu objetivo. A meu filho que é minha motivação de sempre querer me doar ao máximo e ser exemplo perseverança.

Agradeço especialmente a meu orientador Dr. Frederico Galaxe Paes, pela confiança e todas as contribuições cujo a dedicação, paciência e aconselhamentos foram importantes para tornar tudo possível.

Aos professores que fizeram parte de toda minha formação até os dias atuais e amigos que contribuíram para o meu crescimento transmitindo conhecimento e oportunidades de explorar a troca de experiências.

Meu agradecimento se estende aos integrantes da banca por dedicarem a atenção e contribuírem com o valioso conhecimento.

A todos, meu profundo agradecimento.

RESUMO

A logística portuária desempenha um papel importante no desenvolvimento econômico, sendo necessário métodos que explorem os recursos disponíveis de forma eficiente. Assim, a eficiência portuária requer a resolução do conhecido Problema de Alocação de Berços Contínuo (PABC), em particular, o Problema de Alocação de Berços Contínuo com Restrições de Maré (PABCRM), principal objeto de estudo desse trabalho. Devido às suas características, esse problema é classificado como NP-Difícil, reduzindo a possibilidade de encontrar solução ótima em um tempo computacional aceitável a partir de um determinado tamanho do problema. O PABCRM consiste em realizar a atracação de n navios em um cais contínuo de comprimento S , em um horizonte de tempo T , sujeitos a restrições de maré, onde cada navio tem uma data de chegada definida ao porto. O objetivo é maximizar a receita obtida pela diferença entre o prêmio total recebido e as multas pagas pelo porto. Inicialmente, foram desenvolvidos um modelo de Programação Linear Inteiro Misto (PLIM) e um método heurístico usando Algoritmo Genético para o PABC, onde se buscou comparar a performance dos métodos aplicado ao problema. A partir desses resultados, foi desenvolvido um Algoritmo Genético para o PABCRM que se mostrou eficiente na resolução de instâncias do problema, principalmente nas de grande porte. Para a alocação dos navios foi usado um processo conhecido como espaços máximo vazios (EMV). O método exato não foi capaz de resolver instâncias maiores do problema, enquanto a abordagem heurística obteve a solução ótima em instâncias de pequeno e médio porte e soluções com gaps inferiores a 3% nas de grande porte. Todas as abordagens foram aplicadas em um cenário real, no contexto de um complexo portuário, a fim de testar a eficácia e a viabilidade da solução proposta.

Palavras-chave: Problema de Alocação de Berços Contínuo (PABC), Otimização Combinatória, Planejamento de Embarque, Algoritmos Genéticos.

ABSTRACT

Port logistics plays an important role in economic development, being necessary methods to efficiently exploit available resources. Thus, port efficiency requires the resolution of the well-known Continuous Berth Allocation Problem (PABC), in particular, the Continuous Berth Allocation Problem with Tidal Restrictions (PABCRM), the main object of study of this work. Due to its characteristics, this problem is classified as NP-Hard, facilitating the possibility of finding an ideal solution in an acceptable computational time from a given problem size. PABCRM consists of attracting ships to a continuous pier of length S , in a time horizon T , subject to tidal restrictions, where each ship has a defined arrival date at the port. The objective is to maximize the revenue obtained from the difference between the total premium received and the fines paid by the port. Initially, a Mixed Integer Linear Programming model (PLIM) and a heuristic method using Genetic Algorithm were developed for PABC, where we sought to compare the performance of the methods applied to the problem. Based on these results, a Genetic Algorithm was developed for PABCRM, which proved to be efficient in resolving instances of the problem, especially large ones. A process known as maximum empty space (EMV) was used to allocate ships. The exact method was not able to solve larger instances of the problem, while the heuristic approach obtained the optimal solution in small and medium port instances and solutions with gaps of less than 3% in large ones. All approaches were applied in a real scenario, in the context of a port complex, in order to test the effectiveness and solution of the proposed solution.

Keywords: Continuous Berth Allocation Problem (CBAP), Combinatorial Optimization, Shipment Planning, Genetic Algorithms.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais mercadorias movimentadas.....	20
Figura 2 - Interação de navios com trecho a navegar.....	22
Figura 3 - Ciclo de uma maré.....	23
Figura 4 - Dimensões horizontais e verticais do navio.....	26
Figura 5 - Utilização prática do período de layday.....	28
Figura 6 - Tempos operacionais.....	30
Figura 7 - Fluxograma de pagamento de multas e recebimento de prêmios.....	30
Figura 8 - Linha do tempo do desenvolvimento portuário.....	31
Figura 9 - Layout do complexo portuário.....	32
Figura 10 - Diagrama de etapas da pesquisa.....	34
Figura 11 - Cenário típico do PAB.....	42
Figura 12 - Representação do PAB com restrições espaciais.....	43
Figura 13 - Diagrama de tempo-espço bidimensional.....	44
Figura 14 - Representação gráfica do EMV.....	50
Figura 15 - Composição dos EMV's no plano.....	50
Figura 16 - Criação dos espaços máximos vazios iniciais após a inserção do primeiro navio...51	51
Figura 17 - Exemplo do mecanismo de perturbação do cromossomo com $\alpha = 5$	54
Figura 18 - Exemplo do position-based crossover (PX).....	56
Figura 19 - Operador de mutação.....	57
Figura 20 - Diagrama de tempo-espço bidimensional.....	59
Figura 21 - Representação gráfica do planejamento de atracções otimizadas.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características da instância proposta.....	37
Tabela 2 - Análise de sensibilidade dos parâmetros.....	67
Tabela 3 - Resultados CPLEX, GA-PABC e PABCRM de dados históricos.....	67
Tabela 4 - Resultados CPLEX, GA-PAB e PABRM de dados ajustados.....	69
Tabela 5 - Tempos utilizando o <i>CutLo</i>	70
Tabela 6 - Gaps entre a expansão do cais.....	73

SIGLAS

AG - Algoritmos Genéticos

ANTAQ - Agência Nacional de Transportes Aquaviários.

BKS - *Best Known Solution NBKS*

DP - *Difference Process*

EMV - Espaço Máximo Vazio

ETA - *Estimated Time of Arrival*

FO - Função Objetivo

GLP - Gás Liquefeito de Petróleo

GNL - Gás Natural Liquefeito

IDE - *Integrated Development Environment*

LCR - Lista de Candidatos Restrita

LOA - *Length Overall*

PAB - Problema de Alocação de Berços.

PABC - Problema de Alocação de Berços Contínuo

PABRM - Problema de Alocação de Berços Contínuos com Maré

PLIM - Programação Linear Inteira Mista

PMIS - *Port Managment Information System*

PX - *Position-Based Crossover*

UNCTAD - *United Nations Conference of Trade and Development.*

VTS - *Vessel Traffic Service*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. Justificativa da pesquisa	16
1.2. Objetivos	17
1.2.1. Objetivos gerais	17
1.2.2. Objetivos específicos	17
1.3. Organização do trabalho	17
2. REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1. Os Terminais portuários	19
2.2. Administração portuária	20
2.3. Condições de maré e atracação	22
2.4. Classificação dos navios	23
2.5. Características dos navios	25
2.6. Negociações de contratos de afretamento (Charter Party)	26
2.6.1. Períodos de atracação e operação	27
2.6.2. Prêmios e multas operacionais	29
2.7. Complexo portuário estudado	31
3. METODOLOGIA	33
3.1. Classificação da pesquisa	33
3.2. Etapas desenvolvidas	34
3.2.1. Definição do problema	34
3.2.2. Elaboração do modelo	35
3.2.3. Implementação do modelo	35
3.2.4. Elaboração das instâncias.....	36
3.2.5. Aplicação do modelo.....	38
3.2.5.1. Experimentos computacionais.....	38
3.2.6. Procedimento técnico.....	39

3.2.7. Demanda da pesquisa	40
4. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE BERÇOS CONTÍNUO (PABC) E ESTRATÉGIAS DE SOLUÇÃO	41
4.1. Apresentação do problema de alocação de berços contínuos (PABC)	41
4.2. Método exato	44
4.3. Modelo matemático proposto	45
□ Conjuntos:	45
□ Parâmetros:	45
□ Variáveis:	46
4.4. Algoritmo Genético proposto para o PABC	48
4.4.1. Solução heurística	48
4.4.2. Processo de alocação de navios nos espaços máximo vazios – EMV	49
4.4.3. População inicial P(0)	53
4.4.4. Seleção e Crossover	54
4.4.5. Operador de mutação	56
4.4.6. Diversidade adaptativa	57
4.5. Problema de Alocação de Berços Contínuo com Restrições de Maré PABCRM.....	58
4.5.1. Algoritmo de construção do PABCRM	60
4.5.2. Busca local	62
4.5.3. Pseudocódigo do AG para o PABCRM	64
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	66
5.1. Análise de sensibilidade	66
5.2. Análise dos resultados	67
5.3. Avaliação das instâncias ajustadas	68
5.4. Comparação entre as heurísticas	71
5.5. Avaliação da influência do aumento do cais	72
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	75

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	76
----------------------------------------	-----------

1. INTRODUÇÃO

A logística portuária desempenha importante influência no desenvolvimento de estratégias econômicas, consolidando o setor no cenário do comércio internacional. A competitividade exige do sistema logístico eficiência operacional, reduzindo custos e melhorando o nível dos serviços, gerando perspectivas positivas essenciais para o progresso econômico e social (LEÓN et al., 2021). O desempenho portuário é algo importante com impacto em vários aspectos da cadeia de transportes marítimos, afetando diretamente na disponibilidade de recursos operacionais o que influencia diretamente em acordos comerciais e cláusulas contratuais (BOUZEKI *et al.*, 2021). Segundo Silva e Coelho (2007), os gerentes portuários buscam redução nos custos através da utilização eficiente dos recursos disponíveis, incluindo equipamentos e berços de atracação.

As limitações dos recursos nos terminais marítimos têm impactos direto e relevante na produtividade e conseqüentemente na competitividade. Dessa forma, é exigido aos terminais o uso de métodos que explorem de forma eficiente os recursos disponíveis com uma abordagem confiável e que forneça resultados aceitáveis que permitam maior eficiência (KRAMER *et al.*, 2019). Conforme Wang *et al.*, (2013) a busca por diminuir o tempo de espera e atendimento operacional motivou o seguimento em relação ao Problema de Alocação de Berços - PAB (do inglês *Berth Allocation Problema* - BAP), onde a alocação de navios em posições de atracação é escalonada adequadamente minimizando o tempo de permanência.

A ocorrência do problema de alocação de berços em vários cenários da operação portuária, consiste em atribuir navios em posições disponíveis ao longo do cais em berços de forma a otimizar a estadia das embarcações dentro de um horizonte de planejamento, diminuindo os custos atrelado ao tempo de atendimento (CORDEAU *et al.*, 2005; BARROS *et al.*, 2011).

Segundo Garey e Johnson (2009) o PAB é um problema classificado dentro da área da Pesquisa Operacional como NP-difícil, onde não se conhecem algoritmos polinomiais para a solução. Esse problema tem sido relacionado com o problema de corte bidirecional (IMAI *et al.*, 2005), que está contido dentro da classe de problemas NP-difícil.

Como aponta Ávila (2002) existem muitos métodos de otimização para alcançar melhores resultados para determinados tipos de problemas e a escolha do método está diretamente ligada às características que o problema apresenta, em particular o comportamento da função que o representa que muitas vezes é de difícil determinação.

Um método exato pode ser um algoritmo ou uma fórmula que permite obter uma solução ótima para um problema, sem a necessidade de estimativas ou aproximações. Já os Algoritmos Genéticos (GA) fazem parte dos métodos heurísticos utilizados para encontrar soluções próximas das ótimas em um tempo computacional aceitável para problemas em que não existe solução ótima conhecida (GOUVEIA *et al.*, 2021). De acordo com Filitto (2008) o processo é inspirado na evolução natural, onde é procurado a melhor solução para um determinado problema, utilizando-se a busca em uma população inicial combinando os melhores fatores e gerando as soluções.

O planejamento da alocação dos navios tem muitas restrições físicas e técnicas fazendo com que no aspecto espacial possa ser modelado de diferentes formas, podendo ser discreto ou contínuo (IMAI *et al.*, 2005). Conforme Oliveira *et al.* (2012), o problema é discreto quando o cais é dividido fisicamente em vários berços, delimitando o espaço de atracação. O contínuo, conhecido como Problema de Alocação de Berços Contínuo – PABC, não tem divisões físicas, permitindo que os navios atraquem em quaisquer posições. Deve ser levado em conta que a chegada dos navios pode ter o tratamento de forma estática, onde é assumido que todos os navios estão na barrada fundeados prontos para o atendimento ou de forma dinâmica permitindo aos navios a chegada a qualquer momento.

O que se propõe neste trabalho é um algoritmo genético para otimização do PABC, com foco principal em portos de carga geral, de forma a gerar uma sequência otimizada de atracação de navios, visando aumentar os resultados financeiros aumentando a eficiência das operações maximizando os prêmios recebidos pelo porto.

1.1. Justificativa da pesquisa

Conforme Pedreira (Pedreira, 2006), o transporte marítimo contribui em grande parte para o comércio global, impulsionando o protagonismo no cenário logístico e o desempenho do desenvolvimento econômico, demonstrando sua grande importância e sua capacidade de atrair diversas pesquisas relacionadas ao tema.

O transporte marítimo sofreu com impactos e reflexos causados pela pandemia gerando gargalos logísticos e custos crescente, as restrições levou a escassez de equipamentos, e gerou portos congestionados e tempos de espera e permanência mais longos. Durante 2020 a entrega de novos navios caíram 12% devido a redução da mão de obra gerado pelo bloqueio ‘*lockdown*’, porém em 2021 há uma tendência de reação com o aumento das encomenda gerando boas perspectivas futuras (UNCTAD, 2021).

No cenário nacional a movimentação de carga está em recuperação, onde as exportações no 4º trimestre de 2021 teve como resultado US\$ 67.4 bilhões, crescendo 26,2% em relação ao mesmo período de 2020 e as importações aumentaram 42,7% alcançado US\$ 62,6 bilhões. Em análise de desempenho das instalações portuárias, considerando a tonelagem movimentada a performance permaneceu relativamente estável (ANTAQ, 2021).

Diante desse cenário de otimismo o planejamento eficiente diminuir custo portuários exorbitantes aumentando a competitividade dos produtos nacionais no comércio exterior contribuindo com a economia. Silva (2008) declara que a importância do sistema portuário como instrumento socioeconômico em uma região, maximizando o desenvolvimento social e humano.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivos gerais

Propor uma heurística para planejamento de atracções de navios de graneis sólidos auxilie a tomada de decisão de alocação de berços portuários com base na capacidade de atendimento com o intuito de maximizar o recebimento de prêmios recebidos pelo terminal visando o aumento da receita.

1.2.2. Objetivos específicos

- Apresentar o problema de alocação de berços de atracção portuário, evidenciando a importância da resolução do problema, para melhoria de resultados estratégicos e operacionais.
- Propor um modelo matemático para resolução do problema de alocação de berços contínuos (PABC) para comparação com a o método heurístico.
- Analisar o comportamento do modelo na tomada de decisão operacionais e estratégicas, mensurando o impacto em uma expansão da infraestrutura portuária.

1.3. Organização do trabalho

O trabalho está dividido em seis capítulos, estruturado da seguinte forma, conforme abaixo.

- O capítulo 1 refere-se à parte introdutória da pesquisa, onde é apresentado a justificativa da pesquisa, o objetivo geral e específico, bem como a estruturação do trabalho.
- No capítulo 2 é apresentado o referencial teórico com a revisão da literatura, onde são abordados aspectos do setor portuário e do problema de alocação de berços contínuo (PABC).
- No capítulo 3 é apresentado a metodologia utilizada para o desenvolvimento da dissertação, bem como a classificação da pesquisa e os procedimentos técnicos aplicado.
- No capítulo 4 são apresentadas as definições do Problema de Alocação de Berços Contínuo (PABC) e do Problema de Alocação de Berços Contínuo com Restrições de Maré (PABCRM), o modelo de Programação Linear Inteira Misto (PLIM) proposto para resolver o PABC, bem como as abordagens heurísticas por meio de Algoritmo Genético.
- No capítulo 5 apresentado os resultados dos experimentos computacionais para as instâncias do PABC e PABCRM e discutido o desempenho das abordagens exata e heurística utilizadas para resolver os problemas.
- Capítulo 6 é apresentado as considerações finais, conclusão e recomendações para futuros estudos.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo é apresentando uma visão geral do transporte marítimo, bem como a influência do problema de alocação de berço (PAB) no desempenho operacional.

2.1. Os Terminais portuários

O transporte é uma das etapas mais importantes da logística, permitindo o escoamento de bens e serviços e tornando-os disponíveis à sociedade, sendo assim, fundamental no desempenho da economia. O sistema portuário é a porta de acesso ao comércio exterior e principal ligação da cadeia logística com a sociedade (COLLYER, 2016).

O transporte marítimo é uns dos modais mais adequados para a logística no Brasil, mesmo não tendo toda a capacidade explorada. A sua importância está relacionada a intermodalidade, à geração de postos de trabalho, a alta movimentação de cargas e a consolidação. Mesmo com todas as dificuldades, tais como infraestruturas inadequadas, burocracias excessivas e altas tarifas, existe potencial de melhora, sobretudo com investimentos adequados (ZELAYA *et al.*, 2015)

Seguindo no mesmo sentido, Bisogno *et al.* (2015) caracteriza os portos como fundamentais para a competitividade num cenário de integração econômica, mudança organizacional e aumento da concorrência dos mercados internacionais, sendo exigido capacidade de estoque e instalações apropriadas com movimentação eficiente.

O comércio internacional vem se desenvolvendo impulsionado pela indústria naval. De acordo com Grant (2013) a grande capacidade de transporte, alinhada ao poder computacional e a extinção de barreiras tarifárias, contribuíram para o otimismo promovendo o aumento do comércio global.

A demanda crescente das movimentações de cargas é reflexo das intensificações de acordos comerciais internacionais e ao crescimento econômico mundial. Dessa forma, a busca por serviços portuários aumenta, levando assim a filas de esperas para atendimento, gerando um cenário que evidencia a necessidade de eficiência (CERESER *et al.*, 2017).

De acordo com a ANTAQ (2021) - Agência Nacional de Transportes, a balança comercial teve um saldo positivo em US\$ 4,9 bilhões no 4º trimestre de 2021. A soma das exportações no período resultou em US\$ 67,4 bilhões, significando um crescimento de 26,2% em comparação com o mesmo período do ano anterior. As importações somaram US\$ 62,6 bilhões totalizando aumento de 42,7%.

Dentre os portos privados, os quadros maiores movimentações, são feitas com graneis sólidos, representando 66,1% de todo o peso bruto. O bom desempenho da soja, carvão mineral, fazendo com que o trimestre se registra um avanço de 22,6% equilibrando o desempenho de forma geral. A figura 1 compara o 4º trimestre do ano de 2020 e 2021 entre a movimentação de carga nos portos brasileiros, representando os dados em toneladas.

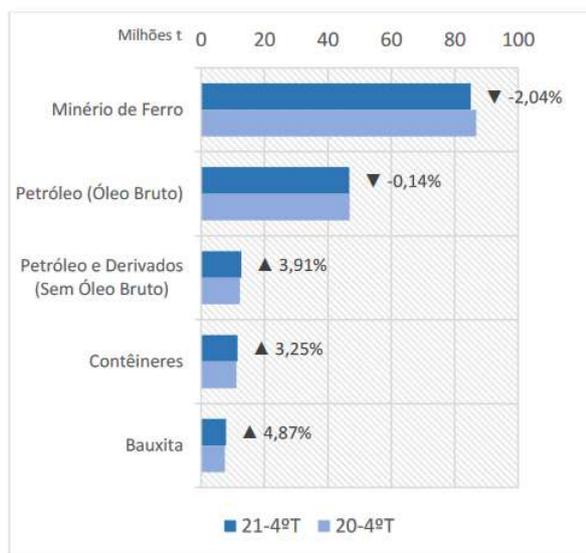


Figura 1 - Principais mercadorias movimentadas.

Fonte ANTAQ, 2021.

O aumento em geral da demanda de graneis gera competitividade e um cenário de busca por eficiência na prestação de serviços portuário e menores custos operacionais para permanência no mercado. Por isso, os portos necessitam de tecnologia para otimizar processos e atividades, tornando-o competitivo (LEÓN *et al.*, 2021).

2.2. Administração portuária

O administrador portuário deve levar em consideração a importância econômica das atividades que impactam a produção e o consumo das mercadorias, gerenciando as pressões por produtividade e reduzindo os custos dos serviços. O aumento da eficiência reduz custos tornando o porto competitivo e diminuindo a fragilidade do elo que une produção e consumo (LIGTERINGEN, 2017).

A infraestrutura portuária brasileira vem sendo construída ao longo das últimas décadas e com isso tem apresentado limitações e deficiências, comprometendo a eficiência e o

desenvolvimento econômico. Tornar eficiente os portos Brasileiros são fundamentais para que o sistema portuário possa efetivamente contribuir para o fortalecimento do comércio exterior (TOVAR; FERREIRA, 2006)

Conforme Silva (2010), existem desafios do sistema portuário, na busca da eficiência operacional, que podem ser definidas como:

- Provimento de facilidades eficientes para o escoamento das cargas;
- Promover o acesso adequado aos navios visando atender o ciclo operacional;
- Garantir a segurança da navegação no interior dos limites do canal de acesso;
- Garantir a proteção adequada do meio ambiente;

Existem alguns modelos de administração portuária, tais quais de titularidade pública, estadual, municipal e privada, onde prevalece o modelo público federal como as Companhias Docas. A operação portuária pode ocorrer por portos públicos através de concessão de empresa pública ou privadas mediante a processo licitatório. Para instalações portuárias de uso privativo necessitam apenas de autorização do poder público (SALGADO *et al.*, 2012)

De acordo com Brooks (2004) existem quatro principais modelos de administração portuária praticados no mundo:

- **Public Service Port:** Tem como característica a administração pública sem a participação da iniciativa privada em que a Autoridade Portuária é proprietária de todos os ativos e desenvolve a atividades portuárias. A gestão das operações e regulação de desenvolvimento da infraestrutura é feita por um único órgão ligados diretamente à Autoridade Portuária.
- **Toll Port:** É caracterizado pela responsabilidade da autoridade portuária no desenvolvimento e manutenção da infraestrutura dos portos, o que inclui equipamentos portuários. A movimentação é realizada comumente por empresas privadas contratadas por agentes marítimos.
- **Landlord Port:** Tem como característica a atuação da autoridade portuária como órgão regulador e proprietário, enquanto arrenda para empresas privadas os terminais para operações de movimentações de carga.
- **Private Service Port:** Tem como característica a administração inteiramente de responsabilidade da iniciativa privada, sendo este responsável tanto pela gestão quanto pelas operações portuárias. Essas instalações privadas, denominadas TUP (Terminal de Uso Privativo), devem estar autorizadas pelo poder público.

