



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL

# **UMA ABORDAGEM HEURÍSTICA PARA SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE BERÇOS EM PORTOS GRANELEIROS**

**ÉOLO APARECIDO CAETANO ROSA**

Orientador: Gustavo Campos Menezes  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

BELO HORIZONTE  
MAIO DE 2022

**ÉOLO APARECIDO CAETANO ROSA**

# **UMA ABORDAGEM HEURÍSTICA PARA SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE BERÇOS EM PORTOS GRANELEIROS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Modelagem Matemática e Computacional do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Modelagem Matemática e Computacional.

Área de concentração: Modelagem Matemática e Computacional

Linha de pesquisa: Sistemas Inteligentes

Orientador: Gustavo Campos Menezes  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL  
BELO HORIZONTE  
MAIO DE 2022

Rosa, Éolo Aparecido Caetano  
R789a Uma abordagem heurística para solução do problema de alocação de  
berços em portos graneleiros / Éolo Aparecido Caetano Rosa. – 2022.  
108 f.

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em  
Modelagem Matemática e Computacional.

Orientador: Gustavo Campos Menezes.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de  
Minas Gerais.

1. Programação heurística – Teses. 2. Ciência da computação – Matemática  
– Teses. 3. Pesquisa operacional – Teses. 4. Solução de problemas – Teses.  
I. Menezes, Gustavo Campos. III. Centro Federal de Educação Tecnológica de  
Minas Gerais. IV. Título.

CDD 519.6

"O saber a gente aprende com os mestres e os livros. A sabedoria se aprende é com a vida e com os humildes."(Cora Coralina)



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
COORDENAÇÃO DO CURSO DE MESTRADO EM MODELAGEM MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL

**“UMA ABORDAGEM HEURÍSTICA PARA SOLUÇÃO DO PROBLEMA  
DE ALOCAÇÃO DE BERÇOS EM PORTOS GRANELEIROS”**

Dissertação de Mestrado apresentada por **Éolo Aparecido Caetano Rosa**, em 31 de agosto de 2021, ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional do CEFET-MG, e aprovada pela banca examinadora constituída pelos professores:

Prof. Dr. Gustavo Campos Menezes (Orientador)  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Dr. Carlos Renato Storck  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Elisângela Martins de Sá  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Dr. Thiago Magela Rodrigues Dias  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Visto e permitida a impressão,

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Elizabeth Fialho Wanner  
Presidenta do Colegiado do Programa de Pós-Graduação em  
Modelagem Matemática e Computacional



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
COORDENAÇÃO DO CURSO DE MESTRADO EM MODELAGEM MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL

ATA DA 302ª SESSÃO PÚBLICA DE APRESENTAÇÃO E DEFESA DE DISSERTAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM MODELAGEM MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL. Em 31 de agosto de 2021, através de Videoconferência do Campus II do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, reuniu-se, às 10 horas, a Banca Examinadora, designada para este fim, pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional, constituída pelos professores: Dr. Gustavo Campos Menezes, (Orientador), Dr. Carlos Renato Storck, Dr<sup>a</sup>. Elisângela Martins de Sá e Dr. Thiago Magela Rodrigues Dias, para examinar o trabalho do mestrando **Éolo Aparecido Caetano Rosa**, sob o título **“UMA ABORDAGEM HEURÍSTICA PARA SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE BERÇOS EM PORTOS GRANELEIROS”**. O Prof. Dr. Gustavo Campos Menezes, como presidente da Banca Examinadora, declarou aberta a sessão, passando a palavra ao candidato, para que este expusesse sua dissertação. Terminada a exposição, o Presidente passou a palavra aos membros da Banca Examinadora, que iniciaram a arguição, na seguinte ordem: Prof. Dr. Carlos Renato Storck, Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Elisângela Martins de Sá, Prof. Dr. Thiago Magela Rodrigues Dias e Prof. Dr. Gustavo Campos Menezes. Terminada a arguição, retirou-se a banca examinadora para deliberação. De volta ao recinto, o Presidente deu conhecimento ao candidato de que sua Dissertação foi aprovada, devendo a redação final incorporar as contribuições da banca examinadora no prazo máximo de 60 (sessenta) dias. Nada mais havendo a tratar, o Presidente declarou encerrada a sessão, cujas atividades são registradas nesta Ata, lavrada, a qual assina, juntamente com os demais membros da Banca Examinadora. Belo Horizonte, 31 de agosto de 2021.

Prof. Dr. Gustavo Campos Menezes  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Dr. Carlos Renato Storck  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Elisângela Martins de Sá  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Dr. Thiago Magela Rodrigues Dias  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

# Agradecimentos

A Deus pela vida e por iluminar os meus caminhos com a presença de pessoas tão especiais. Por me dar forças para vencer os momentos difíceis; coragem para continuar superando as dificuldades e paciência para não me entregar ao desânimo diante das minhas fraquezas.

Agradeço ao meu orientador professor Dr. Gustavo Campos Menezes por aceitar conduzir o meu trabalho de pesquisa.

A todos os meus professores do curso de Modelagem Matemática Computacional do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFETMG pela excelência da qualidade técnica de cada um.

À minha esposa Maria José Ferreira pela compreensão e paciência demonstrada durante o período do projeto.

Agradeço também à Cristiano Lopes Martins Borges, Daniel Moraes dos Reis, Francine Suzie Carvalho Amaral, Maria Helena da Silva Rabelo, Oberdan Junior de Moraes e tantos outros, que me auxiliaram nesta trajetória. São por causa deles que, muitas vezes no caminho, não desisti, levantei a cabeça e foi em frente.

# Resumo

O comércio internacional de matérias-primas a granel é profundamente dependente do transporte marítimo e por isso os portos tem sido induzidos a investir em infraestrutura e logística para melhorar o atendimento das embarcações. Neste contexto, o presente trabalho aborda o Problema de Alocação de Berços (PAB): onde o objetivo é alocar navios a berços de modo a minimizar os custos operacionais. O PAB pode ser considerado como um dos principais problemas de otimização em terminais marítimos, devido à crescente demanda de navios que transportam produtos em granel. Assim, será proposto um algoritmo que combina o método heurístico LNS e permutação simples. Os resultados dos testes computacionais mostram que a heurística PAB-HE foi capaz de produzir um GAP relativo inferior a 10,66% em relação ao limite inferior obtido pelo *solver* CPLEX® para instâncias com velocidade dos berços com penalidade de 25% e GAP de 17,18% para instâncias com velocidade dos berços com penalidade de 50%, num tempo computacional inferior a 20 segundos.