2.3. Condições de maré e atracação

As superfícies oceânicas manifestam flutuações em resposta às forças gravitacionais exercidas pela lua, o que resulta na geração de movimentos periódicos denominados marés. Em locais de grande profundidade é pouco relevante o conhecimento preciso do fundo do mar, porém em canais, em águas rasas, é importante o mapeamento da maré para permitir a navegação com segurança. (MARINHA DO BRASIL, 2022).

A compreensão dos padrões das marés é de extrema importância para a navegação, pois possibilita a tomada de decisões cruciais, tais como, avaliar a viabilidade de transitar em áreas de pouca profundidade, determinar datas, horários e velocidades adequadas para navegar nessas regiões (MARINHA DO BRASIL, 2019).

Para tomar decisões relacionadas à viabilidade de atravessar determinada área é necessário levar em consideração certos parâmetros ilustrados na figura 2, onde o navio com sua marcação de calado em relação a profundidade.

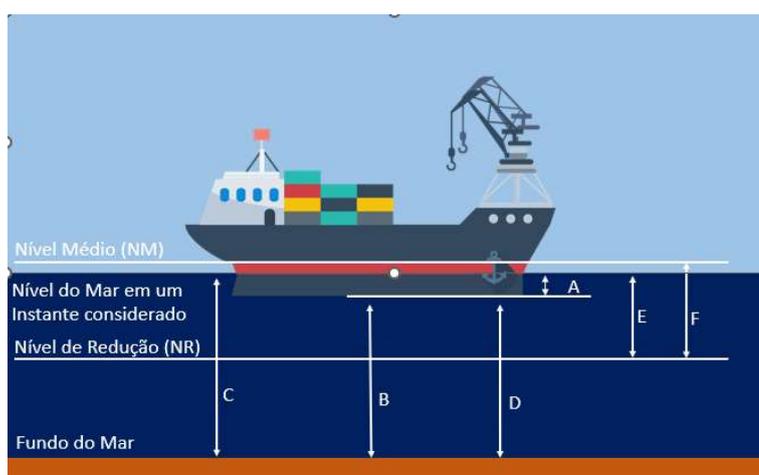


Figura 2 - Interação de navios com trecho a navegar.

Fonte: Adaptado Marinhado Brasil, 2022.

A determinação da profundidade em um determinado momento (C) é calculada somando-se a distância vertical medida entre a quilha do navio e o fundo do mar (B), somado ao calado (A), conforme apresentado na equação.

$$C = B + A$$

Esses termos adicionais são essenciais para uma avaliação precisa das condições de navegabilidade em um determinado local.

Os movimentos de maré seguem um padrão cíclico, com duração aproximada de 6 horas entre os extremos. O nível mais alto da maré é conhecido como maré cheia, enquanto o nível

mais baixo é chamado de maré baixa. A variação começa a partir da maré cheia, passa pela maré baixa e retorna novamente à maré cheia, levando cerca de 12 horas para completar um ciclo completo (CHM, 2022).

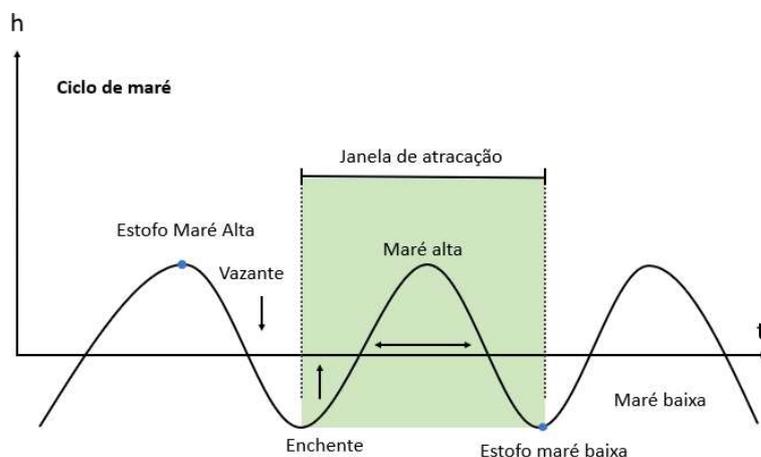


Figura 3 - Ciclo de uma maré.

Fonte: Adaptado Araújo e Melo, 2000.

A variação da maré e a velocidade da corrente são fatores determinantes que podem limitar a realização de manobras no cais. A previsibilidade da maré é crucial na identificação dos melhores momentos dentro de uma janela de planejamento para a execução de manobras marítimas, visando atender aos requisitos de segurança (MAGALHÃES, 2018).

A maré influencia diretamente o processo de atracação e desatracação em um terminal portuário, e deve ser considerado no planejamento dos navios, uma vez que pode afetar diretamente a profundidade da água e a capacidade do porto de receber embarcações com diferentes calados. É fundamental que os portos levem em consideração as condições de carga e calado, bem como a previsão da maré para garantir uma operação segura e eficiente de embarque e desembarque de carga .

2.4. Classificação dos navios

O aumento das atividades logística do comércio exterior pressiona a indústria naval a desenvolver projetos de navios de grande porte, especializados por tipos de cargas. Existem vasta variedade de navio, como de carga geral, petroleiros, graneleiros e porta contêiners e as instalações portuárias devem ter condições operacionais de atender a todas as classes e gerações levando em consideração sua especialidade (TOLEDO, 1998).

É essencial que as condições operacionais do terminal sejam conhecidas, uma vez que existem restrições impostas por fatores como o ciclo de marés e o calado (profundidade da água). Para garantir a segurança das operações, medidas especiais devem ser tomadas em relação ao tipo de arranjo e procedimento de amarração dos navios, permitindo que eles naveguem no canal de acesso e atraquem no cais de forma segura. (MAGALHÃES, 2018).

Juliano, (2011) cita a classificação de navios por capacidade de transporte em toneladas:

- **Navios Pequenos:** Essa categoria inclui navios de carga com capacidade inferior a 1.000 toneladas. São usados principalmente para transportar cargas de pequeno porte em rotas locais.
- **Navios de Médio Porte:** Esses navios têm capacidade de carga entre 1.000 e 10.000 toneladas. Podem ser utilizados para transporte regional e costeiro de cargas de tamanho médio.
- **Navios de Grande Porte:** São navios com capacidade de carga entre 10.000 e 50.000 toneladas. São usados para transportar cargas em rotas mais longas, incluindo viagens intercontinentais.

Além da classificação por capacidade de carga em toneladas, os navios também podem ser classificados de acordo com o tipo de carga que transportam. Aqui estão algumas das principais categorias:

- **Navios de Carga Geral:** Esses navios são projetados para transportar uma variedade de cargas diferentes, como produtos manufaturados, máquinas, veículos, produtos embalados e outros tipos de carga que não se enquadram em categorias específicas.
- **Navios Porta-Contêineres:** Especializados no transporte de contêineres, esses navios têm compartimentos especialmente projetados para acomodar os contêineres de diferentes tamanhos e tipos. Podem variar em capacidade, desde pequenos navios *feeders* até os meganavios.
- **Navios Graneleiros:** Projetados para transportar cargas a granel, como minérios, grãos, minerais, carvão, minério de ferro e outros materiais soltos. Eles possuem sistemas de carga e descarga apropriados para a movimentação eficiente de cargas a granel.
- **Navios Petroleiros:** Especializados no transporte de petróleo bruto, produtos petrolíferos refinados e outros derivados do petróleo. Podem ser categorizados em

diferentes classes, como Aframax, Suezmax e VLCC, com base em sua capacidade de transporte.

- **Navios de Gás:** Projetados para transportar gases liquefeitos, como gás natural liquefeito (GNL) e gás liquefeito de petróleo (GLP). Esses navios possuem tanques especiais para garantir o transporte seguro dos gases em estado líquido.
- **Navios de Carga Especializada:** Existem navios projetados para cargas especiais, como cargas refrigeradas (navios frigoríficos), cargas perigosas (navios-tanque químicos), cargas de veículos automotivos (navios RORO) e cargas de animais vivos (navios pecuários).

Essa classificação por tipo de carga é importante para que os navios sejam projetados e equipados de acordo com as necessidades específicas de cada tipo de carga, garantindo a segurança e a eficiência no transporte marítimo. Cada categoria de carga requer considerações distintas em termos de manipulação, estiva, armazenamento e requisitos de segurança.

2.5. Características dos navios

Um navio possui diversas características construtivas e formas operacionais, importantes para o processo operacional de atracação e movimentação de carga. Os atributos que compõe uma embarcação, pode melhorar sua eficiência operacional ou até mesmo inviabiliza-la (ROSA, 2006).

As dimensões lineares de um navio podem ser expressas em pés ou polegadas no plano horizontal da proa a popa. O comprimento do navio é conhecido como LOA (*length overall*), termo usado no comércio marítimo. LBP (*length between perpendiculars*) e a distância horizontal compreendida entre as perpendiculares de proa e popa. LWL (*loaded waterline length*) é o comprimento do navio na linha de flutuação de água. A largura de um navio é frequentemente referida como "boca", sendo definida como a maior largura do casco, medida entre os lados extremos da embarcação. Essa dimensão é de extrema importância para diversos aspectos do projeto, construção e operação marítima.

As para dimensionar um calado é considerado a distância máxima entre a linha de água e a quilha quando o navio flutua (d – *draught* ou *draft*). O calado pode ser medido de duas formas, calado máximo d_l com o navio carregado e calado mínimo d_b com o navio descarregado em condições de lastro. A borda livre refere-se à distância vertical entre a linha

d'água e o convés superior quando está em condições normais de carregamento. A borda livre é uma medida importante para garantir que haja espaço suficiente entre a linha d'água e o convés superior, proporcionando segurança e estabilidade ao navio.

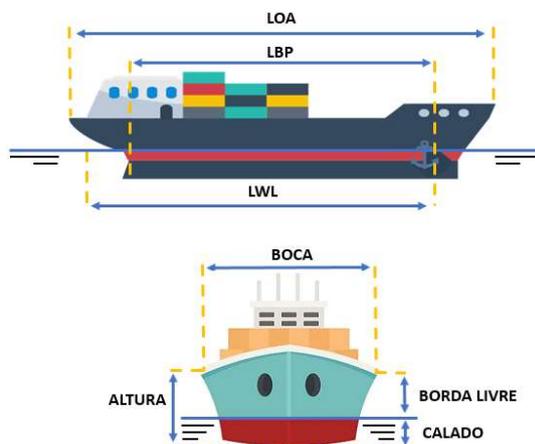


Figura 4 - Dimensões horizontais e verticais do navio.

Fonte: Rosa, 2006.

2.6. Negociações de contratos de afretamento (Charter Party)

Na logística naval a atividade de fretamento é muito importante, exigindo estreita relação de natureza contratual, dispondo de cláusulas legais padrões definindo as condições do transporte e termos de exceções mutuamente acordados variando de acordo com a modalidade de contratação (XU; JHANG, 2020).

No fretamento marítimo, as partes envolvidas realizam acordos baseados em termos dependentes que são implicitamente reconhecidos. Esses termos estabelecem as condições de compensação financeira para ambas as partes no caso de violação do acordo previamente estabelecido. Essas cláusulas são essenciais para garantir a segurança e a proteção dos interesses das partes envolvidas no fretamento marítimo. (BOAVIATSI, 2022).

Charter Party, ou "contrato de afretamento" em português, é um documento legal que estabelece os termos e condições do aluguel ou fretamento de um navio ou embarcação. É um contrato entre o proprietário do navio "armador" e o "afretador", que pode ser uma pessoa física, ou uma pessoa jurídica. Esse contrato define os direitos e obrigações de ambas as partes durante o período de afretamento. Ele especifica detalhes como o tipo de embarcação, a duração do contrato, as rotas ou áreas de operação, as cargas a serem transportadas, as taxas de frete, os prazos de pagamento, as responsabilidades por seguro e custos de combustível, entre outros aspectos relevantes (STOPFORD, 2009).

Segundo Zogahib, 2008 existem diferentes tipos de *Charter Party*, dependendo da natureza do negócio de transporte marítimo. Alguns exemplos incluem:

- **Time Charter:** Nesse tipo de contrato, o fretador aluga o navio por um período determinado, geralmente meses ou anos. Durante esse período, o fretador assume o controle operacional do navio, incluindo o gerenciamento da tripulação e o pagamento dos custos operacionais.
- **Voyage Charter:** Nesse caso, o fretador contrata o navio para uma única viagem ou um conjunto de viagens específicas. O fretador geralmente assume a responsabilidade pelo carregamento e descarregamento da carga, enquanto o armador é responsável pela operação e manutenção do navio.
- **Bareboat Charter (Demise Charter):** Nesse tipo de contrato, o navio é alugado por um período mais longo, e o fretador assume o controle total da embarcação, incluindo sua operação e manutenção. O fretador se torna responsável por todos os aspectos do navio, como tripulação, seguros e despesas operacionais.

Esse instrumento é um elemento essencial no negócio de transporte marítimo, pois estabelece os direitos e obrigações de ambas as partes, garantindo uma relação comercial clara e definida durante o período de afretamento. Ele oferece segurança e proteção legal para ambas as partes envolvidas no contrato.

2.6.1. Períodos de atracação e operação

Ao chegar ao porto, o navio está pronto para iniciar as operações de embarque ou desembarque, formalizando esse momento por meio da emissão do NOR (*Notice of Readiness*), informando que está disponível para iniciar a operação de carga ou descarga. Esse aviso é enviado ao terminal, aguardando o aceite por parte do embarcador. O embarcador, ao receber a notificação, realiza as devidas verificações para confirmar se o navio está presente no local e se atende aos requisitos legais de atracação, em conformidade com o período de *layday* acordado anteriormente no contrato. Uma vez feitas as verificações e todas as condições forem atendidas, o embarcador concede o aceite. Após o aceite, o navio entra em um período de *turntime*, destinado a realizar os últimos ajustes documentais e físicos antes do início das operações. Durante esse período, são concluídas as formalidades administrativas, como a verificação e o

processamento dos documentos relacionados à carga e ao navio. Além disso, são realizados os preparativos físicos necessários, como a disposição adequada da carga e eventuais inspeções finais para garantir a conformidade com as regulamentações aplicáveis. (KAO *et al.*, 1995).

Conforme Wilson (1988) o período de *layday* é uma cláusula essencial nos contratos de transporte marítimo, estabelecendo a janela de tempo na qual o navio deve estar disponível para realizar suas operações. Essa definição ocorre por meio de um acordo entre o armador, responsável pelo navio, e o embarcador, que é o proprietário da carga a ser transportada. Esse prazo determina os limites de tempo pelo qual o navio pode chegar ao porto, permitindo que o embarque ou a descarga ocorram de maneira organizada e eficiente. É importante que o navio cumpra esse período para garantir que as operações portuárias ocorram conforme planejado, evitando atrasos ou conflitos relacionados à disponibilidade do navio. Dessa forma, o período acordado desempenha um papel fundamental na gestão do cronograma e na coordenação entre o armador e o embarcador, garantindo a eficiência e o cumprimento dos prazos no transporte de cargas por via marítima.

Na maioria dos contratos relacionados ao *layday* para cargas a granel, é comum encontrar um período padrão de dez dias. Os armadores geralmente preferem estabelecer um tempo mais longo, permitindo maior flexibilidade e margem de manobra para a chegada e preparação do navio. Por outro lado, os embarcadores tendem a preferir um período menor, devido à possibilidade de antecipação da ordem de atracação dos navios. No entanto, é importante ressaltar que os termos do *layday* podem variar de acordo com o tipo de carga, porto de destino, características específicas da rota e acordos comerciais entre as partes envolvidas. Por isso, é fundamental que os termos e prazos sejam estabelecidos e negociados de forma clara e transparente no contrato de transporte marítimo, levando em consideração os interesses e as necessidades tanto do armador quanto do embarcador.

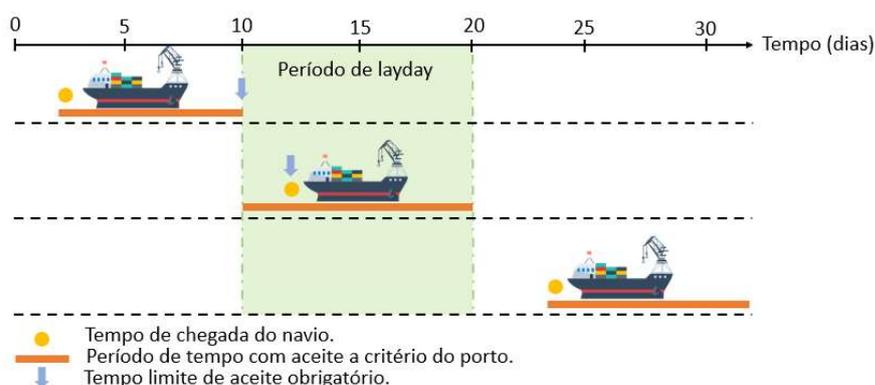


Figura 5 - Utilização prática do período de layday.

Fonte adaptado Vervloet, 2015.

Existem diferentes cenários que podem ocorrer em relação ao tempo de chegada do navio em relação ao período de *layday* acordado. Vamos explorar cada um deles:

- **Chegada antecipada:** O navio chega antes do início do período acordado. Nesse caso, cabe ao embarcador decidir se aceita ou não o navio antes do período estabelecido. Se o embarcador optar por aceitar o navio antecipadamente, o tempo de *laytime* começa a ser contado a partir desse momento.
- **Chegada dentro do período:** Essa é a situação mais comum, o navio chega durante o período acordado em contrato. Nesse caso, o embarcador deve emitir o aceite assim que o navio chegar, mesmo que a operação de carga ou descarga não seja iniciada imediatamente. Emitir o aceite cria uma preferência para a atracação do navio, reduzindo o risco de multas por atraso. O tempo de *laytime* começa a contar a partir do momento da emissão do aceite do navio.
- **Chegada após o encerramento do período:** O navio chega depois do término do período acordado. Nessa situação, o embarcador tem a opção de aceitar o navio a qualquer momento posterior à chegada. Geralmente, isso ocorre no momento de disponibilidade do embarcador, a fim de evitar o pagamento de multas por atraso. Quando o navio é aceito, o início da contagem do *laytime* ocorre no momento da atracação.

2.6.2. Prêmios e multas operacionais

O prêmio e a multa estão relacionados ao tempo de permanência do navio que é calculado a partir da sua chegada ao porto. O *laytime* é o período acordado em contrato entre as partes em que o armador se compromete a manter o navio a disposição do porto para a operação sem o pagamento de qualquer valor extra. Caso o tempo utilização seja superior ao acordado, será considerado como uma sobre estadia e o terminal embarcador deverá compensar financeiramente o armador pela retenção do navio por um período maior que o esperado (COLLYER, 2006).

O sistema de compensação no transporte marítimo, composto pela multa *demurrage* e pelo prêmio *dispatch*, desempenha um papel crucial na busca pela eficiência operacional e

equilíbrio de interesses. Enquanto a multa atua como uma compensação financeira para o armador, cobrindo os custos decorrentes de atrasos na devolução de ativos, o prêmio recompensa o embarcador por sua eficiência ao cumprir os prazos acordados ou até mesmo superá-los. Esse sistema não apenas incentiva a pontualidade, mas também contribui para uma cadeia de suprimentos mais ágil e alinhada, beneficiando todas as partes envolvidas no complexo processo do transporte marítimo. Deve haver um equilíbrio contratual entre as partes, para que o *laytime* seja suficiente para o embarcador operar de forma ordenada evitando acidentes e para o armador de forma a não ser prejudicado com longo período de espera a disposição do terminal (VERVLOET, 2015).

O tempo de permanência é calculado entre a diferença do término da operação e o tempo de chegada do navio.

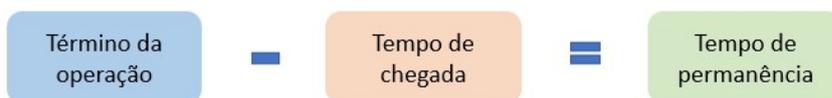


Figura 6 - Tempos operacionais.

Fonte: Adaptado Vervloet, 2015.

O tempo de permanência do navio a disposição do embarcador e o subsídio para o cálculo de estadia ou sobre estadia. Se o tempo de permanência for superior ao tempo *laytime* acordado em contrato o embarcador pagará a multa, caso a permanência seja menor que o tempo acordado o embarcador receberá um prêmio pela eficiência. Se não houver diferença entre o tempo de *laytime* acordo com o tempo total da permanência as duas partes ficam desobrigadas de qualquer tipo de ressarcimento.

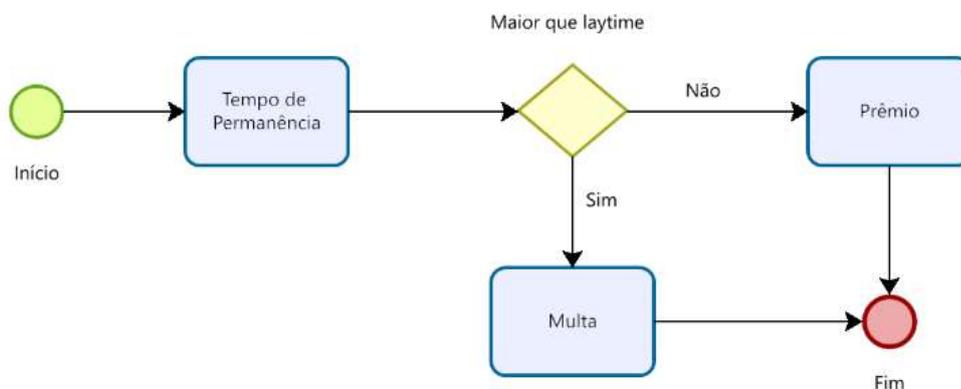


Figura 7 - Fluxograma de pagamento de multas e recebimento de prêmios.