**Palavras-chave:** Problema de Alocação de Berço, Heurística LNS, Permutação Simples.



# Abstract

The international trade of raw materials in bulk is deeply dependent on maritime transport and therefore ports have been induced to invest in infrastructure and logistics to improve the service of vessels. In this context, the present work addresses the Berth Allocation Problem (BAP): where the objective is to allocate ships to berths in order to minimize operating costs. BAP can be considered as one of the main optimization problems in maritime terminals, due to the growing demand of ships that transport bulk products. Thus, an algorithm will be proposed that combines the LNS heuristic method and simple permutation. The results of the computational tests show that the PAB-HE heuristic was able to produce a relative GAP lower than 10.66% in relation to the lower limit obtained by the *solver CPLEX®* for instances with berth speed with 25% penalty and 17.18% GAP for instances with berth speed with 50% penalty, in a computational time of less than 20 seconds.

**Keywords:** Berth Allocation Problem, LNS Heuristic, simple permutation.

# Lista de Figuras

Figura 1 – Representação gráfica do PAB Discreto, Contínuo e Híbrido fonte (BI-ERWIRTH; MEISEL, 2010) . . . . .	6
Figura 2 – Granel líquido (Petróleo, Óleo de soja, Álcool e Gás GLP), fonte Alfredini e Arasaki (2013) . . . . .	14
Figura 3 – Granel Sólido ( Soja, Minério, Milho e Carvão ), fonte (VIEIRA, 2018) . .	15
Figura 4 – Porto Graneleiro (BARROS, 2010) . . . . .	16
Figura 5 – PAB modelado como problema de transporte (BARROS, 2010) . . . . .	18
Figura 6 – Movimento dos navios entre os berços . . . . .	24
Figura 7 – Movimento dos navios no berço . . . . .	25
Figura 8 – Fluxograma da Heurística PAB-HE . . . . .	26
Figura 9 – Movimentação dos navios 1 e 2 considerando a janela de atracação $TTW_j$ para o berço 1. . . . .	34
Figura 10 – Evolução das operações de atracações dos navios $i$ x berços $l$ em relação as janelas $TTW$ 's . . . . .	47
Figura 11 – Tempo de processamento para completar a operação de carga e/ou descarga do navio 1, de acordo com a Tabela 6, o $h_{il}$ são: 2 para o berço 1 e 2 para o berço 2. . . . .	52
Figura 12 – Evolução das operações de atracações do navio 1 no berço $l$ em relação as janelas $TTW$ 's . . . . .	52
Figura 13 – Tempo de processamento para completar a operação de carga e/ou descarga do navio 2, de acordo com a Tabela 6, o $h_{il}$ são: 12 para o berço 1 e 8 para o berço 2. . . . .	52
Figura 14 – Evolução das operações de atracações dos navio 1 e 2 nos berços $l$ em relação as janelas $TTW$ 's . . . . .	52
Figura 15 – Tempo de processamento para completar a operação de carga e/ou descarga do navio 3, de acordo com a Tabela 6, o $h_{il}$ são: 3 para o berço 1 e 2 para o berço 2. . . . .	52
Figura 16 – Evolução das operações de atracações dos navio de 1 a 3 nos berços $l$ em relação as janelas $TTW$ 's . . . . .	53
Figura 17 – Tempo de processamento para completar a operação de carga e/ou descarga do navio 4, de acordo com a Tabela 6, o $h_{il}$ são: 9 para o berço 1 e 6 para o berço 2. . . . .	53
Figura 18 – Evolução das operações de atracações dos navio de 1 a 4 nos berços $l$ em relação as janelas $TTW$ 's . . . . .	53

Figura 19 – Tempo de processamento para completar a operação de carga e/ou descarga do navio 5, de acordo com a Tabela 6, o $h_{il}$ são: 6 para o berço 1 e 4 para o berço 2. . . . .	53
Figura 20 – Evolução das operações de atracações dos navio de 1 a 5 nos berços / em relação as janelas $TTW$ 's . . . . .	53
Figura 21 – Tempo de processamento para completar a operação de carga e/ou descarga do navio 6, de acordo com a Tabela 6, o $h_{il}$ são: 12 para o berço 1 e 8 para o berço 2. . . . .	54
Figura 22 – Evolução das operações de atracações dos navio de 1 a 6 nos berços / em relação as janelas $TTW$ 's . . . . .	54
Figura 23 – Tempo de processamento para completar a operação de carga e/ou descarga do navio 7, de acordo com a Tabela 6, o $h_{il}$ são: 2 para o berço 1 e 2 para o berço 2. . . . .	54
Figura 24 – Evolução das operações de atracações dos navio de 1 a 7 nos berços / em relação as janelas $TTW$ 's . . . . .	54
Figura 25 – Tempo de processamento para completar a operação de carga e/ou descarga do navio 8, de acordo com a Tabela 6, o $h_{il}$ são: 2 para o berço 1 e 2 para o berço 2. . . . .	54
Figura 26 – Evolução das operações de atracações dos navio de 1 a 8 nos berços / em relação as janelas $TTW$ 's . . . . .	55
Figura 27 – Tempo de processamento para completar a operação de carga e/ou descarga do navio 9, de acordo com a Tabela 6, o $h_{il}$ são: 9 para o berço 1 e 6 para o berço 2. . . . .	55
Figura 28 – Evolução das operações de atracações dos navio de 1 a 9 nos berços / em relação as janelas $TTW$ 's . . . . .	55
Figura 29 – Tempo de processamento para completar a operação de carga e/ou descarga do navio 10, de acordo com a Tabela 6, o $h_{il}$ são: 12 para o berço 1 e 8 para o berço 2. . . . .	55
Figura 30 – Evolução das operações de atracações dos navio de 1 a 10 nos berços / em relação as janelas $TTW$ 's . . . . .	55
Figura 31 – Evolução das permutações dos navios 1 e 2 da coluna $s_1$ (sequência de atracação) da Tabela 10 . . . . .	68
Figura 32 – Evolução das permutações dos navios 3 e 5 da coluna $s_2$ (sequência de atracação) da Tabela 10 . . . . .	68
Figura 33 – Evolução das permutações dos navios 4 e 6 da coluna $s_3$ (sequência de atracação) da Tabela 10 . . . . .	69
Figura 34 – Evolução das permutações dos navios 7 e 10 da coluna $s_4$ (sequência de atracação) da Tabela 10 . . . . .	69