Fonte: Adaptado Vervloet, 2015.

2.7. Complexo portuário estudado

Para atender as exigências logísticas com maior eficiência buscando maior lucro é necessário um planejamento eficiente das prioridades das filas navios para atracar. O estudo considera um terminal portuário no complexo de Açú que recebe operações de atracações diariamente para embarques e desembarques de mercadorias.

O Porto do Açú é um empreendimento moderno, sustentável de padrão internacional que conta com uma extensão 130 quilômetros, onde 90 são dedicados a instalações industriais, sendo considerado um dos maiores complexos de infraestrutura do país, abrigando o terceiro maior terminal de minério de ferro do Brasil. É responsável por 25% das exportações brasileiras de petróleo, controlando a maior base de apoio offshore do mundo, além de está construindo o maior parque térmico da América Latina (PORTO DO AÇU, 2017).

É o maior complexo portuário industrial e de energia privado do Brasil onde oferece uma plataforma conectada às principais cadeias de valor do país, disponibilizando solução integradas, despontando com uma alternativa para suprir os gargalos logísticos, conta com grande área alfandegada de 182.000m² com 1 milhão m² de área de armazenagens de apoio. O início de suas operações ocorreu em 2014 com a consolidação da infraestrutura portuária de ponta, e como um hub de logística e serviços de mineiro e petróleo avançado para o desenvolvimento da conectividade por meio de petróleo e gás visando a industrialização (PORTO DO AÇU, 2020).



Figura 8 - Linha do tempo do desenvolvimento portuário.

Fonte: Porto do Açú, 2020.

No âmbito deste estudo, é crucial compreender a estrutura do complexo portuário em foco, que abrange os terminais T1 e T2, cada um desempenhando um papel fundamental em operações específicas. O T1 assume um papel vital no manuseio de minério de ferro e petróleo, abrangendo uma extensão de 3 km que incorpora cinco piers essenciais para as operações de embarque e desembarque. A presença de um canal de acesso reforça ainda mais a viabilidade

dessas atividades. Já no T2, o terminal Offshore desempenha um papel estratégico como a retaguarda que acolhe locatários industriais, enquanto o cais de movimentação de multicargas oferece uma plataforma versátil para uma variedade de operações (PORTO DO AÇU, 2022).



Figura 9 - Layout do complexo portuário.
Fonte: T-MULT, 2017.

A administração das operações de navegação é de responsabilidade da Porto do Açu Operações S.A, onde o gerenciamento do tráfego marítimos é realizado pelo centro VTS (Vessel Traffic Service), devidamente homologação pela Marinha do Brasil, sendo pioneiro no país a ser implementado.

Diante da crescente demanda logística no T2 o trabalho se propõe a estudar uma forma de otimizar o processo de atracação, gerando capacidade de aumento de receita no Terminal Multicargas (T-MULT) que opera diferentes tipos de granéis sólidos. O comprimento total do cais é de 500 m contínuos o que pode ser definido como uma plataforma estruturada fixa paralelo a água, utilizada para receber a atracação de navios para operações de embarque e desembarque de cargas ou passageiros. Algumas restrições devem ser levadas em consideração no problema, como a distância obrigatória dos navios até as bermas, definida em 15 m, a distância entre navios definida em 20 m e com calado máximo de 12,5 m sem a utilização de maré e 13,1 m com limite de utilização de maré de 0,6 m (T-MULT, 2017).

3. METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentado a classificação da pesquisa, o método utilizado com as etapas desenvolvidas com base na aplicação do modelo proposto com instâncias reais de atracções de navios.

3.1. Classificação da pesquisa

De acordo com Vergara (2016), a pesquisa pode ser classificada quanto aos fins e quantos aos meios.

Quanto aos fins está pesquisa se classificada como aplicada e metodológica, conforme apresentação da classificação:

A pesquisa aplicada tem por objetivo resolver problema identificados na sociedade em que se está inserido de forma a adquirir conhecimentos e aplicá-los em uma situação específica GIL (2017). Dessa forma a pesquisa tem por objetivo gerar conhecimento prático utilizado um modelo matemático maximizando a receita para o administrador de terminal portuário.

A pesquisa metodológica deve certificar que existe tecnológica para a solução, e caso não haja recomenda-se prioritariamente a construção de instrumentos capazes de proporcionar a investigação do problema (GIL, 2017). Dessa forma a partir da elaboração do modelo matemático que define uma proposta de otimização do planejamento de prioridades de atração de navios.

No que diz respeito aos meios de investigação é classificada como bibliográfica, documental e de campo, conforme classificação apresentada:

Conforme esclarece Pizzani *et al.* (2012) a pesquisa bibliográfica é a revisão da literatura sobre as principais teorias que norteiam o trabalho científico. Essa pesquisa teve como base os estudos publicados em artigos, revistas, periódicos, dissertações, testes, relatórios compondo a base do referencial teórico.

De acordo com Ludke e Marli A. (1986) a pesquisa documental busca identificar informações procedente nos documentos de acordo com as hipóteses de interesse da pesquisa. As informações operacionais explicitadas na dissertação são divulgadas em canais oficiais por meio dos órgãos reguladores.

A pesquisa de campo é realizada para que o pesquisador tenha conhecimento sobre os fatos através de observações de como ocorreram espontaneamente, na coleta dos dados que

presumimos relevantes para análise (CARNEVALLI; MIGUEL, 2001). Para composição da pesquisa foram realizadas entrevistas com especialistas em navegação e operações portuárias, visando exclusivamente o entendimento do processo e aplicação prática.

3.2. Etapas desenvolvidas

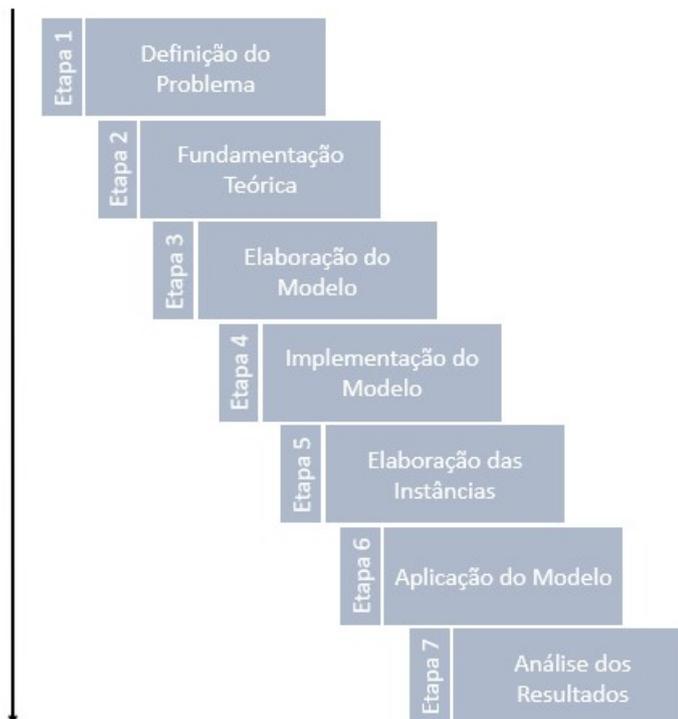


Figura 10 - Diagrama das etapas da pesquisa.

Fonte: Adaptado Vervloet, 2015.

3.2.1. Definição do problema

A necessidade de otimização dos resultados operacionais e financeiros na organização do atendimento de navios tornou-se evidente à medida que as operações portuárias se tornaram cada vez mais complexas e exigentes. As crescentes demandas dos navios, bem como as pressões financeiras para operar de maneira mais eficiente, destacaram a importância de adotar métodos de otimização no planejamento de atracação. Com o aumento do tráfego marítimo e a necessidade de alocar recursos de forma mais eficaz, a organização percebeu a necessidade de adotar abordagens mais sofisticadas para otimizar as operações portuárias.

A implementação de métodos de otimização no planejamento de atracação permite à organização alocar recursos de forma mais eficiente, minimizar os tempos de espera dos navios

e melhorar a utilização dos recursos disponíveis. Além disso, a otimização ajuda a reduzir os custos operacionais, uma vez que menos tempo de atracação resulta em economias significativas em termos de mão de obra, combustível e manutenção de instalações. Dessa forma, a organização está melhor posicionada para atender às crescentes demandas do setor de transporte marítimo, ao mesmo tempo que mantém seus resultados financeiros em um patamar saudável.

3.2.2. Elaboração do modelo

O modelo matemático proposto para resolver o PABC é um modelo de Programação Linear Inteiro Misto (PLIM) baseado nos trabalhos de Rodrigues e Rosa, 2013; Rodrigues *et al.*, 2016; Vervloet e Rosa, 2016). A equação que descreve a função objetivo foi adaptada para representar a receita financeira obtida pelo operador portuário (T-MULT), dada pelo somatório das diferenças entre os prêmios pagos pelo armador (embarcação) ao embarcador (porto) e as multas pagas pelo embarcador ao armador, para as diversas embarcações.

Além disso, o modelo de PLIM do PABC é descrito em detalhes na (Seção 4.3) expõem os conjuntos, parâmetros e variáveis que compõem o problema, bem como a função objetivo formulada para maximizar os prêmios obtidos pelo embarcador, respeitando a aderência às restrições impostas.

3.2.3. Implementação do modelo

O modelo de Programação Linear Inteira Misto foi implementado na linguagem de programação C++ e resolvido utilizando o solver IBM® ILOG® CPLEX® integrado ao ambiente de desenvolvimento *Microsoft® Visual Studio Community*, que é uma IDE gratuita.

Devido ao fato do PABC ser NP-difícil, à medida que o número de navios disponíveis para atracação cresce e os tempos de chegada ficam muito próximos, isto é, a instância aumenta, o tempo que o CPLEX leva para encontrar a solução ótima torna-se excessivo. Diante disso, também foi implementado uma meta-heurística para resolver o PABC, método de fácil implementação que proporciona bons resultados na resolução do planejamento de alocação de dos navios.

No intuito de tornar o problema o mais próximo possível da realidade do porto, foi implementada uma segunda versão da meta-heurística anterior considerando a variação das

marés para simulação do planejamento de atracações. Este problema é conhecido na literatura como Problema de Alocação de Berços Contínuo com Restrições de Maré (PABCRM).

3.2.4. Elaboração das instâncias

Primeiramente, foram identificadas as particularidades relacionadas ao panorama atual das operações da empresa Porto do Açú. O contexto de uma ampliação foi examinado, onde a empresa começa a operar com um cais de tamanhos variados. Em seguida, as características identificadas foram empregadas na elaboração das limitações do PABC, bem como a função objetivo.

Todos os navios possuem uma data de ETA (*Estimated Time of Arrival*) e não pode ser atracado antes desse horário. O Porto apresenta restrições espaciais, ou seja, há profundidade de 12,5 metros em condições normais e 13,1 metros com a influência da maré. Além disso, o comprimento total do cais é de 500 metros, porém o máximo utilizado é 470 metros, devido ao desconto de 15 metros de cada berma. Para que um navio possa atracar em um berço, é necessário que ele tenha LOA (comprimento total) e calado menores que o comprimento e a profundidade disponíveis, respectivamente.

As instâncias foram elaboradas onde cada grupo conte quatro instâncias diferentes variando em cinco sua quantidade de navios, que pode ser observado na tabela 1.

Todos os dados sensíveis da empresa foram multiplicados por um fator de ajuste aleatoriamente de forma a proteger a confidencialidade das informações.

As instâncias foram elaboradas com o objetivo de validar a aderência do modelo matemático em um ambiente produtivo. Sua elaboração, baseou-se em históricos de atracações de navios, com ajustes de chegadas aleatórias médias de um navio por dia correspondendo a possíveis cenários, com um horizonte de tempo entre os meses de janeiro a abril de 2022, disponibilizados na plataforma *Port Management Information System* (PMIS) do Serviço de Tráfego de Embarcações (VTS) do Porto do Açú.

A informações operacionais obtidas foram: quantidade de navios nomeados, data da chegada, volume de carga movimentada e tempo de operação. Já as informações comerciais como período de *layday*, tempo de *laytime*, prêmios recebidos pelo embarcador e multas pagas, foram geradas com base em referência de mercado obtidas através de históricos de movimentações. As informações financeiras foram geradas levando em consideração as referências de mercado e a partir de históricos comerciais.

Tabela 1 - Características da instância proposta.

Grupo	Instância	Janela de Atracação Layday (Dia)	Tipo de Chegada	Tempo Negociado Laytime	Nº de Navios	Comprimento do Cais	Calado do Cais	Tempo de operação	Valor do Prêmio
A	1	Padrão	Dinâmica	Padrão	5	500	Padrão	Padrão	Padrão
	2				10				
	3				15				
	4				20				
B	6	Padrão	Dinâmica	Padrão	25	500	Padrão	Padrão	Padrão
	7				30				
	8				35				
	9				40				
C	11	Padrão	Dinâmica	Padrão	45	500	Padrão	Padrão	Padrão
	12				50				
	13				55				
	14				60				
D	16	Padrão	Dinâmica	Padrão	65	500	Padrão	Padrão	Padrão
	17				70				
	18				75				
	19				80				
E	21	Padrão	Dinâmica	Padrão	85	500	Padrão	Padrão	Padrão
	22				90				
	23				95				
	24				100				
F	25	Padrão	Dinâmica	Padrão	20	500 + 25%	Padrão	Padrão	Padrão
	26				40	500 + 50%			
	27				60	500 + 75%			
	28				80	500 + 100%			

Fonte: Elaboração própria, 2023.

Foram criadas 28 instâncias, 4 por grupo, onde os grupos A, B, C, D, E diferenciam-se apenas na quantidade de navios. O *layday* é o padrão de 10 dias, normalmente utilizado em contratos, principalmente para carga do tipo granel. O tipo de chegada foi considerado dinâmico, onde os tempos de chegada são conhecidos normalmente como *Estimated Time of Arrival* (ETA). O *laytime* foi considerado com base em alguns contratos conhecidos para estabelecer as referências de mercado na relação comercial. Na busca pela validação e robustez dos modelos utilizadas variações na quantidade de navios das instâncias. Em diversos contextos de análise, a quantidade de navios selecionados como amostra desempenha um papel crucial na avaliação da capacidade do modelo em lidar com diferentes cenários. O comprimento do cais,

refere-se ao tamanho total disponível para atracação, não apenas influencia a capacidade do porto em acomodar embarcações de diferentes tamanhos, mas também afeta diretamente a velocidade e a segurança das operações de carga e descarga. O calado adotado foi o padrão com restrições operacionais homologada pela Marinha do Brasil, onde o máximo permitido, sem a utilização de maré é de 12,5 metros e com utilização de maré de 13,1 metros, com limite máximo de 0,6 metros. O tempo de operação foi utilizado de acordo com medias contratuais. A multa e prêmio foi utilizado com base em contratos existentes e médias padrões de mercado.

No grupo F, instâncias de 25 a 28, foram definidos os valores considerando o aumento percentual da área de atracação do cais para avaliar a influência e benefícios ao embarcador com o aumento da infraestrutura, justificando a aplicação de recursos no investimento em expansão.

3.2.5. Aplicação do modelo

Para o método exato foi criado um modelo matemático de programação linear inteira mista para gerar resultado precisos e foi executado no resolvidor IBM® CPLEX® Optimizer. Para o método heurístico foi desenvolvido um algoritmo genético, inspirados pelo processo de seleção natural, oferecem uma solução eficaz para problema de otimização.

As informações de planejamento operacional de atracações ocorrem normalmente no horizonte semanal, esse fato se deve as incertezas dos tempos de navegação das embarcações (GIALLOMBARDO *et al.*, 2010; ZHEN *et al.*, 2017). A programação de atracação do terminal é realizada diariamente em um horizonte de planejamento quinzenal considerando a média de 10 atracações do período, validando a capacidade do modelo em cenários possíveis para apoio apoiando o planejamento dos navios.

3.2.5.1. Experimentos computacionais

No intuito de avaliar a performance do algoritmo heurístico para resolver o PABC, foram realizados diversos experimentos computacionais. O algoritmo foi codificado na linguagem de programação C++ e os testes conduzidos em uma máquina com processador Intel(R) Core(TM) i5-13400F, com CPU de 2,50 GHz, 8 GB de memória RAM e sistema operacional Windows 11 Pro de 64 bits.

Foi executado cada instância 10 vezes, tendo como critério de parada a convergência da população. O ajuste dos parâmetros utilizados nos testes computacionais foi feito após a realização de uma análise de sensibilidade com várias combinações destes, descrito na próxima Seção. Para a simulação em um ambiente operacional, as instâncias (Seção 3.2.4) foram elaboradas a partir de dados retirados do histórico do Sistema de Gestão Portuário disponíveis ao público através do *lineup*.

No intuito de avaliar o comportamento e a confiabilidade do modelo em instâncias grandes, foram executadas instâncias com até 100 navios. Assim, os parâmetros utilizados foram os que apresentaram os menores resultados do *Gap*(%) e tempo dentre as 16 configurações obtidas. Foi assumido que o cais de atracação tem comprimento linear de 500 metros do grupo A até o E. Porém, no grupo F foram elaboradas instâncias levando em consideração uma possível expansão do cais em 25%, 50%, 75%, até dobrar sua atual capacidade chegando a 100%.

3.2.6. Procedimento técnico

A partir do levantamento feito com as movimentações dos navios, foram identificados e agrupados, conforme tabela 1, possibilitando diferentes cenários de execução com o objetivo de avaliar a aplicabilidade do modelo em situações reais de planejamento de atracações no ambiente operacional portuário.

Os navios são definidos para cada instância dentro de seus respectivos grupos, onde por padrão foi definido 10 atracações de navios que representa a média real em um horizonte de 15 dias considerado de planejamento. Porém foram criadas instâncias iniciadas em 5, variadas em 5 e finalizando em 100 navios, de forma a avaliar a robustez do modelo em um cenário crítico.

Como o cais é contínuo foi considerado o comprimento total de 500 metros descontado 15 metros das bermas de início e fim do cais. Devido a possível expansão do cais para 1000 metros foi considerando essa variação para validar o comportamento do modelo em uma possível condição de expansão de forma gradual.

As condições da maré foram observadas na versão do modelo que utiliza a variação da maré como critério de desatracação. Os dados relacionados a maré foram retirados da tabela disponibilizada pela Marinha do Brasil.

3.2.7. Demanda da pesquisa

Foi observado em buscar realizadas na literatura, a carência de trabalhos acadêmicos que tratem o PAB em cais contínuo, para carga graneis e de projeto, utilizado as restrições de desatracação com tabua de marés.

O crescimento da demanda do setor portuário por eficiência, para atender as necessidades do comercial internacional, abrem arestas para pesquisas voltadas para aumentar a competitividades de porto nacionais. O aumento da lucratividade se faz necessário para investimentos em infraestrutura.

4. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE BERÇOS CONTÍNUO (PABC) E ESTRATÉGIAS DE SOLUÇÃO

Neste capítulo é apresentado o Problema de Alocação de Berços básico que visa o planejamento do sequenciamento de atendimento de navios a partir da chegada dinâmica ao porto, otimizando o uso da capacidade portuária e permitindo simular cenários de atendimento considerando as restrições e prioridades gerenciais.

4.1. Apresentação do problema de alocação de berços contínuos (PABC)

Refere-se a um problema de otimização conhecido na literatura como Problema de Alocação de Berços Contínuo (PABC), que consiste em planejar a sequência de atendimento de um conjunto de navios, dentro de um horizonte de tempo, em um cais contínuo do porto, visando atribuir uma posição e um tempo de início de atracação para cada navio que planeja operar, sem que haja sobreposição, de forma a otimizar uma função objetivo (RODRIGUES e ROSA, 2013).

Esse problema é classificado na literatura como NP-Difícil (Hansen e Oguz, 2003; Imai *et al.*, 2005) e, diante dessa situação, foi decidido abordar uma solução heurística. Em Ernst *et al.* (2017) é apresentado uma formulação de PLIM para o PABCRM.

Um dos primeiros problemas desta natureza descrito na literatura é encontrado em Imai *et al.* (1997), onde o comprimento do cais é fixo, porém pontos discretos são considerados com chegada estática, pois os navios a serem atendidos no horizonte de tempo estão aguardando no porto. (Park and Kim, 2003) e (Guan e Cheung, 2004) apresentam propostas para encontrar soluções para o PABC com chegadas estáticas que visam minimizar o tempo total de permanência dos navios no porto. (Tang, Li e Liu, 2008) consideraram um PABC com chegada dinâmica, propondo dois modelos matemáticos, além de uma Relaxação Lagrangiana. (Gao *et al.*, 2010) abordam o mesmo problema, porém admitindo que as datas de chegada dos navios possuem comportamento estocástico. (Elwany, Ali e Abouelseoud, 2013) propuseram uma solução baseada em *Simulated Annealing* para o PABC com chegada dinâmica e restrições de calado.

De acordo com Cruz *et al.*, (2012), o custo de alocação dos navios é crítico para o desempenho operacional e a otimização tem por finalidade a busca por alto desempenho do

sistema portuário a um menor custo possível associado a operação. Na Figura 11 pode ser observado um cenário típico do processo de atracação de um porto.

Diferentes variações do problema são amplamente estudadas, podendo ser classificadas por restrições espaciais e temporais, levando em consideração as características construtivas do terminal portuário.

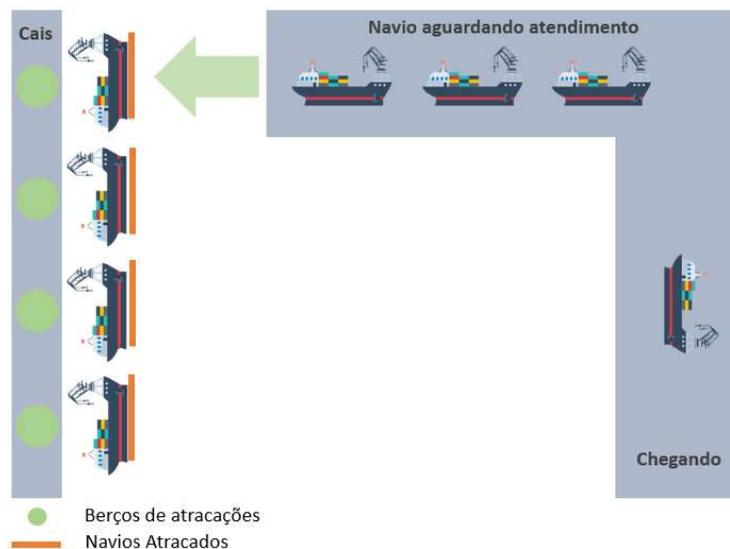


Figura 11 - Cenário típico do PAB.