Figura 35 – Evolução das permutações do navio 8 da coluna s5 (sequência de atracação) da Tabela 10 . . . . .	69
Figura 36 – Evolução das permutações dos navios 1 e 2 da coluna s1 (sequência de atracação) da Tabela 11 . . . . .	70
Figura 37 – Evolução das permutações dos navios 3 e 8 da coluna s2 (sequência de atracação) da Tabela 11 . . . . .	70
Figura 38 – Evolução das permutações dos navios 4 e 5 da coluna s3 (sequência de atracação) da Tabela 11 . . . . .	70
Figura 39 – Evolução das permutações dos navios 1 e 2 da coluna s1 (sequência de atracação) da Tabela 12 . . . . .	71
Figura 40 – Evolução das permutações dos navios 3 e 8 da coluna s2 (sequência de atracação) da Tabela 12 . . . . .	71
Figura 41 – Evolução das permutações dos navios 4 e 5 da coluna s3 (sequência de atracação) da Tabela 12 . . . . .	71
Figura 42 – Evolução das permutações dos navios 6 e 7 da coluna s4 (sequência de atracação) da Tabela 12 . . . . .	72
Figura 43 – Evolução das permutações dos navios 9 e 10 da coluna s5 (sequência de atracação) da Tabela 12 . . . . .	72
Figura 44 – Evolução das permutações dos navios 1 e 2 da coluna s1 (sequência de atracação) da Tabela 13 . . . . .	73
Figura 45 – Evolução das permutações dos navios 3 e 8 da coluna s2 (sequência de atracação) da Tabela 13 . . . . .	73
Figura 46 – Evolução das permutações dos navios 5 e 4 da coluna s3 (sequência de atracação) da Tabela 13 . . . . .	73
Figura 47 – Evolução das permutações dos navios 7 e 9 da coluna s4 (sequência de atracação) da Tabela 13 . . . . .	74
Figura 48 – Evolução das permutações dos navios 10 e 6 da coluna s5 (sequência de atracação) da Tabela 13 . . . . .	74
Figura 49 – Resultado da aplicação da heurística LNS no berço 1 para os navios: 1, 3, 5, 7 e 10. . . . .	77
Figura 50 – Resultado da aplicação da heurística LNS no berço 1 para os navios: 3, 5, 7 e 10. . . . .	77
Figura 51 – Resultado da aplicação da heurística LNS no berço 1 para os navios: 5, 7 e 10. . . . .	77
Figura 52 – Resultado da aplicação da heurística LNS no berço 1 para os navios: 7 e 10. . . . .	77
Figura 53 – Resultado da aplicação da heurística LNS no berço 1 para o navio 10. . . . .	77
Figura 54 – Resultado da aplicação da heurística LNS no berço 1 para os navios: 2, 4, 6, 8 e 9. . . . .	78

Figura 55 – Resultado da aplicação da heurística LNS no berço 1 para os navios: 4, 6, 8 e 9. . . . .	78
Figura 56 – Resultado da aplicação da heurística LNS no berço 1 para os navios: 4, 6 e 9. . . . .	78
Figura 57 – Resultado da aplicação da heurística LNS no berço 1 para os navios: 6 e 9. . . . .	78
Figura 58 – Resultado da aplicação da heurística LNS no berço 1 para o navio 9. . . . .	79
Figura 59 – Resultado da aplicação da heurística LNS no berço 1. . . . .	79
Figura 60 – Resultado da aplicação da heurística LNS no berço 2. . . . .	79
Figura 61 – Comparação da função objetivo Formulação Compacta Barros (2010), Formulação Compacta Estendida, Formulação Compacta Estendida Relaxada - HE, Heurística PAB-HE para instâncias com variação de velocidade do berço-VL com penalidade de 25%. . . . .	98
Figura 62 – Comparação da função objetivo Formulação Compacta Barros (2010), Formulação Compacta Estendida, Formulação Compacta Estendida Relaxada - HE, Heurística PAB-HE para instâncias com variação de velocidade do berço-VL com penalidade de 50%. . . . .	98

# Lista de Tabelas

Tabela 1 – Alguns trabalhos de PABD. . . . .	9
Tabela 2 – Alguns trabalhos de PABC. . . . .	10
Tabela 3 – Alguns trabalhos de PABH. . . . .	12
Tabela 4 – Definição dos conjuntos de entrada . . . . .	19
Tabela 5 – Variáveis de decisão . . . . .	19
Tabela 6 – Tempo de processamento necessário para um navio $i$ completar a operação de carga e/ou descarga em um berço $l$ ( $h_{il}$ ) . . . . .	46
Tabela 7 – Resumo do Modelo na formulação Compacta proposta por Barros (2010), Formulação Compacta Estendida e Formulação Compacta Estendida Relaxada - Refinamento da solução pela heurística proposta . . . . .	47
Tabela 8 – Resumo da variável de decisão $y_{ijl}$ sobre custo (Tempo de Serviço) . . . . .	48
Tabela 9 – Resumo da variável de decisão $y_{ijl}$ sobre custo (Tempo de Serviço) . . . . .	56
Tabela 10 – Resumo da sequência de atracação inicial dos navios $i$ por berço $l$ no horizonte de planejamento . . . . .	57
Tabela 11 – Resumo da sequência de atracação dos navios $i$ por berço $l$ no horizonte de planejamento . . . . .	68
Tabela 12 – Resumo da sequência de atracação dos navios $i$ por berço $l$ no horizonte de planejamento . . . . .	68
Tabela 13 – Resumo da sequência de atracação dos navios $i$ por berço $l$ no horizonte de planejamento . . . . .	72
Tabela 14 – Resumo do Modelo na formulação Compacta proposta por Barros (2010), Formulação Compacta Estendida e Formulação Compacta Estendida Relaxada - Refinamento da solução pela heurística proposta e Heurística PAB-HE . . . . .	80
Tabela 15 – Resumo da variável de decisão $y_{ijl}$ sobre custo (Tempo de Serviço) após aplicação dos método heurístico proposto para resolver o PAB . . . . .	81
Tabela 16 – Tabela de Classificação de Navios Graneleiros . . . . .	82
Tabela 17 – Detalhes do conjunto de instâncias com penalidade de 25%. . . . .	84
Tabela 18 – Detalhes do conjunto de instâncias com penalidade de 50%. . . . .	85
Tabela 19 – Resultados obtidos para instâncias com velocidade do berço-VL com penalidade de 25%. . . . .	87
Tabela 20 – Resultados obtidos para instâncias com velocidade do berço-VL com penalidade de 50%. . . . .	88

Tabela 21 – Resultados comparativos da função objetivo da Formulação Compacta Barros (2010), Formulação Compacta Estendida, Formulação Compacta Estendida Relaxada - HE, Heurística PAB-HE para instâncias com variação de velocidade do berço-VL com penalidade de 25%. . . . .	94
Tabela 22 – Resultados comparativos da função objetivo da Formulação Compacta Barros (2010), Formulação Compacta Estendida, Formulação Compacta Estendida Relaxada - HE, Heurística PAB-HE para instâncias com variação de velocidade do berço-VL com penalidade de 50%. . . . .	97

# Lista de Algoritmos

Algoritmo 1 – Pseudocódigo do PAB-HE( $N, M, L, a_i, h_{il}, u_{il}, x_{ij}, y_{ijl}, zFO$ ) . . . . .	29
Algoritmo 2 – Pseudocódigo do LNS( $N, M, L, a_i, h_{il}, u_{il}, x_{ij}, y_{ijl}, zFO$ ) . . . . .	33
Algoritmo 3 – Pseudocódigo do ReconstroiSolucao( $l, M, a_i, h_{il}, x_{ij}, y_{ijl}, zL, zN, zNN, zTTw, zFO$ ) . . . . .	36
Algoritmo 4 – Pseudocódigo do GeraAtracacao( $N, M, L, u_{il}, y_{ijl}, maiorAtracacao, tSequenciaAtracacaoBerco$ ) . . . . .	39
Algoritmo 5 – Pseudocódigo da GeraPermuta( $vetor[], inf, sup, vPermutacaoTodos[][]$ )	40
Algoritmo 6 – Pseudocódigo FazTroca( $vetor[], i, j$ ) . . . . .	40
Algoritmo 7 – Pseudocódigo Fatorial( $n$ ) . . . . .	40
Algoritmo 8 – Pseudocódigo de CalculoTTW( $TTW$ ) . . . . .	41
Algoritmo 9 – Pseudocódigo do Solução Inicial( $N, M, L, a_i, h_{il}, u_{il}, x_{ij}, y_{ijl}, zFO$ ) . . .	43
Algoritmo 10 – Pseudocódigo do PAB-RELAXADO( $N, M, L, a_i, h_{il}, u_{il}, x_{ij}, y_{ijl}, zFO$ ) .	44



# Lista de Abreviaturas e Siglas

ATP	Algoritmo de Treinamento Populacional
AG	Algoritmo Genético
BAP	<i>Berth Allocation Problem</i>
CHM	Centro de Hidrografia da Marinha do Brasil
CS	Clustering Search
DWT	<i>Metric tons Deadweight</i>
FCFS	<i>First Come First Served</i>
FIFO	<i>First-in-Firstout</i>
GC	<i>Guindaste de Cais</i>
LI	Limite Inferior
LNS	<i>Large Neighborhood Search</i>
LP	<i>Linear Programming</i>
LS	Limite Superior
MDVRPTW	<i>Multidepot Vehicle Routing Problem with Time Windows</i>
MIP	Programação Linear Misto
MILP	<i>Mixed Integer Linear Programming</i>
PAB	Problema de Alocação de Berço
PABD	Problema de Alocação de Berço Discreto
PABC	Problema de Alocação de Berço Continuo
PABH	Problema de Alocação de Berço Híbrido
PL	Programação Linear
PLI	Programação Linear Inteira
PABMC	Problema de Alocação de Berços com Múltiplas Cargas

PRVGMJT	Problema de Roteamento de Veículos com Múltiplas Garagens e Janelas de Tempo
RC	<i>Reduced Cost</i>
SA	<i>Simulated Annealing</i>
TTW	<i>Tidal Time Window</i>
VLBC	<i>Very Large Bulk Carrier</i>
VLOC	<i>Very Large Ore Carrier</i>
VNS	<i>Variable Neighborhood Search</i>

# Sumário

<b>1 – Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivos	3
1.1.1 Objetivos Específicos	3
1.2 Organização do trabalho	3
<b>2 – Revisão da Literatura</b>	<b>4</b>
2.1 Problema de Alocação de Berço Discreto (PABD)	7
2.2 Problema de Alocação de Berço Contínuo (PABC)	9
2.3 Problema de Alocação de Berço Híbrido (PABH)	10
<b>3 – Problema de Alocação de Berço</b>	<b>13</b>
3.1 Definição do Problema	13
3.1.1 Controle de Estoque	16
3.1.2 Condições Favoráveis de Maré	17
3.2 Modelo Matemático	17
3.3 Formulação Compacta	20
3.3.1 Formulação Compacta	20
3.4 Formulação Estendida	22
<b>4 – Abordagem de solução</b>	<b>23</b>
4.1 Introdução	23
4.2 Algoritmo PAB-HE	27
4.3 Heurística de Refinamento	30
4.3.1 <i>Variable Neighborhood Search</i> (VNS)	30
4.3.2 <i>Iterated greedy algorithm</i>	30
4.3.3 <i>Large Neighborhood Search</i> (LNS)	30
4.4 Sequência de Atracação	37
4.5 Permutação	40
4.6 Fatorial	40
4.7 Método de Cálculo do TTW (M)	41
4.8 Solução Inicial	41
4.9 Solução Formulação Compacta Estendida Relaxada	44
4.10 Aplicação do algoritmo	45
4.10.1 Algoritmo da Heurística Proposto - Exemplo	49
4.10.1.1 Solução Inicial	49