Fonte: Adaptado Mauri, 2008.

Com relação às restrições especiais, o cais pode ser considerado (i) discreto: quando é dividido em seções finitas denominadas berço que atende apenas um navio por vez (BRILHANTE *et al.*, 2015); (ii) contínuo: possui uma seção contínua permitindo atracações em posições arbitrárias dentro dos limites do cais de atracação (RODRIGUES; ROSA, 2013). (iii) híbrido: o cais é particionando em espaços denominado berço, similar ao caso discreto, porém navios grandes podem ocupar mais de uma partição ou navios pequenos podem ser agrupados em uma única partição (CORDEAU *et al.*, 2005).

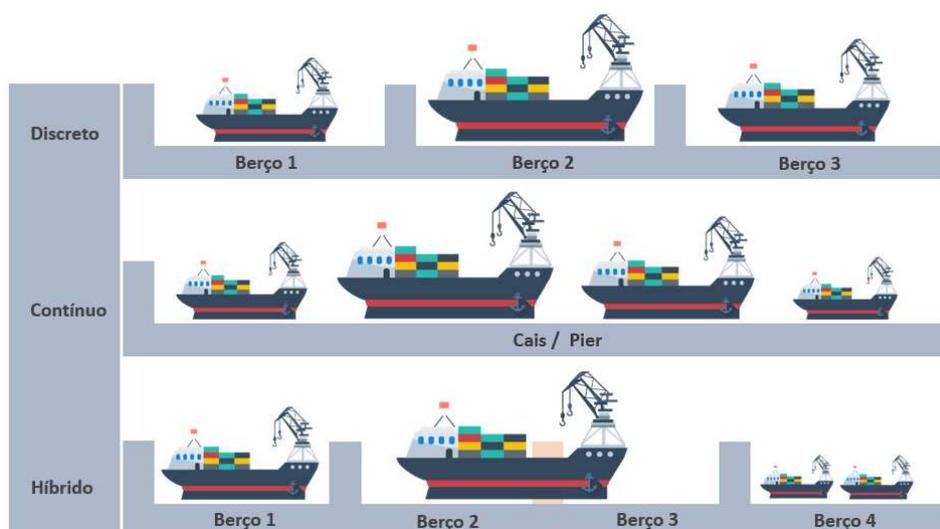


Figura 12 - Representação do PAB com restrições espaciais.

Fonte: Adaptado Rodrigues *et al.*, 2013.

As restrições temporais têm relação direta aos horários de atracação e desatracação dos navios, que pode ser tratado como (iv) estático: todas as embarcações estão disponíveis na barra aguardando a execução do cenário de planejamento (OLIVEIRA *et al.*, 2012); (v) dinâmica: as embarcações chegam a qualquer momento ao longo do horizonte de planejamento (IMAI *et al.*, 2001).

As datas de chegada dos navios podem ser consideradas determinística ou estocástica onde (vi) determinística: quando as datas de chegadas são conhecidas, normalmente identificada como *Estimated Time of Arrival* (ETA) fixadas como parâmetros do problema (RODRIGUES; ROSA, 2013); (vii) estocástica: pode variar o tempo de chegada e movimentação do navio (ZHOU; KANG, 2008).

O terminal portuário estudado possui um cais contínuo e restrições temporais dinâmicas, onde um plano de atracação pode ser representado em um diagrama espaço-tempo bidimensional (Figura 13), no qual o eixo vertical representa o tempo ao longo de um horizonte de planejamento T e o eixo horizontal representa o comprimento do cais S . Cada navio é representado como um retângulo, cuja largura representa o tempo de operação o_i e o comprimento representa o comprimento da embarcação (LOA) s_i , já incluído a margem de segurança.

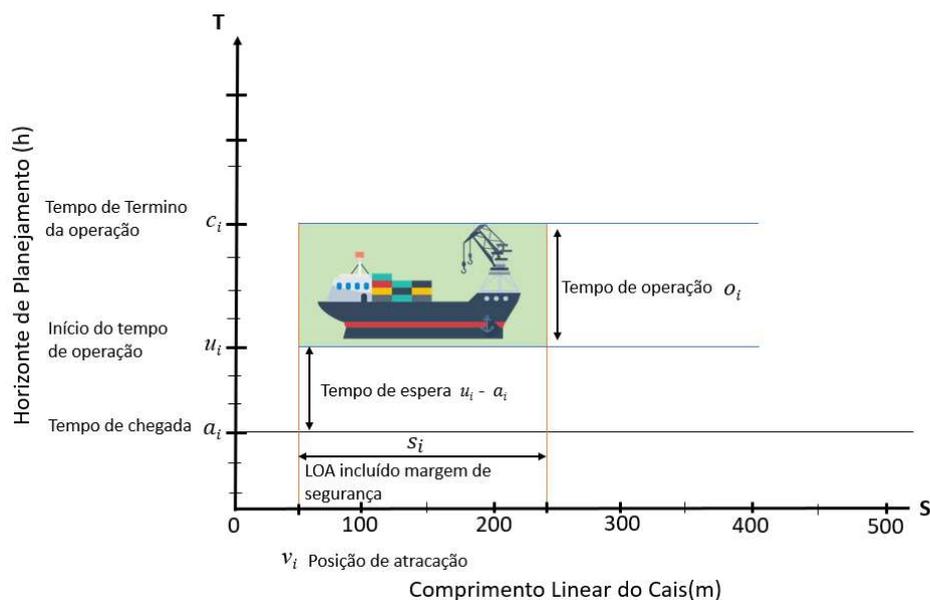


Figura 13 - Diagrama de tempo-espaco bidimensional.

Fonte: Adaptado Creimanoff, 2020.

Dado um conjunto com n navios $N = \{1, 2, \dots, n\}$, o PABC determina a sequênciade atendimento de cada navio $i \in N$, conforme o tempo de chegada a_i ao terminal portuário, atribuindo uma posicão de atracacão v_i ao longo do cais, sem que haja sobreposiçõese. Além disso, os navios ainda estão sujeitos a um tempo de espera, devido a indisponibilidade de vaga no cais. Assim que o navio atraca no porto, é iniciado a operacão u_i , que engloba uma série de atividades essenciais para a movimentacão de carga. Cada navio de LOA (s_i) ocupará, sem interrupçõese, um comprimento S do cais durante o tempo de operacão (o_i).

4.2. Método exato

Os métodos exatos buscam encontrar a melhor soluçãopara um problema, satisfazendo todas as restriçõese impostas. O objetivo principal é alcançara uma soluçãoque maximize ou minimize uma funçãobjetivo, ao mesmo tempo em que respeita todas as limitaçõese condiçõese impostas (GÓES, 2005).

Conforme (Stefanello, 2011) os métodos exatos têm uma característica importante que é a garantia de obtençãoda soluçãooptima do problema, no entanto, quando o tamanho do problema é muito grande, o tempo de processamento necessáριο para encontrar a soluçãooptima pode se tornar impraticável, pois o tempo de execuçãoaumenta drasticamente proporcionalmente ao tamanho da instância.

O processo de resolução de um problema utilizando um método exato pode ser dividido em algumas etapas. O primeiro passo é definir o problema de otimização a ser resolvido, ou seja, definir qual é o objetivo a ser alcançado e quais são as restrições que limitam as possíveis soluções. Em seguida, é necessário obter uma formulação de programação matemática para o problema, que possa ser expressa em termos de equações ou inequações (Longaray, 2014).

Os algoritmos exatos podem ser bastante eficazes na resolução de problemas de otimização, especialmente quando o tamanho do problema é pequeno. Em situações em que o problema é grande ou tem um potencial de se tronar, podem ser utilizados algoritmos heurísticos, que exploram soluções aproximadas de forma mais eficiente. Assim foi implementado o modelo do PABC básico utilizando o CPLEX e uma heurística, para que fosse possível uma comparação. Essa implementação inicial serviu como ponto de partida para a análise e avaliação do desempenho do modelo, proporcionando uma base sólida para futuros aprimoramentos e refinamentos.

É importante perceber que a escolha do algoritmo exato mais adequado para um problema específico depende das características do problema em questão, como o tamanho, a complexidade e o número de restrições e variáveis envolvidos. É fundamental que se tenha conhecimento em lidar com a resolução de problemas de otimização para avaliar as diferentes técnicas disponíveis e escolher aquela que apresenta o melhor desempenho.

4.3. Modelo matemático proposto

O modelo matemático proposto para o PABC é um modelo de Programação Linear Inteira Mista – PLIM, que tem como objetivo maximizar a receita gerada pelo embarcador obtida pela diferença entre o somatório dos prêmios recebidos e o somatório das multas pagas pelo embarcador aos armadores. O modelo proposto é descrito a seguir:

- Conjuntos:

N : Conjunto de navios para chegar ao porto, $i = 1, \dots, n$;

- Parâmetros:

S : Comprimento do cais;

T : Horizonte de tempo;

o_i : Tempo de operação do navio $i \in N$ em unidade de tempo (horas);

s_i : Comprimento do navio (LOA) $i \in N$ em unidade de cais (metros), já incluindo a folga entre navios;

a_i : Tempo de chegada do navio $i \in N$ ao porto (ETA);

l_i : Tempo de *laytime* acordado para operação do navio $i \in N$;

m_i : Valor da multa por hora do navio $i \in N$;

p_i : Valor do prêmio por hora do navio $i \in N$;

M : Número grande para lógica do modelo;

- Variáveis:

u_i : Tempo de início de operação do navio $i \in N$;

v_i : Posição de atracação do navio $i \in N$ no cais;

c_i : Tempo de término de operação (desatracação) do navio $i \in N$;

α_i : Tempo de prêmio do navio $i \in N$;

β_i : Tempo de multa do navio $i \in N$;

Considerando-se o diagrama espaço-tempo com o tempo como abscissa e o cais como ordenada, têm-se as variáveis binárias:

$$Ol_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se o próximo navio } j \in N \text{ a atracar estiver totalmente acima do navio } i \in N \text{ no} \\ & \text{diagrama espaço – tempo e não houver sobreposição;} \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$Ot_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se o próximo navio } j \in N \text{ a atracar estiver totalmente a direita do navio } i \in N \text{ no} \\ & \text{diagrama espaço – tempo e não houver sobreposição;} \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$z_i = \begin{cases} 1 & \text{se o tempo de operação do navio } i \in N \text{ é igual ou inferior ao } \textit{laytime}; \\ 0 & \text{se o tempo de operação do navio } i \in N \text{ é superior ao } \textit{laytime}. \end{cases}$$

$$\text{Max} \quad \sum_{i \in N} \alpha_i p_i - \sum_{i \in N} \beta_i m_i \quad (1)$$

s.a.:

$$u_j - u_i - o_i - (Ot_{ij} - 1)T \geq 0 \quad \forall i, j \in N, i \neq j \quad (2)$$

$$v_j - v_i - s_i - (Ol_{ij} - 1)S \geq 0 \quad \forall i, j \in N, i \neq j \quad (3)$$

$$Ol_{ij} + Ol_{ji} + Ot_{ij} + Ot_{ji} \geq 1 \quad \forall i, j \in N, i \neq j \quad (4)$$

$$u_i + o_i = c_i \quad \forall i \in N \quad (5)$$

$$\alpha_i \leq l_i - (c_i - a_i) + (1 - z_i)M \quad \forall i \in N, \forall k \in B \quad (6)$$

$$\alpha_i \leq z_i M \quad \forall i \in N \quad (7)$$

$$\beta_i \geq (c_i - a_i) - l_i - z_i M \quad \forall i \in N \quad (8)$$

$$\beta_i \leq (1 - z_i)M \quad \forall i \in N \quad (9)$$

$$a_i \leq u_i \leq T - c_i \quad \forall i \in N \quad (10)$$

$$Ol_{ij} \in \{0, 1\}, Ot_{ij} \in \{0, 1\}, z_i \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in N \quad (11)$$

$$u_i, v_i, c_i, \alpha_i, \beta_i \geq 0 \quad \forall i \in N \quad (12)$$

A função objetivo, Equação (1) representa a maximização do valor recebido de prêmio menos o valor pago de multa por todos os navios operados pelo porto. A função objetivo é estabelecida por duas parcelas. A primeira parcela representa o valor de prêmio calculado como a multiplicação da taxa de prêmio de cada navio pelo valor de prêmio do navio. A segunda parcela representa o valor de multa calculado como a multiplicação da taxa de multa de cada navio pelo valor de multa.

As restrições (2) e (3) garantem que não haja sobreposições no período e espaço, respectivamente. As variáveis Ol_{ij} e Ot_{ij} são variáveis binárias que consideram as posições relativas do retângulo do navio no gráfico espaço – tempo, ou seja, assumem valor unitário se o retângulo do navio j está à direita e acima do navio i , de forma que não haja sobreposição dos retângulos. Assim, no caso em que o retângulo do navio j está à direita do retângulo referente ao navio i , temos que $Ot_{ij} = 1$ resultando $u_j \geq u_i + o_i$. Isto significa que o navio j vem depois do navio i . Por outro lado, caso o retângulo do navio j esteja à esquerda do retângulo referente ao navio i , $Ot_{ij} = 0$, o que leva a $u_j + T \geq u_i + o_i$ que é sempre verdade, pois o horizonte de tempo é um valor muito maior do que os outros parâmetros.

A não sobreposição dos retângulos é assegurada pelas restrições (4). A equação (5) garante que o tempo de desatracação da embarcação é a soma da atracação com o tempo de operação. As restrições (6) definem que para os navios i que forem receber prêmio, $z_i = 1$, o tempo de prêmio α_i do navio i seja menor ou igual que o *laytime* l_i menos a diferença entre o tempo de término da operação c_i e a chegada a_i do navio i . As restrições (7) garantem que para os navios i que não recebem prêmio, $z_i = 0$, o tempo de prêmio α_i seja menor ou igual a zero

e caso o navio receba prêmio, $z_i = 1$, então o tempo de prêmio pode ser menor ou igual a um valor muito grande M .

As Restrições (8) definem que quando o navio i receber multa, $z_i = 0$, o tempo de multa β_i do navio seja maior ou igual que o tempo de término da operação c_i menos a diferença entre a chegada a_i e o *laytime* l_i do navio i . As Restrições (9) garantem que os navios que não recebem multa, $z_i = 1$, tenham o tempo de multa β_i menor ou igual a zero e, caso o navio receba multa, $z_i = 0$, o tempo de multa será menor ou igual a um valor muito grande M .

A restrição (10) garante que o navio seja atracado dentro do horizonte de tempo estipulado, ou seja, depois do ETA do navio e antes do tempo limite. Este horizonte de tempo T é calculado como a diferença entre a data/hora de desatracação do último navio amostrado e a data/hora de atracação do primeiro navio em análise, adicionando-se um *delay*.

As restrições (11) são estabelecidas para assegurar que as variáveis Ol_{ij} , Ot_{ij} e z_{ik} sejam restritas a valores binários. As restrições (12) garantem que as variáveis descritas assumam apenas valores maiores ou iguais a 0, conhecida como restrição de não negatividade.

4.4. Algoritmo Genético proposto para o PABC

4.4.1. Solução heurística

As heurísticas são técnicas utilizadas para solucionar problemas, mas que não garantem alcançar a solução ótima. Na maioria dos casos, esses métodos são utilizados para resolver problemas que não podem ser resolvidos por métodos exatos em um tempo computacional aceitável (GÓES, 2005).

É importante destacar que a escolha da melhor heurística não deve se basear apenas no tempo de execução. Outros fatores, como a qualidade da solução obtida e a complexidade da implementação, também devem ser considerados. É preciso fazer uma análise crítica para entender se o tempo de execução é um fator crítico para o problema em questão, ou se a escolha da heurística pode ser baseada em outros critérios.

De acordo com (Silva, 2011), algoritmos genéticos podem ser definidos como procedimentos de busca baseados na genética e seleção natural das espécies. Semelhante ao fenômeno observado no ambiente natural, um algoritmo genético (AG) é caracterizado por um conjunto de soluções candidatas agrupadas como indivíduos, que se engajam em um processo competitivo para assegurar sua sobrevivência.

Diferente de outros métodos que partem de um ponto do espaço de busca para encontrar a solução ótima, os AGs operam em um conjunto de soluções, onde o princípio da sobrevivência dos indivíduos mais aptos é aplicado para conduzir a uma melhoria contínua das soluções ao longo do tempo.

Desta forma, geração após geração, um novo conjunto de indivíduos é criado pelo processo de seleção e cruzamento dos indivíduos progenitores, de acordo com o nível de aptidão associado ao problema. A procriação é feita entre os progenitores através de operadores extraídos da genética natural. Essa dinâmica resulta na progressiva evolução dos indivíduos que se adaptam de maneira mais eficiente ao problema, assim como ocorre na adaptação natural. Assim empregam mecanismos que modelam os processos naturais, fazendo uso de operadores fundamentais aplicados aos indivíduos da população, tais como a seleção dos mais aptos, o cruzamento entre eles e a ocorrência de mutações genéticas (CORTÊS, 2010).

Dependendo do caso, pode ser possível combinar diferentes heurísticas para obter um desempenho ideal, equilibrando a precisão e o tempo de execução.

Para se implementar uma heurística de qualidade alguns fatores devem ser levados em consideração, além do tempo de execução, como a qualidade da solução, a complexidade da implementação e a importância relativa do tempo de execução para o problema em questão. Cada caso deve ser avaliado individualmente, levando em consideração suas características específicas e os objetivos a serem alcançados.

4.4.2. Processo de alocação de navios nos espaços máximo vazios - EMV

O processo de alocação de navios no plano é feito através de sucessivas inserções em espaços retangulares sem a ocorrência de sobreposições com navios anteriormente alocados. As regiões retangulares são denominadas Espaços Máximos Vazios (EMV) (*Empty Maximal-Spaces* - EMS), gerenciadas por uma lista \mathcal{L} que é atualizada à medida que ocorrem alterações (PAES *et al.*, 2017). Cada retângulo e pertencente a \mathcal{L} é representado pelos seus vértices, definidos pelas coordenadas (x_{min}^e, y_{min}^e) e (x_{max}^e, y_{max}^e) , conforme a figura 14.

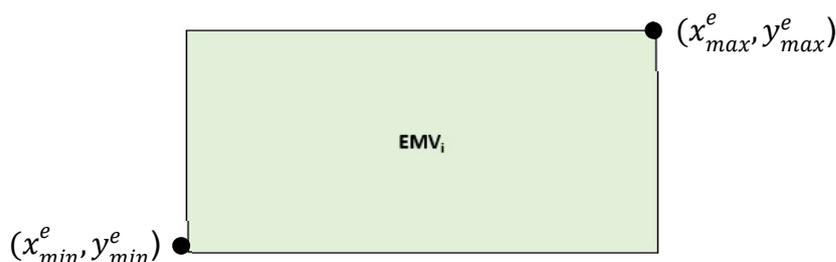


Figura 14 - Representação gráfica do EMV.

O procedimento de construção da solução realiza a inserção de um dado navio, com base em seus parâmetros, dentro do plano delimitado pelo horizonte de planejamento T e o comprimento do cais S disponível para atracação.

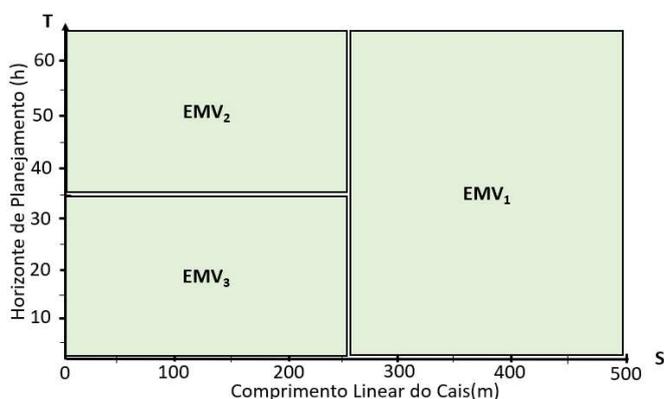


Figura 15 - Composição dos EMV's no plano.

A inserção é feita respeitando os seguintes passos:

1º Passo: é feita a inserção do navio no plano, onde o comprimento do navio s_i define o espaço ocupado no cais S de atracação na abscissa, o tempo de chegada do navio a_i define a posição inicial da operação na ordenada no horizonte de planejamento T .

2º Passo: após a fase inicial de inserção do navio, um aspecto crucial do processo é a criação de uma lista de Espaços Máximos Vazios (EMV). Essa etapa busca identificar os espaços disponíveis entre as unidades já alocadas.

3º Passo: atualiza-se a lista que gerencia os EMV's visando eliminar EMV's desnecessários e reduzindo, assim, os espaços a serem testados. Esse processo de eliminação tem como principal objetivo a economia de espaço de memória, por meio da identificação de EMV's novos ou antigos muito finos, nos quais nenhum navio possa ser inserido.

O processo de diferença (DP) é uma técnica utilizada para atualizar a lista \mathcal{L} de EMV's após a inserção de um novo navio. Essa técnica foi desenvolvida por Lai e Chan (1997) e é

amplamente utilizada em diversas áreas, incluindo a indústria de jogos e a tomada de decisões financeiras

Após a inserção da primeira embarcação, a lista é atualizada para $\mathcal{L} = \{EMV_1, EMV_2, EMV_3\}$. A figura 16 ilustra a criação dos primeiros EMV's no eixo X, Y do par ordenado.

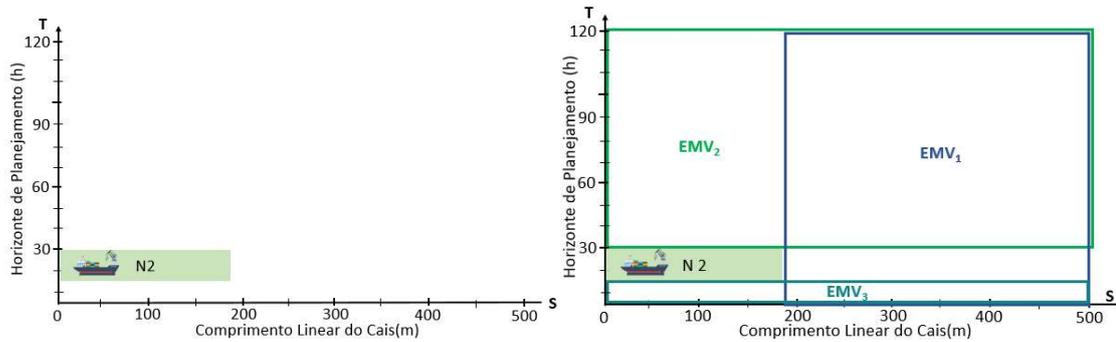


Figura 16 - Criação dos espaços máximos vazios iniciais após a inserção do primeiro navio.

O Algoritmo 1 representa o pseudocódigo utilizado na construção da solução proposta. O pseudocódigo serve como uma representação abstrata e não executável do algoritmo, apresentando de forma clara e concisa as etapas e instruções necessárias. Essa abordagem facilita a análise, revisão e comunicação do algoritmo proposto, permitindo uma compreensão mais precisa e detalhada da implementação.

Algoritmo 1 Algoritmo de Construção da Solução do PABC

```

1 Procedimento ConstroiSolucaoEMV (T, S, Sol[ ], DN[ ], T[ ], IM[ ])
2   Xmin ← 0; Xmax ← S – 10; Ymin ← 0; Ymax ← T; {define as dimensões iniciais da região
   disponível para alocação}
3   Custo ← 0;
4   P ← Ø; {vetor que guarda as posições das embarcações}
5   EMV ← Ø; {vetor que guarda os EMV's}
6   para i ← 1 até |Sol| faça {aloca cada navio do vetor solução na ordem em que
   aparece}
7     ni ← Sol[i]; {pega o navio que está na posição i}
8     se i = 1 então
9       (vni, uni) ← (0, 0); P ← P ∪ {(0, 0)} {define a posição do 1º navio}
10      tempo ← laytimeni – (uni + oni – ani);
11      se tempo ≥ 0 então
12        custo ← prêmio * tempo;
13      Senão
14        custo ← multa * tempo;
15      fim se
16    senão
17      custoparcial ← –M; {atribui um valor negativo ao custo parcial}

```

```

18      para j ← 1 até |EMV| faça {percorre todos os EMV's para encontrar a melhor posição de
      inserção}
19      emv ← true;
20      se navio ni cabe no EMV[j] então {verifica se o navio cabe no EMS}
21      se  $a_{ni} + o_{ni} \leq EMV[j]_{y_{max}}$  então {término da operação ocorre antes do Ymax do
      EMV}
22           $v'_{ni} \leftarrow EMV[j]_{x_{min}}$ ;
23          emv,  $u'_{ni} \leftarrow encontra\_posição(DN[ ], IM[ ], EMV[ ], emv)$ ;
24          se emv = true então
25              tempo ←  $laytime_{ni} - (u'_{ni} + o_{ni} - a_{ni})$ ;
26              se tempo ≥ 0 então
27                  Custoparcial' ← prêmio * tempo;
28              senão
29                  Custoparcial' ← multa * tempo;
30              fim se
31              se Custoparcial' ≥ Custoparcial
32                  Custoparcial ← Custoparcial';
33                   $v_{ni} \leftarrow v'_{ni}$ ;
34                   $u_{ni} \leftarrow u'_{ni}$ ;
35              fim se
36          fim se
37      fim se
38      fim se
39      fim para
40      fim se
41      Custo ← Custo + Custoparcial;
42      P ← P ∪ {(vni, uni)}; {aloca o navio na posição (vni, uni) que maximiza o prêmio}
43      EMV ← atualizalistaEMV( );
44      fim para
45      retorne P;
46 fim Procedimento

```

Na linha 2 são inicializadas as variáveis que definem as coordenadas do EMV, onde X_{max} recebe o comprimento do cais S descontando as bermas e Y_{max} recebe o horizonte de planejamento T . Inicialmente, os vetores posição P e EMV estão vazios (linhas 4 e 5). Na linha 6 inicia-se um *loop* que continua enquanto houver navios a ser alocados. Na linha 9, o primeiro navio é alocado na origem. Na linha 10 verifica-se o tempo de estadia do navio no berço de atracação. Se o tempo de permanência for menor que o tempo de *laytime* acordado em contrato, o custo será o produto do valor do prêmio pelo tempo, caso contrário, o custo será o produto da multa pelo tempo. Na linha 18 – 39 todos os EMVs são avaliados para encontrar a melhor posição para inserção do navio. A inserção será feita se as seguintes condições forem satisfeitas (linhas 33 e 34):

- As medidas do navio não excedem as limitações do espaço disponível no EMV, permitindo sua acomodação de forma adequada;
- quando o término da operação ocorre antes da altura máxima $Y_{m\acute{a}x}$ do EMV, indicando que o navio pode ser acomodado dentro do espaço sem ultrapassar suas dimensões permitidas.

Se o controle estiver em *true* é feito o cálculo do tempo de estadia do navio (linha 25). Caso o tempo seja maior ou igual a zero indica que o tempo de estadia foi menor que o tempo de *laytime* acordado em contrato. Dessa forma, o custo parcial será o produto do prêmio pelo tempo. Caso contrário, o custo parcial será o produto da multa pelo tempo. Na linha 42 o navio é alocado na posição (v_{ni}, u_{ni}) que maximiza o recebimento de prêmio. Ao final do processo (linha 43) a lista \mathcal{L} de EMVs é atualizada, garantindo que todas as dimensões sejam atualizadas para a próxima interação do processo de alocação de navios.

4.4.3. População inicial $P(0)$

O tamanho da população inicial representa, de certo modo, o número de alocações de berços agendadas para um determinado horizonte de planejamento que devem ser processados no intuito de obter a melhor alocação ao fim da execução de todas as gerações. Durante todas as gerações, o tamanho da população permanece constante, sem sofrer alterações. No processo de geração das sequências (cromossomos) da população inicial, os navios são ordenados em ordem crescente do tempo de chegada a_i . Caso duas ou mais embarcações cheguem ao mesmo tempo, será priorizada a embarcação i com a menor diferença entre o tempo de *laytime* l_i e o tempo de operação o_i .

Após a ordenação da sequência, a mesma é perturbada no intuito de gerar uma certa aleatoriedade. Para isso, é utilizada uma lista de candidatos restrita (LCR) com tamanho α , conforme proposto por Feo e Resende (1995). O procedimento ocorre de forma iterativa, onde para cada valor $k = 1, \dots, n$, o k – ésimo elemento da sequência será aleatoriamente selecionado da LCR, seguindo uma distribuição uniforme. Para cada iteração k , sejam S_k o conjunto de navios que já foram inseridos e \bar{S}_k o conjunto de navios que ainda não foram inseridos. A LCR é inicializada e atualizada para conter $l = \min \{\alpha, |\bar{S}_k|\}$ navios.

É relevante ressaltar que valores elevados de α resultam em uma maior aleatoriedade e em um número consideravelmente maior de sequências iniciais possíveis. Quando $\alpha = \infty$, nesse cenário qualquer perturbação de n navios tem a mesma chance de ocupar qualquer posição.

A figura 17 apresenta uma representação visual do processo de geração de um cromossomo, considerando um valor α igual a 5.

Cromossomo ordenado com todos navios										
<i>I</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>Sequência</i>	1	2	4	8	6	5	3	10	7	9

Primeira LCR com $\alpha = 5$										
<i>LCR</i>	1	2	4	8	6					
↑ Índice aleatoriamente selecionado para 1ª posição										

Primeiro navio localizado e as remanescentes ordenadas										
<i>I</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>Sequência</i>	8	1	2	4	6	5	3	10	7	9

Segunda LCR com $\alpha = 5$										
<i>LCR</i>	1	2	4	6	5					
↑ Índice aleatoriamente selecionado para 2ª posição										

As dois primeiros navios localizados e os remanescentes ordenados										
<i>I</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>Sequência</i>	8	6	1	2	4	5	3	10	7	9

Cromossomos perturbados após n seleções										
<i>I</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>Sequência</i>	8	6	3	5	2	7	2	10	1	4

Figura 17 - Operador de perturbação do cromossomo com $\alpha = 5$.

Fonte: Adaptado Paes, 2015.

É apresentado a sequência de navios ordenados em ordem crescente de chegada e pela primeira LCR. Inicialmente, a LCR conterá os cinco primeiros navios da sequência. Então o navio 8 é selecionado aleatoriamente e inserido na primeira posição. No caso da segunda LCR, os navios 1, 2, 4, 6 e 5 podem ser realocados. Então o navio 6 é selecionado de forma aleatória e é inserida na segunda posição. Ao final do processo é obtido o cromossomo perturbado. O cromossomo final é composto pela sequência de inserção dos navios no horizonte de planejamento.

4.4.4. Seleção e Crossover

A seleção dos pais para a recombinação é feita de forma aleatória com probabilidade uniforme, onde não é lavado em consideração a aptidão do indivíduo, visto em outros métodos

como, por exemplo, o método da roleta viciada. Portanto, os indivíduos menos aptos têm maiores possibilidades de serem selecionados (PAES, 2015).

O processo do crossover é dado pelo mecanismo onde dois indivíduos (pais) são misturados de forma aleatória para produzir um filho. Diferentemente dos métodos tradicionais que combinam os pais com uma probabilidade P_{cross} , na abordagem proposta, sempre que dois pais forem selecionados serão submetidos ao processo de recombinação para gerar um novo filho. Em função da representação dos cromossomos, a opção deve ser feita por um operador de crossover que evite a geração de elementos repetidos e preserve no filho a ordem dos genes nos pais.

A abordagem de crossover adotada foi a *Position – based Crossover* (PX), operador conhecido proposto por Syswerda e Palmicci (1991) que preserva a sequência dos genes no filho. A forma de como o operador (PX) atua é descrito a seguir:

Passo 1: Escolha de forma aleatória um pai atribuindo probabilidade igual a cada um dos dois indivíduos que devem ser recombinados. Selecione N_{herd} genes deste pai aleatoriamente (Equação 17), onde n representa o número de genes do cromossomo e N_{dif} o número de genes diferentes nos dois pais.

$$N_{her} = \frac{n}{2} + \frac{N_{dif}}{4} \quad (13)$$

Passo 2: Copie o conteúdo destes genes para os correspondentes no filho.

Passo 3: Remova os genes selecionados no **Passo 1**, no segundo pai. A sequência que resulta dessa operação contém os genes necessários que o filho precisa.

Passo 4: Realize a cópia do conteúdo mantendo a ordem da sequência resultante, da esquerda para a direita, para as posições vazias no filho.

A estratégia no início das gerações, ainda quando os indivíduos não têm diferenças acentuadas, gera filho que possuem 75% do pai selecionado, isso ajuda a evitar muito tempo até a convergência. Porém quando a população começa a convergir e os indivíduos ficarem semelhantes, o valor N_{herd} se aproxima de 50% de n , dessa forma, selecionando metade de cada pai, se evita geração com muitos filhos semelhantes.

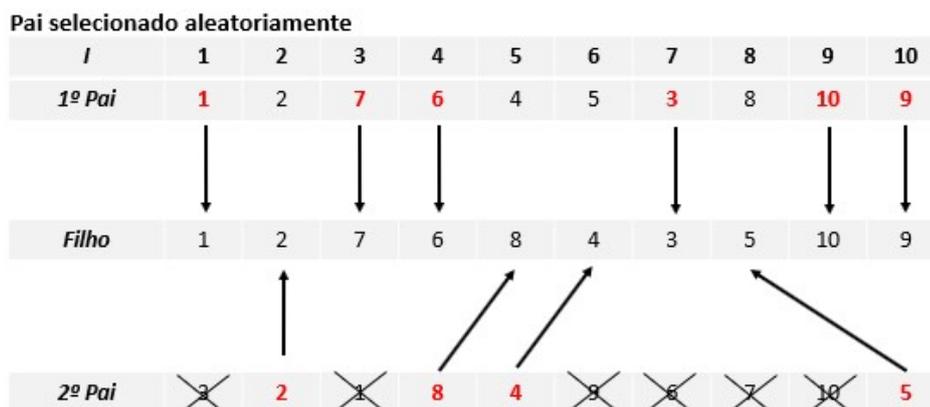


Figura 18 - Exemplo do position-based crossover (PX).

Fonte: Paes, 2015.

Na figura 22 os elementos destacados em vermelhos no pai selecionado são herdados pelo filho na ordem em que aparecem. Dessa forma os elementos remanescentes necessários para completar o filho são herdados do pai rejeitado na ordem em que eles aparecem neste pai. Assim aos trechos de sequências de um dos pais são mantidos no filho que recebeu a herança (PAES, 2015).

4.4.5. Operador de mutação

Toda vez que a população convergir (Seção 4.6.9), todos os indivíduos sofrerão mutação com uma taxa de mutação de 0,3, ou seja, 30% dos alelos sofrem alterações. Essa medida tem como objetivo perturbar os indivíduos da população, promovendo um afastamento mútuo entre eles, com o intuito de permitir a exploração de uma nova região no espaço de soluções viáveis. Dessa maneira, busca-se ampliar a diversidade genética da população possibilitando a descoberta de soluções alternativas e potencialmente superiores.

O operador de mutação utilizado atua trocando a sequência dos navios na solução até que o descendente tenha uma distância pré-definida de seu pai. Em cada passo, dois navios são escolhidos de forma aleatória, onde o segundo navio será trocado novamente no passo seguinte, de modo que a distância resultante entre o descendente e o pai seja um mais o número de trocas (Merz e Freislaben, 1999), conforme mostrado na Figura 16.



Figura 19 - Operador de Mutação.

Fonte: Paes, 2015.

4.4.6. Diversidade adaptativa

A diversidade adaptativa refere-se à capacidade do algoritmo de manter uma variedade de soluções diferentes ao longo do processo de otimização. Essa diversidade é fundamental para a exploração eficiente do espaço de busca e a descoberta de soluções ótimas. Dessa forma, para preservar a diversidade genética da população e prevenir a convergência prematura, foi adotada a técnica de Diversidade Adaptativa, que foi aplicada com sucesso no estudo realizado por Vidal *et al.* (2013) para resolver problemas de roteamento de veículos (PRV). Assim, qualquer indivíduo da população é caracterizado por seu custo $C(P)$ e sua contribuição para a diversidade, representada por $\Delta(P)$, definido como a distância média entre o indivíduo P e seus vizinhos mais próximos, conforme expresso na Equação (13).

$$\Delta(P) = \frac{1}{|N_{\text{próximo}}|} \sum_{P_2 \in N_{\text{próximo}}} d(P, P_2) \quad (14)$$

Essa abordagem, visa manter a variedade de soluções ao longo do processo de otimização, permitindo uma exploração mais ampla do espaço de busca e evitando o aprisionamento em ótimos locais. Na Equação (13), $d(P, P_2)$ é a distância de *Hamming* entre os indivíduos P e P_2 da população, calculada de acordo com a Equação (14), onde π_1 e π_2 representam dois indivíduos (permutações) quaisquer.

$$d(\pi_1, \pi_2) = |\{i \in \{1, \dots, n\} | \pi_1(i) \neq \pi_2(i)\}| \quad (15)$$

A avaliação de um indivíduo P , conhecida como *fitness* tendenciosa $FT(P)$ e expressa na Equação (15), é uma função que considera tanto o *rank* do indivíduo P em relação ao seu custo $C(P)$, denominado de $fit(P)$, bem como seu *rank* em termos da contribuição da diversidade

$\Delta(P)$, denominado de $cd(P)$. Dessa forma, os indivíduos da população mais os descendentes ($\mu + \lambda$) são classificados em ordem decrescente de acordo com seus valores de $C(P)$ e, em seguida, em ordem decrescente com base em $\Delta(P)$, e então calculados os $FT(P)$'s para cada indivíduo. Nesse processo, $FT(P)$ é influenciado pelo número total de indivíduos na população $nPop$ e pelo parâmetro $nElit$, que assegura a preservação do elitismo durante a seleção dos sobreviventes. Essa abordagem permite um equilíbrio entre a consideração do custo individual e da diversidade na atribuição dos valores de *fitness*, contribuindo para a manutenção de uma população diversificada e a seleção de soluções promissoras durante o processo evolutivo.

$$FT(P) = fit(P) + \left(1 - \frac{nPop}{nElit}\right) cd(P) \quad (16)$$

Neste estudo, uma abordagem diferente da utilizada por Vidal *et al.* (2013) foi adotada. Em vez de eliminar os λ piores indivíduos com o mesmo custo $C(P)$ ou com $\Delta(P) = 0$ em termos de $FT(P)$, optou-se por remover os λ indivíduos com os menores valores de $FT(P)$. Essa escolha foi feita levando-se em consideração que os indivíduos com maiores valores de $FT(P)$ tendem a possuir maior diversidade e aptidão. Por meio dessa abordagem, foi possível evitar que gerações compostas por indivíduos muito semelhantes fossem alcançadas prematuramente, permitindo ao algoritmo explorar novas regiões em busca de ótimos locais alternativos. Essa estratégia contribuiu para uma exploração mais abrangente do espaço de busca, aumentando as chances de descoberta de soluções mais promissoras e de maior qualidade (PAES, 2015).

4.5. Problema de Alocação de Berços Contínuo com Restrições de Maré – PABCRM

Conforme Cheimanoff *et al.* (2021) a variação do problema que considera os berços com restrições de maré (PABCRM) é bem conhecido na literatura, onde dado um conjunto de navios de entrada busca-se determinar onde e quando deve ocorrer a atracação, tendo como critério a influência da maré.

Em Zhen *et al.*, (2017) é abordado a preocupação de muitos portos com a influência das restrições de maré no planejamento. (Kelareva *et al.*, 2012) consideram as restrições de maré no porto de *Hedland*, maior exportador de minério de ferro da Austrália. Ernst *et al.*, (2017) destacam o porto australiano de *Newcastle*, maior terminal exportador de carvão do mundo e que considera a variação da maré em suas operações.

Para a resolução do problema prático, devido as características do terminal estudado, foi implementando outra versão do problema que leva em consideração restrições de maré, onde a desatracação dos navios está condicionada a uma janela de maré adequada, representada na Figura 19 pelo retângulo horizontal azul.

Nessa versão, foi acrescentado ao PABC (Seção 3.1) os intervalos de maré alta, denotada por $[I_k, F_k]$, e a restrição $D_i \in [I_k, F_k]$ limitando o tempo de partida D_i de cada navio $i \in N$ a algum intervalo de maré alta k , dando origem ao problema conhecido como PABCRM. Essas janelas de maré alta constituem um conjunto $K = \{1, 2, 3, \dots |K|\}$ durante um determinado horizonte de planejamento, no qual cada janela de maré alta $k \in K$ começa em I_k e termina em F_k . O modelo deve ser capaz de determinar para cada navio $i \in N$ o tempo de início da operação u_i , a posição v_i e o término da operação c_i , sendo que o último deve coincidir com uma janela de maré alta k , $c_i \in [I_k, F_k]$.

A escolha por essa abordagem baseia-se na necessidade de encontrar soluções viáveis em tempo razoável, mesmo que não sejam garantidamente ótimas. Ao adotar uma estratégia heurística, buscamos explorar conhecimentos específicos do problema e utilizar métodos aproximativos, com o objetivo de obter soluções aceitáveis de forma eficiente. Essa abordagem heurística é amplamente empregada em problemas complexos, onde a busca por soluções ótimas pode ser inviável em termos de tempo de execução.

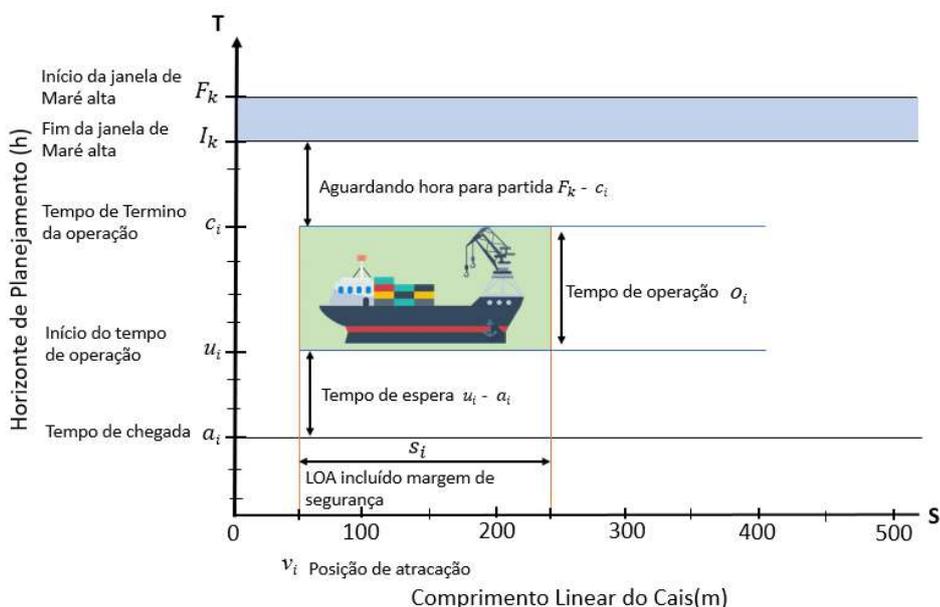


Figura 20 - Diagrama de tempo-espço bidimensional.

Fonte: Adaptado Creimanoff, 2020.

A Figura 21 mostra um plano de atracação com 20 navios e um cais com 500 metros com bermas de 15 metros e margem de segurança de 20 metros entre navios em um horizonte de planejamento quinzenal.