4.10.1.2	Movimentação dos navios entre os Berços - Permutação Simples . . . . .	57
4.10.1.3	Movimentação dos navios dentro do Berço - Método Heurística LNS . . . . .	74
4.10.1.4	Resumo do Exemplo . . . . .	79
<b>5</b>	<b>Resultados Computacionais . . . . .</b>	<b>82</b>
5.1	Gerador de Instâncias . . . . .	82
5.2	Resultados Computacionais . . . . .	85
<b>6</b>	<b>Conclusões e Trabalhos futuros . . . . .</b>	<b>99</b>
6.1	Conclusão . . . . .	99
6.2	Trabalhos Futuros . . . . .	100
6.3	Considerações Finais . . . . .	100
	<b>Referências . . . . .</b>	<b>101</b>

# Capítulo 1

## Introdução

O transporte marítimo é um dos pilares fundamentais do crescimento da economia global ao longo da história. O aumento da demanda de matérias-primas, o crescimento das transações do comércio internacional e os avanços nas técnicas de construção de grandes navios graneleiros induzem ao aumento da frequência das operações de transportes entre portos e, conseqüentemente, ao aumento da importância dos mesmos nos resultados da balança comercial dos países.

Dados do anuário estatístico da Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ), indicam que os portos brasileiros ampliaram sua movimentação de cargas em 4,2% no ano fiscal de 2020 em relação ao ano 2019, chegando a um total de 1,151 bilhão de toneladas (ANTAQ, 2021). A maior parte desse volume é de graneis sólidos, que respondem a cerca de 60% de toda a carga movimentada pelos terminais. O avanço desse segmento no ano fiscal de 2020 foi da ordem de 1,2%.

Diante de um cenário em que a rapidez do atendimento, a disponibilidade permanente e o baixo custo deixaram de ser vantagens competitivas para se tornarem a regra, houve um surgimento repentino e em grande quantidade de operadores logísticos e da sua contratação por grande parte das companhias (FIORONI, 2008).

Como consequência desse novo cenário, segundo Barbosa (2014), surgiu uma maior dificuldade em gerenciar as operações nos portos, tornando-se interessante analisar questões acerca do Problema de Alocação em Berços (PAB) do inglês *Berth Allocation Problem* (BAP). O PAB consiste em alocar os navios a posições de atracação de forma que seja utilizado o máximo de espaço do cais minimizando o tempo de serviço. As decisões a serem tomadas dizem respeito à posição (onde?) e ao tempo (quando?) em que o navio deverá atracar (IMAI; NISHIMURA; PAPADIMITRIOU, 2001).

Com o aumento da demanda de movimentação de embarcações e cargas nos portos, estes são induzidos a fazer investimentos para manter uma boa acomodação das embarcações,

com o objetivo de reduzir os tempos de atendimento (BRITTO et al., 2014). Por outro lado, investimento em infraestrutura dos terminais portuários são feitos para longo prazo e requerem disponibilidade de valores bilionários, liberação de licenças ambientais, dentre outros fatores.

Os terminais portuários são estruturas complexas que possuem vários problemas operacionais e logísticos fortemente conectados. Por exemplo, a alocação de navios nos berços afeta diretamente os pátios de estocagem, pois são as demandas dos navios que determinam quando um produto deve ser recuperado.

O principal problema de gerenciamento de um porto é a pouca margem de flexibilidade das empresas proprietárias das embarcações, que exigem serviços rápidos e uso econômico dos recursos disponíveis. Para Barros (2010), usar os recursos de forma inteligente é fundamental, porque, apesar das reformas e aplicações serem mecanismos adotados corriqueiramente pelas administrações portuárias, como objetivo de oferecer mais recursos e agilidade às operações de cargas e/ou descarga dos navios, é fácil concluir que os portos dificilmente foram e/ou serão projetados para disporem de recursos acima da demanda exigida.

Diante desses desafios, a utilização de modelo matemático para representar atividades dos terminais, e o uso de heurísticas e algoritmos exatos para solucionar os modelos, pode resultar em um melhor controle das operações portuárias. Proporcionando assim o uso mais inteligente dos recursos disponíveis e permitindo que pessoas com responsabilidades dessas áreas tomem melhores decisões.

Os problemas obtidos a partir da representação do PAB são conhecidamente **NP-Difíceis** e requerem avançados e complexos métodos de solução, o que estabelece grandes desafios para os acadêmicos da área.

Neste contexto de pesquisa, o presente trabalho pretende propor método de resolução do PAB em terminais portuários de graneis sólidos (minério de ferro, carvão e grãos).

## 1.1 Objetivos

O tema deste trabalho envolve o estudo do problema alocação de berços. O principal objetivo é o desenvolvimento de modelos matemáticos e algoritmos de solução deste problema, além da avaliação da qualidade dos resultados obtidos.

### 1.1.1 Objetivos Específicos

Entre os objetivos específicos deste trabalho, podemos citar os seguintes:

- Reformular e estender o modelo matemático proposto por [Barros \(2010\)](#) para modelar o PAB;
- Propor um conjunto de algoritmos que solucionem o PAB;
- Resolver instâncias de grande porte baseadas em casos reais.

## 1.2 Organização do trabalho

Este trabalho está organizado da seguinte forma: O Capítulo 2 faz uma revisão literária para alguns problemas encontrados na otimização de problema de alocação de berços. O Capítulo 3 é dedicado à definição do problema e à apresentação do modelo matemático. O Capítulo 4 apresenta uma abordagem heurística para resolver o PAB. O Capítulo 5 discute os experimentos computacionais realizados para validar e testar o modelo matemático e as heurísticas. E por fim, o Capítulo 6 aborda a conclusão e as direções futuras.