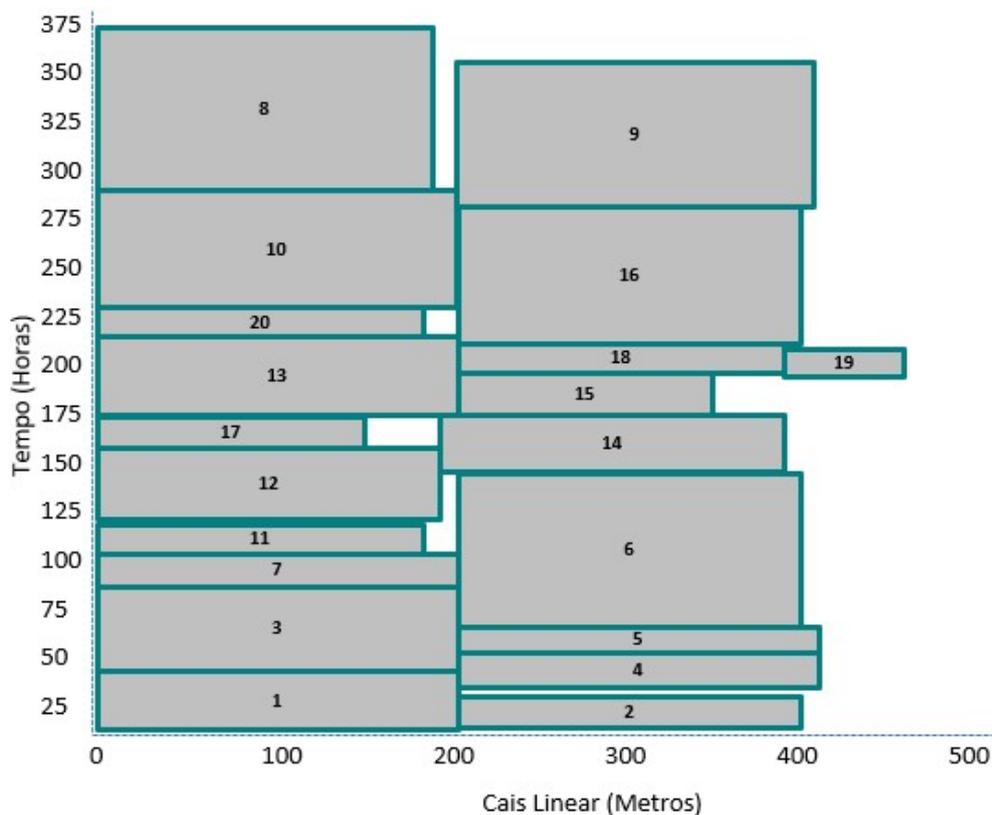


Figura 21 - Representação gráfica do planejamento de atracações otimizada.

Fonte: Elaboração própria, 2023.

4.5.1. Algoritmo de construção do PABCRM

O algoritmo apresentado neste contexto corresponde à abordagem descrita na seção 3.5.2 do PABC. No entanto, a principal distinção é que essa versão leva em consideração a influência das condições de maré no processo de desatracação de embarcações.

Algoritmo 2 Algoritmo de Construção da Solução do PABCRM

- 1 **Procedimento** *ConstroiSolucaoEMV* ($T, S, Sol[], DN[], T[], IM[]$)
- 2 $Xmin \leftarrow 0$; $Xmax \leftarrow S - 10$; $Ymin \leftarrow 0$; $Ymax \leftarrow T$; {define as dimensões iniciais da região disponível para alocação}
- 3 $Custo \leftarrow 0$;
- 4 $P \leftarrow \emptyset$; {vetor que guarda as posições das embarcações}
- 5 $EMV \leftarrow \emptyset$; {vetor que guarda os EMV's}
- 6 **para** $i \leftarrow 1$ **até** $|Sol|$ **faça** {aloca cada navio do vetor solução na ordem em que aparece}

```

7      ni ← Sol[i];                {pega o navio que está na posição i}
8      se i = 1 então
9          vni ← 0;                {calcula a abscissa da posição do navio alocado}
10     para p ← 1 até |IM| faça {verifica se o primeiro navio alocado irá desatracar na maré alta}
11         se ani + oni ≤ Fp então
12             se ani + oni ≥ Ip então
13                 uni ← ani;
14                 P ← P ∪ {(vni, uni)};
15                 interrompe laço;
16             senão                {desloca o navio para desatracar no início da próxima maré alta}
17                 uni ← Ip - oni;
18                 P ← P ∪ {(vni, uni)};
19                 interrompe laço;
20         fim se
21     fim se
22     fim para
23     tempo ← laytimeni - (uni + oni - ani);
24     se tempo ≥ 0 então
25         custo ← prêmio * tempo;
26     Senão
27         custo ← multa * tempo;
28     fim se
29     senão
30         custoparcial ← -M;        {atribui um valor negativo ao custo parcial}
31     para j ← 1 até |EMV| faça {percorre todos os EMV's para encontrar melhor pos. de inser.}
32         emv ← true;
33         se navio ni cabe no EMV[j] então {verifica se o navio cabe no EMS}
34             se ani + oni ≤ EMV[j]ymax então {término da oper. ocorre antes do ymáx do EMV}
35                 v'ni ← EMV[j]xmin;
36                 emv, u'ni ← encontra_posição (DN[ ], IM[ ], EMV[ ], emv);
37                 se emv = true então
38                     tempo ← laytimeni - (u'ni + oni - ani);
39                     se tempo ≥ 0 então
40                         Custoparcial' ← prêmio * tempo;
41                     senão
42                         Custoparcial' ← multa * tempo;
43                     fim se
44                     se Custoparcial' ≥ Custoparcial
45                         Custoparcial ← Custoparcial';
46                     vni ← v'ni;
47                     uni ← u'ni;
48                 fim se
49             fim se
50         fim se
51     fim se
52     fim para
53     fim se
54     Custo ← Custo + Custoparcial;
55     P ← P ∪ {(vni, uni)};    {aloca o navio na posição (vni, uni) que maximiza o prêmio}

```

```

56     EMV ← atualizalistaEMV( );
57     fim para
58     retorne P;
59 fim Procedimento

```

A construção da solução é parecida com a explicada na (Seção 4.5.2), porém no cenário do PABCRM é feito a inclusão de um loop na Linha (10), e condições nas Linhas (11) a (14), para determinar se o primeiro navio alocado está programado para desatracar durante a maré alta. Caso essa condição não seja atendida, as Linhas (17) e (18) garantem que o navio seja realocado para desatracar no início da próxima maré alta.

Essa abordagem leva em consideração a importância das condições de maré no planejamento da desatracação dos navios. Ao ajustar o momento da desatracação de acordo com as marés, aproveitando os efeitos favoráveis, garantindo um processo de liberação mais eficiente e seguro. Portanto, ao integrar essa lógica ao algoritmo, torna-o compatível com a realidade do porto estudado e ainda otimiza o uso dos recursos disponíveis.

4.5.2. Busca local

Um algoritmo de busca local parte de uma solução inicial S_0 qualquer (obtida por uma heurística construtiva, por exemplo) e caminha, a cada iteração, de vizinho para vizinho dentro do espaço de busca de acordo com a definição de vizinhança adotada. A busca se encerra quando um ótimo local é alcançado.

Devido a estrutura especial das soluções do PABC, muito similares às do Problema de Layout de Facilidades com Áreas Diferentes (PLFAD), onde as embarcações devem ser localizadas de modo a se encaixarem quase perfeitamente nos espaços reservados para elas, faz com que os ganhos obtidos pela busca local, em geral, não sejam compensados pelo esforço computacional necessário para obtê-los (PAES, 2015; GONÇALVES e RESENDE, 2014). Assim, parece muito improvável que uma pequena porção dessa solução possa ser reposicionada de modo a melhorá-la significativamente, sem criar sobreposição ou deteriorar o custo. Por esta razão, optou-se por não realizar busca local nas soluções do PABC.

Por outro lado, devido às lacunas criadas nas soluções do PABCRM impostas pelas restrições de maré, optou-se por realizar busca local em suas soluções, porém, de uma forma controlada. Assim, sempre que uma solução obtida pela heurística `ConstroiSolucaoEMV`

for uma solução de melhora, isto é, melhor que a melhor solução global, será submetida a busca local. O objetivo dessa estratégia foi tentar reduzir o esforço computacional.

O algoritmo de busca local proposto (Algoritmo 3) recebe uma série de parâmetros de entrada, incluindo o número de navios n , vetor $VDN[]$ contendo os dados dos navios, tais como: tamanho do navio LOA , tempo de operação, tempo de chegada, calado e tempo de estadia do navio no porto $laytime$; o vetor $S[]$ contendo a sequência de atracação dos navios, o vetor tarifas $VT[]$ contendo, para cada embarcação, as multas por operação acima do tempo de contrato, e os prêmios por operação finalizadas antes do prazo acordado, e o vetor de marés $VM[]$, com os limites dos intervalos de maré alta. O pseudocódigo da função pode ser resumido da seguinte forma:

Algoritmo 3 Busca Local para o PABRM

Procedimento BuscaLocal($n, S[], VDN[], VT[], VM[]$)

```

1:  $S^* \leftarrow S$ ;
2:  $melhoria \leftarrow true$ ;
3: enquanto  $melhoria = true$  faça
4:    $melhoria \leftarrow false$ ;
5:   para  $i \leftarrow 1$  até  $n - 1$  faça           {verifica todas as trocas possíveis}
6:     para  $j \leftarrow i + 1$  até  $n$  faça
7:       Seja  $S' \leftarrow S \oplus m$  uma solução vizinha de  $S$ , obtida permutando-se as
       embarcações nas posições  $i$  e  $j$ ;
10:      se embarcações  $S'[i]$  e  $S'[j]$  não sobrepõem as demais embarcações então
11:        se  $\exists k, k' \in K$ ; após a troca  $c_{S'[i]} \in [I_k, F_k]$  e  $c_{S'[j]} \in [I_{k'}, F_{k'}]$  então
12:          se  $c_{S'[i]}$  e  $c_{S'[j]}$  ocorrem depois de suas respectivas chegadas então
13:            se  $f(S') > f(S)$  então
14:               $S \leftarrow S'$ ;                       {atualiza S}
15:               $melhoria \leftarrow true$ ;
16:            fim se
17:          fim se
18:        fim se
19:      fim se
20:    fim para
21:  fim para
22: fim enquanto
23:  $S^* \leftarrow S$ ;                                   {atualiza S*}
24: retorne  $S^*$ ;
25: fim Procedimento

```

Na linha 1, S^* recebe a solução inicial S que é passada para o algoritmo. Em seguida, na linha 3, inicia-se um *loop* que continua enquanto houver melhora na solução. Dentro desse *loop*, da linha 5 a 21, a função tenta todas as permutações possíveis de navios e verifica a cada

troca se a solução vizinha gerada (linha 7) é melhor do que a solução atual. Se a solução vizinha é melhor, a variável *melhoria* é modificada para o valor *true* e a solução atual é atualizada para a solução vizinha. A solução vizinha só será válida se as seguintes condições forem satisfeitas:

- Não houver sobreposição entre os navios trocados e os demais navios (linha 10);
- Após a troca, os navios terminam suas respectivas operações $TO_{S'[i]}$ e $TO_{S'[j]}$ dentro de um intervalo de maré alta (linha 11). Os intervalos de maré alta pertencem ao conjunto K que englobam um dado horizonte de planejamento, no qual todo intervalo de maré alta $k \in K$ começa em I_k e termina em F_k ;
- Os inícios das operações dos navios trocados ocorrerem depois de suas respectivas chegadas (linha 12);
- Se o custo da solução vizinha S' for maior do que o custo da solução atual S (linha 13).

4.5.3. Pseudocódigo do AG para o PABCRM

O pseudocódigo para o GA é representado no Algoritmos 3 para o PABRM. A diferença está no procedimento de Busca Local Linha (5) que realiza a busca quando o custo do momento for maior que o maior custo guardado das soluções anteriores. Os parâmetros do algoritmo são α (Seção 3.5.6) e o tamanho da população $nPop$.

Algoritmo 4 Algoritmo Genético para PABRM

```

1  Procedimento GAPAB ( $n, \alpha, f(\cdot), nPop, nGer, txMut$ )
2       $t \leftarrow 0; k \leftarrow 0; m \leftarrow 0;$ 
3      Gere a população  $P(t)$  com base no parâmetro  $\alpha$ ;
4      Construa e avalie cada indivíduo de  $P(t)$  segundo a Equação(1);
5      se ( $\exists p_i \in P(t) \mid f(S_{p_i}) > f(S^*)$ )
6          Busca Local na solução gerada pelo indivíduo  $p_i$ ;
7      enquanto ( $k \leq nGer$  e  $m \leq MaxMut$ )
8           $k = k + 1;$ 
9      enquanto ( $P(t)$  não convergiu) faça      {laço principal que controla o n° de
gerações}
10          $t = t + 1;$ 
11         Para  $i \leftarrow 1$  até  $nPop$  faça      {gera descendentes por crossover}
12             Selecione dois pais  $p_1, p_2 \in P(t - 1)$  aleatoriamente;
13              $d \leftarrow$  Crossover ( $p_1, p_2$ );
14             Construa e avalie o indivíduo  $d$  segundo a Equação(1);
15             se ( $\exists p_i \in P(t) \mid f(S_{p_i}) > f(S^*)$ )
16                 Busca Local na solução gerada pelo indivíduo  $p_i$ ;

```

```

17           fim para
18           Selecione indivíduo sobreviventes em  $P(t)$ ;
19           Diversifique  $P(t)$  aplicando a estratégia de Diversidade Adaptativa;
20       fim enquanto
21        $m = m + 1$ ;
22       Aplique mutação em cada indivíduo de  $P(t)$ ;
23       Construa e avalie cada indivíduo de  $P(t)$  segundo a Equação(1);
24       se  $(\exists p_i \in P(t) \mid f(S_{p_i}) > f(S^*))$ 
25           Busca Local na solução gerada pelo indivíduo  $p_i$ ;
26   fim enquanto
27   Retorne  $S^*$ ;
28 fim Procedimento

```

Na linha 3 uma população inicial $P(0)$ de tamanho $nPop$ é gerado conforme mostrado na Seção 3.5.6. O método na linha 4 mostra que a cada cromossomo gerado, uma solução é construída e avaliada. Na linha (5) é realizado a busca local. No laço condicional principal entre as linhas 6 e 14 controla o número de gerações mantendo sua execução até que a condição de convergência da população seja satisfeita. A cada interação desse, o algoritmo seleciona de forma aleatória dois pais da população $P(t - 1)$, encontrado na (linha 9), para então ser realizado o *crossover* (linha 10), mostra na Seção 3.5.8. Desta forma, $nPop$ filhos gerados serão inseridos na população. Logo após a execução do laço linha 8 a 12, a população será de $2 \times nPop$ indivíduos e então, $nPop$ indivíduos sobreviventes devem ser selecionados, compondo a próxima geração $P(t)$ (linha 13). A convergência do algoritmo acontece quando uma das três condições seguintes ocorrem:

- o *gap* entre o custo médio e o custo mínimo de todos os indivíduos em $P(t)$ é menor que 0,05%;
- todos os indivíduos gerados na interação atual são iguais a algum indivíduo em $P(t - 1)$;
- $P(t) = P(t - 1) = \dots = P(t - 100)$.

Após a população convergir pela primeira vez, todos os indivíduos sofrerão $[txMutac * n]$ mutações, conforme descrito na Seção 2.11.4. Este processo irá se repetir toda vez que a população convergir, até que o número máximo de mutações *MaxMut* seja igual a $[15 - 5 * \log(0.1 * n + 1)]$, onde n é o número de embarcações, ou o número de gerações *nGer* seja alcançado. Cabe destacar, que o parâmetro *MaxMut* foi obtido após a realização de testes preliminares.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Análise de sensibilidade

Nesta análise, serão relatados os experimentos realizados com o objetivo de obter uma adequada calibração dos parâmetros dos algoritmos propostos, bem como de avaliar o impacto da técnica utilizada nesses algoritmos. A calibração foi feita considerando os dados estatísticos gerados pela execução da versão do problema PABCRM.

O algoritmo faz uso de três parâmetros principais, o alfa (α) que controla a aleatoriedade na geração da população inicial e o tamanho da população ($nPop$). Para cada configuração, foram testados os valores em dez rodadas:

- **Tamanho da população ($nPop$):** 100, 150, 200 e 250 indivíduos;
- **População Inicial (α):** 0, 3, 5, 10;

Foram combinados 4 possíveis valores de $nPop$ com 4 possíveis valores de α , gerando 16 configurações possíveis, que foram testadas para cada instância. Cada configuração foi executada 10 vezes, de forma a se obter uma média. Foi adotado 500 para o número de gerações com uma taxa de mutação de 0,3 e uma distância mínima de 0,05.

O *gap* da análise de sensibilidade é calculado pela expressão $Gap(\%) = \frac{C(max)-NBK}{NBKS}$, onde o $C(max)$ representa o custo máximo e $NBKS$ representa, para cada instância, a melhor solução encontrada dentre todas as 16 configurações. O tempo médio total $TMT(s)$ de uma determinada configuração é dado por $TMT(s) = \frac{\sum_{i=1}^{16} TMT_i}{16}$, onde TMT_i representa o tempo médio total de cada instância em 10 rodadas.

Para calcular a diferença entre um método exato e uma heurística, foi usando o conceito de GAP - *Gap Analysis*, que é uma medida da distância entre a solução encontrada pela heurística e a solução ótima fornecida pelo método exato. O cálculo do *gap* percentual foi dado da seguinte forma $Gap(\%) = \frac{S^* - S_H}{S^*} * 100$, onde o valor da solução ótima S^* foi subtraído do valor da solução heurística S_H , dividido por S^* e multiplicado por 100.

A configuração selecionada, chamada de “configuração de referência”, foi aquela com os parâmetros $nPop = 200$ e $\alpha = 5$, apresentando um equilíbrio entre a qualidade das soluções ($Gap = 0,0\%$) e o tempo de processamento ($T(s) = 6,13$ segundos), conforme é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Análise de sensibilidade dos parâmetros.

População								
	P100		P150		P200		P250	
α	Média Gap (%)	T(s)	Média Gap (%)	T(s)	Média Gap (%)	T(s)	Média Gap (%)	T(s)
0	0,29	2,18	0,24	3,43	0,13	5,00	0,13	7,21
3	0,09	2,30	0,09	3,95	0,05	6,26	0,03	7,99
5	0,12	2,37	0,05	4,14	0,00	6,13	0,01	8,76
10	0,07	3,38	0,02	4,22	0,02	6,35	0,00	8,80

Fonte: Elaboração própria, 2023.

5.2. Análise dos resultados

A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos para cada grupo de instância, descrito na Seção 4.1. Foi avaliado as instâncias com dados reais de históricos de atracções, pois o porto não conta com um modelo de otimização existente de forma avaliar o comportamento em cenários atuais de planejamento, substituindo o método intuitivo de tentativa e erro e aplicado o computacional. O CPLEX-PABC encontrou a solução ótima em todas as instâncias avaliadas, enquanto o GA-PABC não foi capaz de alcançar a solução ótima a partir de instâncias contendo 55 navios. É importante ressaltar que o tempo de solução do GA-PABC é inferior ao do CPLEX-PABC, e a diferença entre a solução ótima encontrada pelo CPLEX-PABC e a solução heurística do GA-PABC é bastante reduzida. Esse fator é de grande relevância para a aplicabilidade do modelo para auxiliar o planejamento portuário. Assim, o GA-PABC apresenta-se como uma opção viável com menor tempo computacional para solucionar instâncias menores e resultados próximos ao ótimo para instâncias maiores.

Tabela 3 - Resultados CPLEX, GA-PABC e PABCRM de dados históricos.

Grupo	Instância	CPLEX - PABC		GA-PABC			GAP (%)	GA-PABCRM		
		FO	T(s)	TMBS(s)	Melhor custo	TMT(s)		TMBS(s)	Melhor custo	TMT(s)
A	1	4737,5*	0,02	0,00	4737,5*	0,06	0,00000	0,00	4737,5	0,06
	2	11505,5*	0,01	0,00	11505,5*	0,10	0,00000	0,00	10862,5	0,10
	3	26293,5*	0,02	0,00	26293,5*	0,12	0,00000	0,00	25200,5	0,13
	4	39989,5*	0,03	0,00	39989,5*	0,14	0,00000	0,00	38176,5	0,15
B	5	55829,5*	0,05	0,00	55829,5*	0,16	0,00000	0,00	53386,5	0,18
	6	68499,5*	0,20	0,00	68499,5*	0,41	0,00000	0,00	64126,5	0,24
	7	79869,5*	0,40	0,01	79869,5*	0,78	0,00000	0,00	75406,5	0,49
	8	92161,5*	0,62	0,04	92161,5*	1,25	0,00000	0,01	87698,5	0,91
C	9	92282,5*	1,82	0,16	92282,5*	1,83	0,00000	0,08	87435,5	1,44

	10	93968,5*	2,55	0,18	93968,5*	2,55	0,00000	0,09	89121,5	2,20
	11	101628*	3,66	0,18	101627,5	2,46	0,00049	0,06	96621,5	2,18
	12	130369*	4,73	0,26	130368,5	2,94	0,00038	0,45	125631,5	4,43
D	13	142768*	3,79	0,27	142767,5	2,80	0,00035	0,50	137311,5	4,41
	14	152439*	5,67	0,30	152438,5	3,13	0,00033	0,48	146581,5	6,41
	15	159419*	8,89	0,43	159418,5	3,73	0,00031	1,34	153561,5	7,39
	16	168919*	5,30	0,35	168918,5	4,06	0,00030	1,46	163061,5	8,22
E	17	175818*	7,91	0,43	175817,5	3,89	0,00028	1,23	166281,5	7,35
	18	185668*	21,13	0,41	185667,5	4,21	0,00027	1,81	175651,5	8,74
	19	192668*	12,77	0,49	192667,5	4,82	0,00026	2,16	180921,5	11,73
	20	201569*	23,43	0,53	201568,5	5,02	0,00025	2,92	188571,5	11,94

Fonte: Elaboração própria, 2023.

5.3. Avaliação das instâncias ajustadas

Para verificar a aplicabilidade da solução do algoritmo heurístico, as instâncias foram ajustadas considerando a chegadas dos navios em horizontes de tempos próximos, incluindo navios com a mesma data de chegada. Para cada instância, foram registrados o tempo ($T(s)$) para obter a solução ótima (ou a melhor solução inteira) e o valor da Função Objetivo (FO) (ou um limite superior *Upper Bound* – UB para as instâncias em que não foi possível encontrar a solução ótima).

O tempo total de execução do CPLEX foi limitado (*TimeLimit*) em 3.600 segundos. Essa restrição tem o propósito de controlar o tempo máximo de processamento permitido para a resolução de cada instância utilizando o solver. Caso o tempo seja excedido sem que o ótimo tenha sido encontrado, a execução é interrompida e é retornado a melhor solução inteira encontrada até o momento.

Para estabelecer um tempo limite para o horizonte de planejamento T foi adotado para cada instância o tempo de chegada da última embarcação, acrescido de uma folga de 220%. Ao considerar intervalos de chegada entre dois navios consecutivos menores (instâncias ajustadas), constatou-se que o método exato não obteve sucesso em encontrar a solução ótima dentro do tempo estabelecido quando aplicado a instâncias iguais ou superiores a 80 navios.

O tempo de execução, juntamente com o valor da função objetivo são as referências para a comparação da eficiência das heurísticas GA-PABC e GA-PABCRM, onde foram analisados os tempos médios total $TMT(s)$, os melhores custos e os tempos médios das melhores soluções $TMBS(s)$, obtidos a partir de 10 rodadas para cada instância. Esses valores fornecem informações relevantes sobre o desempenho dos algoritmos em diferentes instâncias e permitem comparar a eficácia de cada abordagem na resolução do problema em questão.

Essa análise quantitativa é fundamental para a avaliação e seleção da abordagem de resolução mais adequada para o problema em estudo. Na comparação do CPLEX-PABC e GA-PABC foi demonstrado que a heurística GA-PABC teve um desempenho satisfatório, pois a solução ótima foi obtida em instâncias com até 55 navios. Tal constatação reforça a eficácia e a robustez dessa heurística como uma abordagem promissora para resolver o problema em questão. A capacidade da heurística GA-PABC em produzir soluções ótimas ou muito próximas a elas, mesmo em instâncias desafiadoras, realça sua viabilidade e aplicabilidade prática na otimização do processo de planejamento de navios.

Pode ser observado o início de um *gap* entre a solução do método exato CPLEX-PABC e a solução heurística GA-PABC a partir da instância 12 com 55 navios. A viabilidade do uso da heurística fica evidente pois, embora o método exato tenha conseguido encontrar uma solução ótima dentro do tempo estipulado para instâncias menores que 80 navios o tempo para obter a solução heurística foi muito menor e com um *gap* mínimo.

Tabela 4 - Resultados CPLEX, GA-PAB e PABRM de dados ajustados.

Grupo	Instância	CPLEX-PABC		GA-PABC			GAP (%)	GA-PABCRM		
		F.O/UB	T (s)	TMBS(s)	Melhor custo	TMT(s)		TMBS (s)	Melhor custo	TMT(s)
A	1	4737,5*	0,01	0,00	4737,5*	0,06	0,00000	0,00	4737,5	0,06
	2	11505,5*	0,02	0,00	11505,5*	0,09	0,00000	0,00	10875,5	0,10
	3	25803,5*	0,11	0,00	25803,5*	0,22	0,00000	0,00	24903,5	0,13
	4	38599,5*	0,18	0,00	38599,5*	0,26	0,00000	0,00	37429,5	0,17
B	5	52009,5*	0,30	0,00	52009,5*	0,61	0,00000	0,00	49849,5	0,57
	6	66164,5*	0,39	0,02	66164,5*	1,13	0,00000	0,02	62171,5	1,03
	7	76994,5*	0,59	0,10	76994,5*	1,33	0,00000	0,05	71831,5	1,18
	8	83742,5*	2,58	0,22	83742,5*	1,90	0,00000	0,16	76915,5	1,82
C	9	80760,5*	2,96	0,74	80760,5*	3,84	0,00000	1,11	74147,5	4,42
	10	82446,5*	7,09	0,82	82446,5*	5,01	0,00000	0,83	75533,5	4,25
	11	90106,5*	14,44	1,53	90106,5*	5,58	0,00000	1,05	82813,5	4,44
	12	116646*	20,37	1,26	116645,5	5,88	0,00043	0,98	108653,5	5,61
D	13	128777*	22,89	2,36	128776,5	7,02	0,00039	1,61	120233,5	5,54
	14	137327*	27,45	1,77	137326,5	8,28	0,00036	1,74	128783,5	7,27
	15	128546*	777,31	4,48	128526,5	9,29	0,01517	5,29	118223,5	13,14
	16	137051	3600	4,29	135456,5	10,44	1,16344	2,86	123743,5	12,09
E	17	141571	3600	6,01	140396,5	12,89	0,82962	3,89	127723,5	12,34
	18	150447	3600	6,03	147096,5	12,27	2,22703	4,65	132893,5	13,73
	19	154669	3600	8,76	152656,5	16,76	1,30117	10,88	135833,5	21,05
	20	160129	3600	10,02	158676,5	19,78	0,90708	8,91	140623,5	23,36

Fonte: Elaboração própria, 2023.

Para instâncias maiores ou iguais a 80 navios (D16) com limite de tempo de 1 hora, o CPLEX-PABC não foi capaz de encontrar a solução ótima. Na tentativa de obter a solução ótima, o CPLEX foi executado novamente, porém, estabelecendo como limite inferior para a função objetivo (*lower cutoff*) a melhor solução inteira encontrada na última rodada, através do parâmetro *CutLo* do CPLEX, conforme é apresentado na terceira coluna da Tabela 5. Esse processo continuou até que o ótimo fosse encontrado, sempre definindo como limite inferior a melhor solução inteira da última rodada.

Por meio desse processo foi possível obter o ótimo para as instâncias mencionadas, porém, com um alto custo computacional, fato este demonstrado na sexta coluna da Tabela 5 por meio dos tempos computacionais acumulados. Por outro lado, a abordagem heurística GA-PABC mostrou-se eficiente apresentando *gaps* inferiores a 0, 02% (Tabela 5) com baixo custo computacional (Tabela 4).

Tabela 5 - Tempos utilizando o *CutLo*.

Instância	CPLEX-PABC					GA-PABC	
	Navios	<i>CutLo</i>	F.O	Rodadas	Tempo de Execução (s)	Melhor custo	<i>GAP</i> (%)
16	80	135456,5	135476*	2	4006,68	135456,5	0,01439
17	85	140396,5	140397*	2	4503,89	140396,5	0,00036
18	90	147096,5	147117*	3	9520,82	147096,5	0,01393
19	95	152656,5	152677*	3	9195,23	152656,5	0,01343
20	100	158676,5	158697*	5	15758,7	158676,5	0,01292

Fonte: Elaboração própria, 2023.

Pode-se observar que o aumento no tempo de resolução do GA-PABC se mantém com pouca variação ao longo das instâncias. Das duas variações do problema implementado, a heurística GA-PABCRM é a mais complexa, devido às restrições impostas pela variação da maré. No entanto, é evidente que o CPLEX-PABC apresenta um aumento significativo no tempo de solução a partir de 50 navios. Isso demonstra que o método heurístico utilizado apresentou soluções em um tempo computacional favorável.

A estabilidade do tempo de resolução do GA-PABC ao longo da variação da quantidade de navios indica que o algoritmo é capaz de lidar eficientemente com diferentes tamanhos de instâncias do problema. Por outro lado, o CPLEX-PABC parece encontrar dificuldades crescentes à medida que a quantidade de navios aumenta, o que é evidenciado pelo aumento acentuado no tempo de solução para instâncias (Gráfico 1). Portanto, ao considerar o tempo

computacional como um fator crítico para o planejamento de atracções de navios, o GA-PABC se destaca como uma abordagem promissora. Seu desempenho consistente, mesmo em cenários com uma quantidade significativa de navios, sugere que ele pode ser uma opção viável para otimizar a alocação de recursos em portos e terminais marítimos.

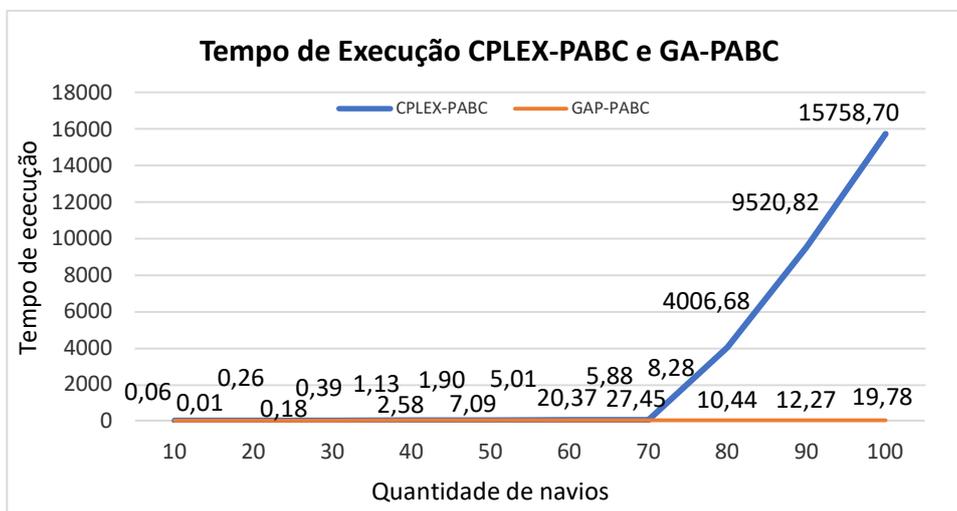


Gráfico 1: Comparação de tempos de execução CPLEX e GA-PAB.

5.4. Comparação entre as heurísticas

Da mesma forma que a comparação entre o CPLEX-PABC e a heurística GA-PABC foi realizada, é importante validar a comparação entre as heurísticas como parte do processo de avaliação da eficiência do método GA-PABCRM. Essa validação se torna crucial para a análise da capacidade e desempenho do método em lidar com as complexidades e nuances introduzidas pelas variações de maré no contexto do problema abordado.

Por meio dessa comparação, é possível avaliar a eficácia e robustez do método GA-PABCRM, e assim, embasar sua aplicação prática como uma alternativa promissora para otimizar o processo de programação de navios, considerando devidamente os fatores relacionados às variações de maré.

O Gráfico 2 revela que o tempo de execução entre as duas variantes é aproximadamente o mesmo em alguns casos. Para instâncias com até 10 navios o tempo de resolução foi o mesmo, enquanto para instância variando de 20 a 70 navios, o método GA-PABCRM obteve um tempo de resolução ligeiramente melhor. A partir de 80 navios, a performance em termos de tempo do GA-PABC foi superior. Essa comparação é necessária, pois demonstra de maneira direta que, mesmo sendo um problema mais complexo devido às restrições de maré, o GA-PABCRM é eficiente em termos de tempo.

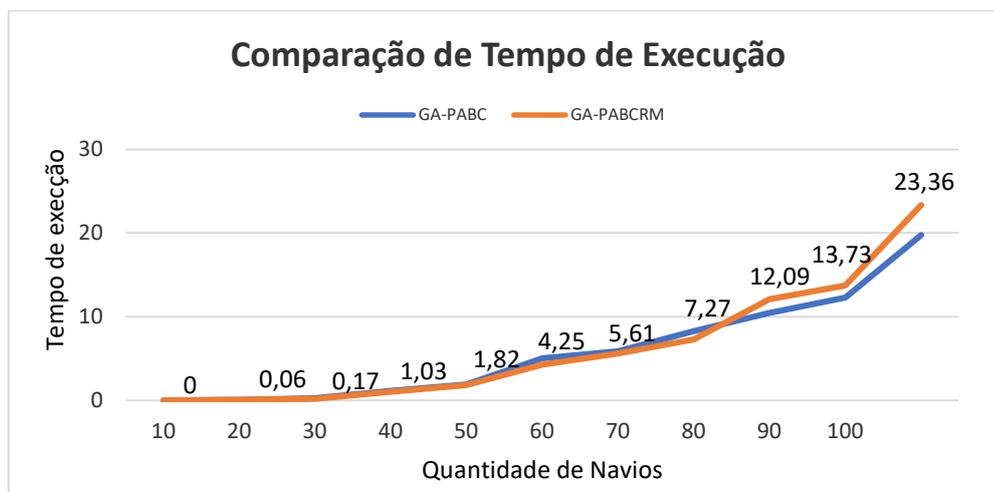


Gráfico 2: Comparação de tempo de execução GA-PABC e GA-PABCRM.

5.5. Avaliação da influência do aumento do cais

Diante da possibilidade de investimentos para aumentar a capacidade de atendimento do porto, decidiu-se verificar a influência de expansões futuras do cais no desempenho da solução. O teste foi baseado na área disponível para a construção do cais.

A avaliação do panorama de ampliação das atividades portuárias foi executada empregando a mesma metodologia empregada na análise do cenário presente. Os desfechos decorrentes dessa investigação estão expostos na Tabela 6, a qual sintetiza os principais resultados alcançados. Esse conjunto de dados fundamentais proporciona uma visão aprofundada e embasada da viabilidade e dos efeitos da expansão pretendida, fornecendo subsídios essenciais para a tomada de decisões no âmbito do planejamento estratégico.

Especificamente, constatou-se que o *gap* é de 0,96% para instâncias com até 15 navios do GA-PABCRM, quando o aumento percentual do cais é de 25%. No entanto, para os demais incrementos percentuais, não foi identificado nenhum *gap*. Os resultados indicam que, até 15 navios, o efeito prático da expansão do cais é consideravelmente baixo. Na comparação do GA-PABRM com o GA-PABRM em um cais padrão de 500 metros de comprimento acrescido de 25% ao tamanho total, o efeito do custo começa a ser notado a partir de instâncias com 15 navios.

Observou-se uma diferença entre as instâncias do GA-PABCRM com aumento de 50% no cais em relação às demais, que justifique o investimento. À medida que o cais aumenta o custo e o tempo de execução melhoram conforme esperado, devido a influência do tamanho do

cais na alocação efetiva de navios nos berços. Porém, deve-se ter um equilíbrio entre gastos com infraestrutura e melhoria efetiva de receita. Na média geral, com um tempo total de 8,75 s e com um *gap* de 8,64, a expansão do cais em 50% equilibra os gastos em relação ao custo com infraestrutura, melhor solução e tempo de execução.

Tabela 6 - Gaps entre a expansão do cais.

Grupo	Instância	GA-PABCRM + 25%		GA-PABCRM 50%		GA-PABCRM 75%		GA-PABCRM 100%	
		TMT(s)	GAP(%)	TMT(s)	GAP(%)	TMT(s)	GAP(%)	TMT(s)	GAP(%)
A	1	0,06	0,00	0,06	0,00	0,06	0,00	0,06	0,00
	2	0,10	0,00	0,11	0,00	0,11	0,00	0,11	0,00
	3	0,14	0,96	0,15	0,00	0,15	0,00	0,15	0,00
	4	0,17	0,64	0,18	0,00	0,20	0,00	0,20	0,00
B	5	0,56	0,48	0,34	3,59	0,44	1,56	0,25	0,00
	6	1,03	0,39	0,49	4,54	0,60	1,24	0,33	0,00
	7	1,26	0,33	0,65	6,81	0,70	1,05	0,37	0,00
	8	3,10	3,32	1,55	13,48	1,46	1,60	0,47	0,00
C	9	3,14	9,32	2,18	13,55	2,13	1,56	0,66	0,00
	10	3,57	9,15	2,54	13,32	2,54	1,54	0,75	0,00
	11	3,85	8,35	2,82	12,24	2,68	1,43	0,80	0,00
	12	5,01	8,57	3,07	9,31	3,28	1,12	0,98	0,00
D	13	5,59	8,34	3,27	8,43	3,36	1,02	1,02	0,00
	14	6,78	7,79	3,75	7,91	4,97	0,96	1,29	0,00
	15	19,94	13,32	18,04	13,08	13,11	3,40	6,90	0,48
	16	26,17	14,35	22,08	13,34	10,17	3,21	8,59	0,45
E	17	28,55	13,95	21,81	12,96	10,51	3,13	7,51	0,44
	18	30,01	13,41	24,38	13,31	15,47	3,58	6,63	0,42
	19	46,19	15,32	32,89	13,49	18,03	3,44	8,28	0,41
	20	35,09	16,66	34,58	13,37	21,15	3,29	9,19	0,39
Média		11,02	7,23	8,75	8,64	5,56	1,66	2,73	0,13

Fonte: Elaboração própria, 2023.

A análise do gráfico revela que as expansões de 50% apresentam os desvios médios mais elevados. Esses resultados indicam que, em termos de custo-benefício, uma expansão de 50% pode ser considerada a opção mais vantajosa. No entanto, uma expansão de 25% também pode ser aceita como uma solução intermediária, pois demonstra desvios médios próximo dos observados nas expansões de 50%. Essa constatação sugere que a escolha entre as duas opções de expansão depende do equilíbrio desejado entre eficiência e custo, sendo a expansão de 50% mais eficaz, é possivelmente mais dispendiosa, enquanto a expansão de 25% representa uma boa viabilidade como um ponto de partida da expansão. No entanto para esse cenário a expansão

de 75% ou de 100%, ou seja, dobrando o tamanho do cais, não é economicamente viável, pois o aumento de eficiência da solução e tempo, não justificam os recursos empregados.

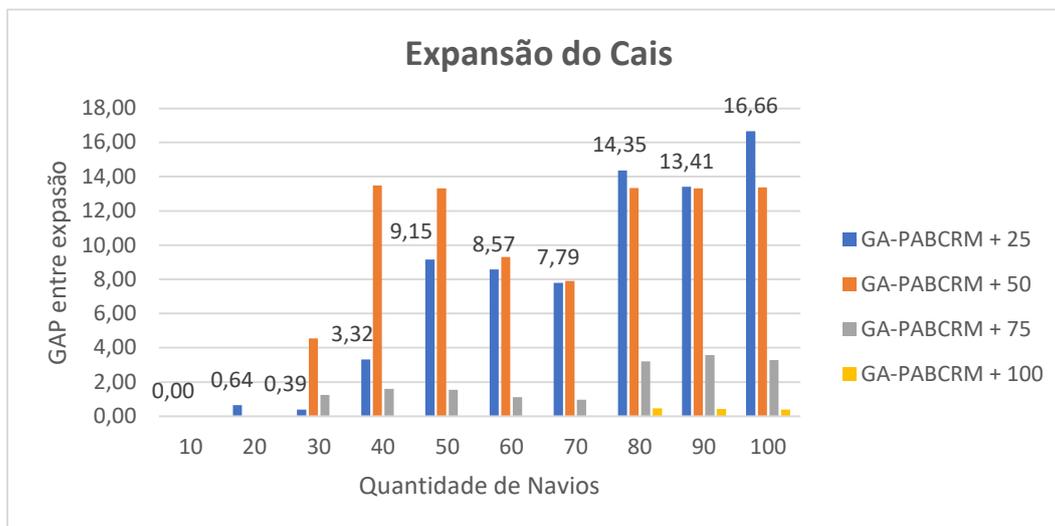


Gráfico 3: Comparação do melhor custo entre GA-PABC e GA-PABCRM valores históricos

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi abordado o problema de alocação de berços para múltiplas cargas com restrições temporais e espaciais, conhecido na literatura como Problema de Alocação de Berços Contínuo (PABC) e uma variante deste, conhecido como Problema de Alocação de Berços Contínuo com Restrições de Maré (PABCRM). Ambos os problemas com complexidade NP-difícil.

Para o primeiro problema, foi proposto um modelo exato de PLIM, um Algoritmo Genético e instâncias de pequeno, médio e grande porte, todas baseadas em dados reais do porto estudado. Na primeira abordagem, o método exato encontrou a solução ótima em todas as instâncias, enquanto a heurística, embora não tenha encontrado o ótimo para instâncias de grande porte, apresentou *gaps* inferiores a 0,001%. Quanto ao segundo problema, foi proposto o mesmo Algoritmo Genético adaptado para respeitar as restrições de maré, porém, incluindo uma heurística de busca local para aprimorar as melhores soluções encontradas pelo AG. As mesmas instâncias foram adaptadas para incluir os intervalos de maré e testadas nessa nova abordagem com êxito. Não foi implementado nenhum modelo exato para o PABCRM por conta da sua complexidade computacional.

No decorrer dos testes computacionais, percebeu-se que o problema se torna mais difícil de ser resolvido de forma exata, na medida em que os intervalos entre os tempos de chegada de embarcações consecutivas são reduzidos. Assim, para testar a robustez das abordagens heurísticas, foram geradas novas instâncias com os tempos de chegada ajustados, simulando um aumento do fluxo de navios no porto. Nesse novo cenário, a abordagem exata do PABC teve dificuldades para encontrar a solução ótima para as instâncias maiores que 80 navios dentro do tempo limite estipulado de 3600 segundos não foi suficiente para uma solução viável, enquanto a abordagem heurística obteve êxito com *gaps* inferiores a 2,5% e com tempos de processamento reduzidos.

Considerando que o método extado proposto para resolver o PABC não foi capaz de fornecer soluções ótimas de forma eficiente para instâncias ajustadas maiores de 80 navios, dessa forma a técnicas heurísticas surge como uma abordagem natural para obter soluções ótimas em muitas instâncias e próximas do ótimo em instâncias de grande porte em tempo computacional inferior ao método exato.

Devido à sua facilidade de implementação e robustez, o Algoritmo Genético (AG) é uma escolha viável para abordar o desafio da alocação dos navios no cais de atracação. Os

resultados obtidos destacam claramente o potencial da abordagem proposta, na qual soluções de alta qualidade são alcançadas para instâncias grandes, com tempos de execução aceitáveis.

A expansão do cais pode ser encarada como algo que agrega valor, porém pode ser realizada em etapas, onde o aumento em 25% causaria um impacto positivo e o aumento em 50% seria a forma ideal de consolidação da receita.

A algoritmo provou ser robusto para encontrar soluções ótimas em instâncias de pequeno e médio porte e soluções muito boas em um tempo para as de grande porte. Para o horizonte de planejamento usualmente utilizado em terminais marítimos, o algoritmo mostrou capacidade de resolução. Essa solução oferece benefícios significativos em termos de redução de custos, uma vez que permitem diminuir o tempo de permanência dos navios no porto, resultando lucros financeiros por melhor aproveitamento dos recursos disponíveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

‘ANTAQ’ (2021) *Boletim Aquaviário - 4º trimestre de 2021*, p. 6.