## Capítulo 2

### Revisão da Literatura

O crescimento da economia global, no qual estamos inseridos por conta da globalização, vem exigindo mais dos terminais portuários pelo mundo afora, pois é por eles que passam a maior parte das riquezas comercializadas entre as nações. Dentro desse contexto, a atividade portuária é estratégica e fundamental para a economia mundial. Mais de 90% do comércio internacional (em volume) se faz por instalações portuárias, que devem ser adequadas às funções a que se destinam.

No cenário brasileiro, a importância não é menor. Essa movimentação de cargas pelos portos requer inúmeras estruturas de atracação, extensas áreas para armazenagem, profundidades elevadas, dentre outros fatores. Por isso, a eficiência do terminal portuário tem ganhando importância e isso faz com que o interesse da comunidade acadêmica nessa área cresça significativamente.

As operações de importação, exportação, transbordo, entre outros são características que influenciam diretamente na infraestrutura do porto. Os terminais portuários podem ser basicamente divididos em terminais contêineres (*Container Terminal*) e terminal de carga a granel (*Bulk Terminal*) de acordo com (LIGTERINGEN; VELSINK, 2012). As cargas transportadas são comumente classificadas de acordo com a sua natureza. A carga a granel é aquela que não é acondicionada em nenhum tipo de embalagem. São cargas individualizadas, que podem ser divididas em graneis sólidos e líquidos.

Um porto de contêineres ou terminal de contêineres é uma instalação onde contêineres de carga são transbordados entre diferentes veículos de transporte, para transporte posterior marítimo. O transbordo pode ser entre navios porta-contêineres e veículos terrestres, por exemplo, trens ou caminhões, caso em que o terminal é descrito como um porto de contêineres marítimos. Alternativamente, o transbordo pode ser entre veículos terrestres, tipicamente entre trem e caminhão, caso em que o terminal é descrito como um porto de contêineres terrestres. Já os terminais de carga a granel são construídos para atender ao



carregamento e descarregamento de graneis sólidos ou líquidos. Esse tipo de terminal costuma contar com armazéns de médio e grande porte para armazenar uma grande quantidade de produtos e em condições especiais, pois, na maioria dos casos, esses produtos não podem ficar expostos e requerem equipamentos específicos para sugar e despejar as cargas granuladas nos navios. É bastante comum também que os terminais graneleiros tenham acesso a ferrovias e rodovias devido às características desses produtos. De acordo com [Unsal e Oguz \(2019\)](#), ao contrário dos terminais de contêineres, nos quais todas as cargas são transportadas em um contêiner padronizado, nos terminais de graneis os meios de armazenamento e manuseio da carga variam para diferentes tipos de materiais. Outra diferença importante é que os terminais de graneis atuam como terminal de importação e/ou exportação.

Uma das principais diferenças entre os estudos de PAB para terminais de contêiner e portos de cargas a granel está nos equipamentos específicos necessários para realizar as operações de carga e/ou descarga, principalmente no costado. Enquanto nos terminais de contêiner as cargas são unitizadas em contêineres de 20 ou 40 pés <sup>1</sup> principalmente, em portos de cargas a granel são necessários equipamentos específicos para realizar as operações, inclusive com características muito distintas quando se trata de uma operação de carga ou uma operação de descarga ([UMANG; BIERLAIRE; VACCA, 2013](#)).

Para melhor entendimento das particularidades do PAB, serão adotadas as definições sobre o problema de restrição temporal e o problema de restrição espacial. Essas restrições são independentes do porto operar carga em contêineres e/ou granel. Para [Imai, Nishimura e Papadimitriou \(2001\)](#), [Cordeau et al. \(2005\)](#), [Stahlbock e Voss \(2008\)](#), [Bierwirth e Meisel \(2010\)](#), a restrição temporal está relacionada aos horários de chegada dos navios, horário de atracação, tempo de espera na fila de navios, horário de desatracação dentre outros e são divididas principalmente em chegada estática e chegada dinâmica. De acordo com [Vervloet e Rosa \(2016\)](#), na restrição de chegada estática, os navios já estão disponíveis para atracação, ou seja, quando os navios já estão no porto ou mesmo quando estão perto do porto, podendo adiantar o seu tempo de chegada sem impactar na fila de atracação do porto. Para o autor, a chegada dinâmica possui horários fixos para chegada, atracação e operação de desatracação dos navios. Este horários de início e término são chamados de "janela de atracação" segundo ([IMAI; NISHIMURA; PAPADIMITRIOU, 2001](#)).

---

<sup>1</sup>Esse sistema de medida é utilizado atualmente no Reino Unido, nos Estados Unidos e, com menor frequência, no Canadá. Um pé correspondia a onze polegadas e meia. Hoje, a medida é doze polegadas. Esta medida é amplamente usada na aviação e atualmente equivale a 30,48 centímetros, [INMETRO \(2012\)](#)

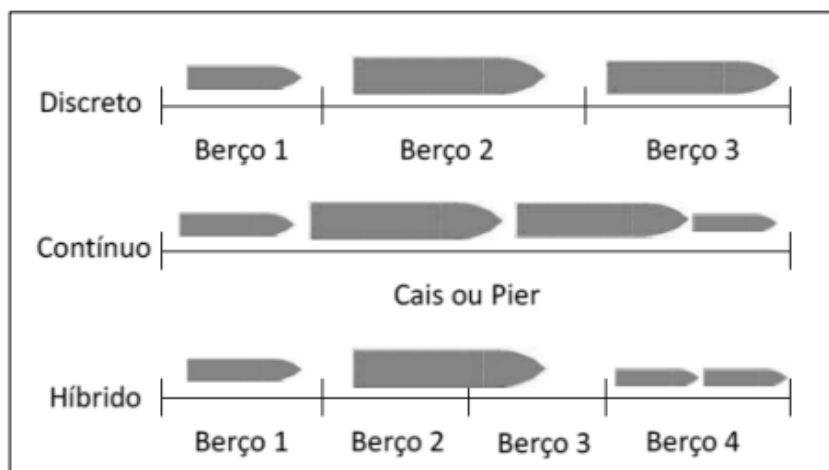


Figura 1 – Representação gráfica do PAB Discreto, Contínuo e Híbrido fonte (BIERWIRTH; MEISEL, 2010)

Segundo Vervloet e Rosa (2016), a restrição espacial ou restrição dimensional é um fator determinante na aceitação dos navios para atracação e operação no porto, tendo como base o *layout* do cais e as dimensões do navio, tais como calado<sup>2</sup>, comprimento e boca do navio<sup>3</sup>. Na Figura 1, apresentam-se os três tipos de restrição espacial: Problema de Alocação de Berço Discreto (PABD), Problema de Alocação de Berço Contínuo (PABC) e o Problema de Alocação de Berço Híbrido (PABH) (IMAI; NISHIMURA; PAPADIMITRIOU, 2001; CORDEAU et al., 2005; STAHLBOCK; VOSS, 2008; BIERWIRTH; MEISEL, 2010).

Para Imai et al. (2005), Bierwirth e Meisel (2010) e Vervloet e Rosa (2016), no PABD o cais é segmentado em berços, onde cada navio pode ocupar apenas um determinado berço e o navio deve ter comprimento menor que o comprimento do berço. No PABC o cais não possui segmentação em berços e, portanto, os navios podem ser atracados em qualquer posição livre do cais. O PABH possui as características tanto do PABD quanto do PABC, permitindo que navios ocupem mais de um berço ou que mais de um navio ocupe um berço.

Terminais portuários possuem problemas e características distintas, permitindo então a criação de diferentes linhas de pesquisa. Desse modo, uma parte dos esforços dos pesquisadores está focada em estudar os problemas de otimização dos terminais contêineres, enquanto a outra está direcionada em solucionar os problemas de otimização dos terminais graneleiros. As subseções a seguir abordam alguns dos principais conceitos, problemas clássicos e a revisão da literatura para terminais de contêiner e de carga a granel.

<sup>2</sup>Calado é a distância vertical entre a parte inferior da quilha e a linha de flutuação de uma embarcação. É a medida da parte submersa do navio. Tecnicamente, é a distância da lâmina d'água até a quilha do navio (FAZCOMEX, 2021).

<sup>3</sup>A boca é a largura de uma determinada secção transversal de uma embarcação, medida de um bordo ao outro. Se não houver referência a uma secção específica, o termo "boca" refere-se à boca máxima (FAZCOMEX, 2021).

## 2.1 Problema de Alocação de Berço Discreto (PABD)

No PABD, a área (pier) destinada a realizar operações de carga e/ou descarga é dividida em conjunto de seções ou berços, onde apenas um navio pode ser atendido em certo intervalo de tempo, respeitando-se a restrição de que comprimento do navio não pode ser maior que o comprimento do berço (UMANG; BIERLAIRE; VACCA, 2013), Rodrigues et al. (2016) e Banos et al. (2016). Para Vervloet e Rosa (2016), a dimensão do berço é um fator determinístico para restrição espacial e atracação do navio. Ainda de acordo com os autores, uma característica do PABD é a operação de navios que necessitam dos mesmos tipos de equipamentos durante o processo de carga e/ou descarga.

Este modelo tem como objetivo minimizar o tempo da operação de atracação dos navios para obter uma solução melhor do que a técnica *First-in-First-out* (FIFO), também chamado de *First Come First Served* (FCFS), que consiste em atender os navios na ordem em que eles chegam ao porto. Vale mencionar que as técnicas FIFO e FCFS, não tem diferenças entre elas, ambas dão prioridade na ordem de chegada dos navios no terminal portuário. A maior parte dos terminais portuários comerciais utilizam essa estratégia.

Imai, Nagaiwa e Tat (1997) e Imai, Nishimura e Papadimitriou (2001) apresentaram um PABD, onde todos os navios que possuem uma hora de chegada dentro do horizonte de planejamento são considerados no modelo. Esse modelo de PABD assume que todas as embarcações podem ser alocadas em qualquer berço, o que não é usual na prática. Os autores ainda desenvolveram um método heurístico baseado no método do subgradiente com Relaxação Lagrangiana para encontrar soluções para o PABD. Nishimura, Imai e Papadimitriou (2001) e Xu, Li e Leung (2012) ampliaram a versão dinâmica do PABD, delimitando o cais onde cada embarcação pode atracar e aprimoraram sua abordagem considerando diferentes prioridades de atendimento entre os navios. Nishimura, Imai e Papadimitriou (2001) propuseram um Algoritmo Genético (AG) como método de solução e Xu, Li e Leung (2012) modelaram o PABD como um problema de programação de máquinas paralelas, onde atribuição dos navios nos berços consideram a restrições de profundidade e condições das marés.

Uma formulação do PAB como problema de roteamento de veículos com janelas de tempo *Multidepot Vehicle-Routing Problem with Time Windows* (MDVRPTW) e uma heurística baseada na Busca Tabu em duas versões, uma para o PABD e outra para versão do PABC foram propostas por (CORDEAU et al., 2005).

Uma variante do PABD de Imai, Nishimura e Papadimitriou (2001) é apresentada por Monaco e Sammarra (2007) nesse estudo são analisadas as propriedades do problema de alocação discreta de berços, onde o problema é modelado como um problema de programação dinâmica e um método subgradiente com o relaxamento lagrangiano. Os

resultados obtidos mostraram que o método proposto pelos autores supera o método PABD de (IMAI; NISHIMURA; PAPADIMITRIOU, 2001).

Na pesquisa de Banos et al. (2016), eles apresentaram uma variante do PABD proposta por Cordeau et al. (2005). Eles propuseram um modelo matemático e uma metaheurística *Simulated Annealing* (SA) para o Problema de Alocação de Berços com Múltiplas Cargas (PABMC). A proposta de Cordeau et al. (2005) tem por premissa que os tempos de operação dos navios nos berços são conhecidos a priori e, no modelo matemático proposto por Banos et al. (2016), o tempo de operação é calculado e depende da relação entre a carga transportada pelo navio e o berço que ele irá atracar. Portanto, o tempo de operação não é conhecido a priori.