Ávila, S.L. (2002) *Algoritmos Genéticos Aplicados na Otimização de Antenas Refletoras*. Mestre em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Santa Catarina.

BARROS, V.H. (2010) *Problema de Alocação de Berços em Portos Graneleiros com Restrições de Estoque e Condições Favoráveis de Maré*. Universidade Federal do Maranhão.

Bisogno, M. *et al.* (2015) ‘Improving the efficiency of Port Community Systems through integrated information flows of logistic processes’, *The International Journal of Digital Accounting Research*, 15. Available at: https://doi.org/10.4192/1577-8517-v15_1.

BOAVIATSI, M. (2022) ‘Comparative analysis of charter party clauses versus marine insurance contractual terms: present legal status and future trends’, *WMU Journal of Maritime Affairs* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.1007/s13437-022-00292-0>.

BOUZEKI, H., ALPAN, G. and GIARD, V. (2021) ‘Integrated Laycan and Berth Allocation and time-invariant Quay Crane Assignment Problem in tidal ports with multiple quays’, *European Journal of Operational Research*, 293(3), pp. 892–909. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.12.056>.

BROOKS, M.R. (2004) ‘The Governance Structure of Ports’, *Review of Network Economics*, 3(2). Available at: <https://doi.org/10.2202/1446-9022.1049>.

CARNEVALLI, J.A. and MIGUEL, P.A.C. (2001) ‘Desenvolvimento da pesquisa de campo, amostra e questionário para realização de um estudo tipo survey sobre a aplicação do ...’, p. 8.

CHM (2022) ‘Centro de Hidrografia da Marinha’. Available at: <https://www.marinha.mil.br/chm/> (Accessed: 23 November 2022).

COLLYER, W.O. (2016) *Lei dos Portos: O Conselho de Autoridade Portuária e a Busca da Eficiência*. São Paulo: Lex Editora.

CORDEAU, J.F. *et al.* (2005) ‘Models and Tabu Search Heuristics for the Berth-Allocation Problem’, *Transportation Science*, 39(4), pp. 526–538. Available at: <https://doi.org/10.1287/trsc.1050.0120>.

CORTÊS, C.F.M. (2010) *Otimização do projeto da superestrutura de pontes pré-fabricadas pelo método dos algoritmos genéticos*. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Cruz, F.R.B. *et al.* (2012) ‘Throughput Maximization of Queueing Networks with Simultaneous Minimization of Service Rates and Buffers’, *Mathematical Problems in Engineering*, 2012, pp. 1–19. Available at: <https://doi.org/10.1155/2012/692593>.

Elwany, M.H., Ali, I. and Abouelseoud, Y. (2013) ‘A heuristics-based solution to the continuous berth allocation and crane assignment problem’, *Alexandria Engineering Journal*, 52(4), pp. 671–677. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2013.09.001>.

Ernst, A.T. *et al.* (2017) ‘Mathematical models for the berth allocation problem in dry bulk terminals’, *Journal of Scheduling*, pp. 20, 459–473.

Feo, T.A. and Resende, M.G.C. (1995) ‘Greedy Randomized Adaptive Search Procedures’, *Journal of Global Optimization*, 6(2), pp. 109–133. Available at: <https://doi.org/10.1007/BF01096763>.

FILITTO, D. (2008) ‘Algoritmos Genéticos: Uma Visão Exploratória’, *Saber Acadêmico*, (6), p. 8.

Gao, C. *et al.* (2010) ‘A proactive and reactive framework for berth allocation with uncertainties’, *IEEE International Conference on Advanced Management Science* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.1109/ICAMS.2010.5553267>.

Garey, M.R. and Johnson, D.S. (2009) *Computers and intractability: a guide to the theory of NP-completeness*. 27. print. New York [u.a]: Freeman (A series of books in the mathematical sciences).

GIALLOMBARDO, G. *et al.* (2010) ‘Modeling and solving the Tactical Berth Allocation Problem’, *Modeling and solving the Tactical Berth Allocation Problem*, 44, pp. 232–245. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2009.07.003>.

GIL, A.C. (2017) *Como Elaborar Projetos de Pesquisa*. 6^a. São Paulo: Atlas.

Góes, A.R.T. (2005) ‘Otimização na distribuição da carga horária de professores - Método extao, método heurístico, método misto e interface’.

GOUVEIA, L.B. *et al.* (2021) ‘Algoritmos genéticos: aplicados a teoria a um estudo de caso.pdf’, *Brazilian Journal of Development*, v.7, p. 25. Available at: <https://doi.org/10.34117/bjdv7n3-016>.

Grant, D.B. (2013) *Gestão de Logística e Cadeia de Suprimentos*. 1 ed. São Paulo: Saraiva.

Guan, Y. and Cheung, R.K. (2004) ‘The berth allocation problem- models and solution methods’, *OR Spectrum*, p. 26. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00291-003-0140-8>.

IMAI, A. *et al.* (2005) ‘Berth allocation in a container port: using a continuous location space approach’, *Transportation Research Part B: Methodological*, 39(3), pp. 199–221. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2004.04.004>.

Imai, A., Nagaiwa, K. and Tat, C.W. (1997) ‘Efficient planning of berth allocation for container terminals in Asia’, *Journal of Advanced Transportation*, 31(1), pp. 75–94. Available at: <https://doi.org/10.1002/atr.5670310107>.

IMAI, A., NISHIMURA, E. and PAPADIMITRIOU, S. (2001) ‘The dynamic berth allocation problem for a container port’, *Transportation Research Part B: Methodological*, 35(4), pp. 401–417. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0191-2615\(99\)00057-0](https://doi.org/10.1016/S0191-2615(99)00057-0).

Kelareva, E. *et al.* (2012) ‘CP and MIP Methods for Ship Scheduling with Time-Varying Draft’, *Proceedings of the International Conference on Automated Planning and Scheduling*, 22, pp. 110–118. Available at: <https://doi.org/10.1609/icaps.v22i1.13494>.

KRAMER, A. *et al.* (2019) ‘Novel formulations and modeling enhancements for the dynamic berth allocation problem’, *European Journal of Operational Research*, 278(1), pp. 170–185. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.03.036>.

Lai, K.K. and Chan, J.W.M. (1997) ‘Developing a simulated annealing algorithm for the cutting stock problem’, *Computers & Industrial Engineering*, 32(1), pp. 115–127. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(96\)00205-7](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(96)00205-7).

LEÓN, A.D. *et al.* (2021) ‘A simulation–optimization framework for enhancing robustness in bulk berth scheduling’, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 103, p. 104276. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2021.104276>.

LIGTERINGEN, H. (2017) *Ports and terminals*.

Longaray, A.A. (2014) *Introdução à Pesquisa Operacional*. São Paulo: Saraiva.

Ludke, M., Marli, D.A. and A., A. (1986) *Pesquisa em Educação Abordagens Quantitativas*. São Paulo.

MAGALHÃES, A.C.R. (2018) *Marés e Correntes na Otimização de Manobras de Navios na Baía de São Marcos*.

Magalhães, A.C.R. (2018) ‘Universidade Dederá do Maranhão Programa de Pós-Graduação em Oceanografia’, p. 52.

MARINHA DO BRASIL (2022) ‘Ministério da Defesa Marinha do Brasil’. Available at: <https://www.marinha.mil.br/> (Accessed: 23 November 2022).

OLIVEIRA, R.M., MAURI, G.R. and NOGUEIRA, L.A. (2012) ‘Heurística para solução do Problema de Alocação de Berços em Terminais Marítimos’, p. 8.

Paes, F.G. (2015) *Algoritmos Evolutivos Aplicados aos Problemas de Layout de Facilidades com Áreas Diferentes e Escalonamento de Tarefas sem Espera*. Universidade Federal Fluminense.

PAES, F.G., PESSOA, A.A. and VIDAL, T. (2017) ‘A hybrid genetic algorithm with decomposition phases for the Unequal Area Facility Layout Problem’, *European Journal of Operational Research*, 256(3), pp. 742–756. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.07.022>.

Park, Y.-M. and Kim, K.H. (2003) ‘A scheduling method for Berth and Quay cranes’, *OR Spectrum*, p. 23.

Pedreira, A.F. (2006) *Os Recentes Avanços da Multimodalidade no Brasil*. Mestre em Engenharia de Produção. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Available at: <https://doi.org/10.17771/PUCRio.acad.8762>.

Pizzani, L. *et al.* (2012) ‘A arte da pesquisa bibliográfica na busca do conhecimento’, *RDBCI: Revista Digital de Biblioteconomia e Ciência da Informação*, 10(1), p. 53. Available at: <https://doi.org/10.20396/rdbci.v10i1.1896>.

PORTO DO AÇU (2017) ‘O Encontro da Eficiência com a infraestrutura completa’.

PORTO DO AÇU (2020) ‘Fazendo Negócios no Porto do Açú’.

PORTO DO AÇU (2022) ‘Terminal Multicargas’.

Rodrigues, I.B.G. *et al.* (2016) ‘Modelo matemático para o Problema de Alocação de Berços em portos com limitações de operação de carga ao longo do cais’, *Gestão & Produção*, 23(4), pp. 771–786. Available at: <https://doi.org/10.1590/0104-530x2266-15>.

RODRIGUES, I.B.G. and ROSA, R.A. (2013) ‘Modelo Matemático para o problema de alocação de berços contínuo (PABC) com restrições espaciais e temporais aplicado a uma base de apoio a plataforma de petróleo’, p. 12.

ROSA, R.A. (2006) *Portos Conceitos Essenciais Uma visão histórica e técnica*. Vitória: ihges.

SALGADO, L.H. *et al.* (2012) ‘Modernização e Simplificação Regulatória no Setor Portuário’, *Ipea - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada*, pp. 1–9.

Silva, M.M. (2011) *Otimização de Estruturas Reticuladas Incluindo Não-Linearidade Geométrica*.

Silva, S.D. (2010) *A Utilização de jogos de empresa como instrumento pedagógico de apoio à formação de profissional da área portuária*. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Silva, V.M.D. (2008) *Um modelo heurístico para alocação de navios em berços*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal de Santa Catarina.

Silva, V.M.D. and Coelho, A.S. (2007) ‘Revisão sobre o Problema de Alocação de Berços’, *Simpósio de Pesquisa Operacional e Logística da Marinha*, p. 11.

Stefanello, F. (2011) ‘HIBRIDIZAÇÃO DE MÉTODOS EXATOS E HEURÍSTICOS PARA RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO COMBINATÓRIA’.

STOPFORD, M. (2009) *Maritime economics*. 3rd ed. London ; New York: Routledge.

Tang, L., Li, S. and Liu, J. (2008) ‘Dynamically scheduling ships to multiple continuous berth spaces in an iron and steel complex’. Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1475-3995.2009.00662.x>.

T-MULT (2017) ‘T-MULT’. Available at: <https://portodoacu.com.br/terminal-multicargas/> (Accessed: 26 September 2022).

TOLEDO, R. de A. (1998) *Uma Aplicação de Simulação Estocástica no Gerenciamento de Filas de Navios*. Universidade Federal do Espírito Santo.

TOVAR, A.C.A. and FERREIRA, G.C.M. (2006) ‘A Infra-Estrutura Portuária Brasileira: O Modelo Atual e Perspectivas para seu Desenvolvimento Sustentado’, 13, pp. 209–230.

UNCTAD (2021). United Nations Conference on Trade and Development. Review of Maritime Transport 2021. Geneva, 2021: United Nations, p. 15.

Vergara, S.C. (2016) *Projetos e Relatórios de Pesquisa em Administração*. 16^a. São Paulo: Atlas.

Vervloet, H.L.L. (2015) *Modelo matemático para planejamento da atracação de navios de granel considerando o cálculo de prêmio e multa*.

Vervloet, H.L.L. and Rosa, R.A. (2016) 'Modelo matemático para planejamento da atracação de navios sob o contrato de Charter Party', *TRANSPORTES*, 24(1), p. 84. Available at: <https://doi.org/10.14295/transportes.v24i1.976>.

VIDAL, T. *et al.* (2013) 'A hybrid genetic algorithm with adaptive diversity management for a large class of vehicle routing problems with time-windows', *Computers & Operations Research*, 40(1), pp. 475–489. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2012.07.018>.

Wang, Z. and Sarkis, J. (2013) 'Investigating the relationship of sustainable supply chain management with corporate financial performance', *International Journal of Productivity and Performance Management*, 62(8), pp. 871–888. Available at: <https://doi.org/10.1108/IJPPM-03-2013-0033>.

XU, L. and JHANG, S.E. (2020) 'Keyword analyses of English charter parties', *Linguistic Research*, 37(2), pp. 267–288. Available at: <https://doi.org/10.17250/KHISLI.37.2.202006.004>.

ZELAYA, L.G. *et al.* (2015) 'Logística portuária brasileira sua evolução do setor e perspectivas', p. 28.

ZHEN, L. *et al.* (2017) 'Daily berth planning in a tidal port with channel flow control', *Transportation Research Part B: Methodological*, 106, pp. 193–217. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2017.10.008>.

ZHOU, P.F. and KANG, H.G. (2008) 'Study on Berth and Quay-crane Allocation under Stochastic Environments in Container Terminal', *Systems Engineering - Theory & Practice*, 28(1), pp. 161–169. Available at: [https://doi.org/10.1016/S1874-8651\(09\)60001-6](https://doi.org/10.1016/S1874-8651(09)60001-6).

APÊNDICE A: Custo máximo e tempo médio do PABC

Tabela A.1 - Custo máximo C(Max) de cada variante do PABC.

Instância	New_T(s)	P100_G50	P100_G53	P100_G55	P100_G510	P150_G50	P150_G53	P150_G55	P150_G510	P200_G50	P200_G53	P200_G55	P200_G510	P250_G50	P250_G53	P250_G55	P250_G510
PABC_05N	0,09	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,04	0,06	0,06	0,06	0,06	0,08	0,09	0,09	0,09
PABC_10N	0,14	0,03	0,03	0,03	0,03	0,06	0,06	0,06	0,06	0,09	0,10	0,09	0,09	0,13	0,14	0,14	0,13
PABC_15N	0,33	0,07	0,07	0,07	0,08	0,15	0,16	0,14	0,14	0,19	0,22	0,22	0,23	0,29	0,32	0,33	0,33
PABC_20N	0,37	0,09	0,10	0,12	0,09	0,15	0,20	0,17	0,16	0,24	0,26	0,26	0,26	0,34	0,37	0,37	0,37
PABC_25N	0,86	0,19	0,21	0,21	0,21	0,36	0,38	0,38	0,57	0,56	0,61	0,61	0,59	0,81	0,85	0,86	0,83
PABC_30N	2,50	0,44	0,40	0,41	0,43	0,72	0,69	0,71	0,76	1,09	1,08	1,13	1,13	1,49	1,54	1,59	2,50
PABC_35N	2,09	0,49	0,50	0,54	0,54	0,91	0,88	0,92	0,92	1,36	1,38	1,33	1,50	1,99	1,91	2,09	2,00
PABC_40N	2,77	0,66	0,68	0,70	0,76	1,08	1,30	1,25	1,47	1,71	1,86	1,90	1,97	2,34	2,64	2,77	2,72
PABC_45N	5,13	1,33	1,38	1,47	1,33	2,15	2,46	2,53	2,56	3,47	3,63	3,84	3,55	4,89	4,90	5,13	4,36
PABC_50N	7,41	1,92	1,92	1,64	1,60	3,12	3,52	3,14	2,85	5,10	5,31	5,01	4,75	6,64	7,19	6,97	7,41
PABC_55N	7,91	1,73	2,06	2,07	2,05	2,82	3,34	3,42	3,24	4,24	5,33	5,58	5,52	7,39	6,94	6,96	7,91
PABC_60N	8,97	2,06	2,63	2,47	2,75	3,25	4,63	4,54	3,62	5,21	6,65	5,88	6,41	7,68	8,97	8,24	8,35
PABC_65N	10,43	1,86	2,47	2,41	2,38	3,60	4,69	4,33	3,52	4,82	6,74	7,02	6,33	7,91	9,06	10,43	10,22
PABC_70N	11,6	2,33	3,15	3,26	2,40	3,65	5,14	4,82	4,16	5,52	8,37	8,28	7,62	9,92	11,57	10,46	11,60
PABC_75N	15,21	3,45	3,50	4,24	3,72	5,00	6,84	6,07	10,27	8,87	8,48	9,29	10,51	12,00	12,30	15,21	14,98
PABC_80N	16,53	3,58	4,10	4,19	4,61	8,13	7,03	6,65	7,35	9,76	10,54	10,44	12,97	12,65	15,54	14,43	16,53
PABC_85N	17,02	3,36	3,70	3,87	4,46	5,50	7,24	7,69	9,35	9,30	12,07	12,89	12,40	11,72	14,01	15,97	17,02
PABC_90N	18,98	4,07	5,29	5,16	4,50	6,72	7,10	9,11	7,41	8,82	10,10	12,27	12,89	12,45	14,46	18,23	18,98
PABC_95N	26,36	8,55	5,84	6,13	6,42	9,90	11,01	11,64	12,08	13,33	21,85	16,76	18,37	20,15	21,62	26,36	24,86
PABC_100N	28,64	7,44	7,85	8,30	9,13	11,32	12,34	15,15	13,77	16,34	20,50	19,78	19,92	23,32	25,39	28,64	24,80

Tabela A.2 - Tempo médio total (TMT) de cada variante do PABC.

Instancia	New_BKS (ii)	P100_GSO	P100_GS3	P100_GS5	P100_GS10	P150_GSO	P150_GS3	P150_GS5	P150_GS10	P200_GSO	P200_GS3	P200_GS5	P200_GS10	P250_GSO	P250_GS3	P250_GS5	P250_GS10
PABC_05N	4737,5	4737,5	4737,5	4737,5	4737,5	4737,5	4737,5	4737,5	4737,5	4737,5	4737,5	4737,5	4737,5	4737,5	4737,5	4737,5	4737,5
PABC_10N	11505,5	11505,5	11505,5	11505,5	11505,5	11505,5	11505,5	11505,5	11505,5	11505,5	11505,5	11505,5	11505,5	11505,5	11505,5	11505,5	11505,5
PABC_15N	25803,5	25803,5	25803,5	25803,5	25803,5	25803,5	25803,5	25803,5	25803,5	25803,5	25803,5	25803,5	25803,5	25803,5	25803,5	25803,5	25803,5
PABC_20N	38599,5	38599,5	38599,5	38599,5	38599,5	38599,5	38599,5	38599,5	38599,5	38599,5	38599,5	38599,5	38599,5	38599,5	38599,5	38599,5	38599,5
PABC_25N	52009,5	52009,5	52009,5	52009,5	52009,5	52009,5	52009,5	52009,5	52009,5	52009,5	52009,5	52009,5	52009,5	52009,5	52009,5	52009,5	52009,5
PABC_30N	66164,5	66164,5	66164,5	66164,5	66164,5	66164,5	66164,5	66164,5	66164,5	66164,5	66164,5	66164,5	66164,5	66164,5	66164,5	66164,5	66164,5
PABC_35N	76994,5	76994,5	76994,5	76994,5	76994,5	76994,5	76994,5	76994,5	76994,5	76994,5	76994,5	76994,5	76994,5	76994,5	76994,5	76994,5	76994,5
PABC_40N	83742,5	83742,5	83742,5	83742,5	83742,5	83742,5	83742,5	83742,5	83742,5	83742,5	83742,5	83742,5	83742,5	83742,5	83742,5	83742,5	83742,5
PABC_45N	80760,5	80760,5	80760,5	80760,5	80760,5	80760,5	80760,5	80760,5	80760,5	80760,5	80760,5	80760,5	80760,5	80760,5	80760,5	80760,5	80760,5
PABC_50N	82446,5	82446,5	82446,5	82446,5	82446,5	82446,5	82446,5	82446,5	82446,5	82446,5	82446,5	82446,5	82446,5	82446,5	82446,5	82446,5	82446,5
PABC_55N	90106,5	90106,5	90106,5	90106,5	90106,5	90106,5	90106,5	90106,5	90106,5	90106,5	90106,5	90106,5	90106,5	90106,5	90106,5	90106,5	90106,5
PABC_60N	116646,5	116646,5	116646,5	116646,5	116646,5	116646,5	116646,5	116646,5	116646,5	116646,5	116646,5	116646,5	116646,5	116646,5	116646,5	116646,5	116646,5
PABC_65N	128776,5	128776,5	128776,5	128776,5	128776,5	128776,5	128776,5	128776,5	128776,5	128776,5	128776,5	128776,5	128776,5	128776,5	128776,5	128776,5	128776,5
PABC_70N	137326,5	137326,5	137326,5	137326,5	137326,5	137326,5	137326,5	137326,5	137326,5	137326,5	137326,5	137326,5	137326,5	137326,5	137326,5	137326,5	137326,5
PABC_75N	128546,5	128526,5	128546,5	128526,5	128526,5	128526,5	128546,5	128526,5	128526,5	128526,5	128546,5	128526,5	128526,5	128526,5	128546,5	128526,5	128526,5
PABC_80N	135476,5	134096,5	134726,5	135216,5	135476,5	134726,5	135456,5	134726,5	135476,5	135456,5	135476,5	135456,5	135456,5	135456,5	135476,5	135456,5	135456,5
PABC_85N	140396,5	138466,5	139012,5	140376,5	139746,5	138466,5	139746,5	140376,5	140396,5	140376,5	140396,5	140396,5	140376,5	140376,5	140376,5	140396,5	140396,5
PABC_90N	147096,5	145206,5	147096,5	147096,5	145736,5	145206,5	147096,5	147096,5	147096,5	145186,5	145606,5	147096,5	147096,5	145186,5	146716,5	147096,5	147096,5
PABC_95N	152676,5	151296,5	152656,5	151146,5	152656,5	152236,5	152026,5	152656,5	152026,5	150746,5	152656,5	152656,5	152656,5	152656,5	152236,5	152676,5	152656,5
PABC_100N	158696,5	156786,5	158256,5	156766,5	158676,5	156766,5	157186,5	158046,5	158676,5	158676,5	158696,5	158676,5	158046,5	156766,5	158696,5	158256,5	158676,5