Em Correcher et al. (2019), eles apresentaram um variante do PABD uma formulação de Programação Linear Inteira Mista (PLIM), uma heurística baseada no *Iterated Local Search* (ILS) e uma estratégia *Ruin & Recreate*, que foram capazes de obter soluções ótimas ou quase ótimas para esta nova variante do problema.

Nessa linha de pesquisa, diversos trabalhos desenvolveram métodos e heurísticas para resolver o PABD dentre esses podemos citar: Hansen e Oguz (2003) e Hansen, Oguz e Mladenovic (2008) apresentaram um modelo matemático mais compacto do PABD e propuseram uma heurística *Variable Neighborhood Search* (VNS), que apresentou resultados superiores aos encontrados por (NISHIMURA; IMAI; PAPADIMITRIOU, 2001). Mauri, Oliveira e Lorena (2010) propuseram uma abordagem baseada na Técnica de Geração de Colunas. Abordagens como as Cordeau et al. (2005), Lalla-Ruiz, Batista e Vega (2012) e Ting, Wu e Chou (2014) indicam que em grande quantidade de cenários, as metaheurísticas obtêm melhores soluções e em menor tempo computacional que os métodos exatos, que utilizam pacotes comerciais de resolução. Uma lista com alguns dos trabalhos encontrado na literatura e referência é apresentado Tabela 1.

Tabela 1 – Alguns trabalhos de PABD.

Característica	Referência
Método Heurístico baseado no método do subgradiente com Relaxação Lagrangiana com restrição temporal estática	<a href="#">Imai, Nagaiwa e Tat (1997)</a> e <a href="#">Imai, Nishimura e Papadimitriou (2001)</a>
Algoritmo Genético (AG) considerando diferentes prioridades de atendimento entre os navios	<a href="#">Nishimura, Imai e Papadimitriou (2001)</a>
Problema de roteamento de veículos e uma heurística baseada na Busca Tabu	<a href="#">Cordeau et al. (2005)</a>
Programação dinâmica e um método subgradiente com a relaxação lagrangiana	<a href="#">Monaco e Sammarra (2007)</a>
Geração de Colunas	<a href="#">Mauri, Oliveira e Lorena (2010)</a>
Variante PABD de <a href="#">Cordeau et al. (2005)</a> e uma metaheurística <i>Simulated Annealing</i> (SA) PABMC	<a href="#">Banos et al. (2016)</a>
Programação Linear Inteira Mista (PLIM), heurística ILS e uma estratégia <i>Ruin &amp; Recreate</i>	<a href="#">Correcher et al. (2019)</a>

## 2.2 Problema de Alocação de Berço Contínuo (PABC)

No PABC, a área (pier) destinada a realizar operações de carga e/ou descarga não possui nenhuma subdivisão e os navios podem atracar em qualquer posição, de acordo com ([BIERWIRTH; MEISEL, 2010](#)).

Um dos primeiros estudos a propor um modelo de PABC como essa abordagem foram a pesquisa de ([LIM, 1998](#)). O autor considera que uma embarcação permanece na mesma posição durante toda a duração do serviço, esse modelo visa minimizar o espaço máximo de cais utilizado a qualquer momento.

A fim de minimizar o tempo total permanência do navio no porto, os autores [Li, Cai e Lee \(1998\)](#), [Guan et al. \(2002\)](#) e [Park e Kim \(2002\)](#) consideram o problema com tempo de chegada determinístico, por outro lado [Gao et al. \(2010\)](#) consideram os tempos de chegada como tendo um comportamento probabilístico estocástico. Os autores [Li, Cai e Lee \(1998\)](#), [Guan et al. \(2002\)](#), [Park e Kim \(2002\)](#) e [Guan et al. \(2002\)](#) propuseram solucionar o PABC considerando a chegada estática, ou seja, sempre com disponibilidade para atracação, e minimizando o tempo de permanência do navio no porto. [Garey e Johnson \(1979\)](#) modelaram o PABC como um problema de corte bidimensional com restrições.

[Lai e Shih \(1992\)](#) assumem que um cais é representado como uma linha contínua, que pode ser dividido em várias seções, para as quais somente um navio pode ser atribuído em um determinado tempo. Uma heurística foi desenvolvida considerando a regra FCFS.

Em [Lim \(1999\)](#), [Tong, Lau e Lim \(1999\)](#) e [Goh e Lim \(2000\)](#) os autores modelaram o PABC com objetivo de minimizar o espaço do cais utilizado, partindo do pressuposto que uma vez atracado, o navio não será movimentado ao longo do cais durante o processo de

carregamento, antes do seu horário de partida e que os tempos de atracação de cada navio já estão definidos pelos tempos de chegada.

Nos estudos de [Rodrigues et al. \(2016\)](#), os autores propuseram um modelo matemático para o PABC com limitações de operação de cargas ao longo da extensão do cais foi elaborado como um PLIM, tendo como base a teoria de corte e empacotamento bidimensional proposta por [GUAN; CHEUNG, 2005](#)).

Casos particulares do PABC foram propostos por [\(BROWN; LAWPHONGPANICH; THURMAN, 1994\)](#), [\(BROWN et al., 1997\)](#) e [\(LEE; CHEN, 2009\)](#). [Brown, Lawphongpanich e Thurman \(1994\)](#) e [Brown et al. \(1997\)](#) uma vez no porto os navios (submarinos) podem ser deslocados para diferentes locais ao longo do cais de atracação para permitir que eles recebam melhor os serviços de que necessitam ou para dar lugar a outras embarcações deslocadas. Já [Lee e Chen \(2009\)](#) propôs um modelo que leva em consideração vários fatores importantes na prática, incluindo FCFS, a distância de liberação entre os navios e a possibilidade de deslocamento do navio ao longo do cais. Uma lista com alguns dos trabalhos encontrado na literatura e referência é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Alguns trabalhos de PABC.

Característica	Referência
Corte bidimensional com restrições	<a href="#">Garey e Johnson (1979)</a>
Tempo de chegada determinístico	<a href="#">Li, Cai e Lee (1998)</a> , <a href="#">Guan et al. (2002)</a> e <a href="#">Park e Kim (2002)</a>
Heurística baseada na regra FCFS	<a href="#">Lai e Shih (1992)</a>
Restrição temporal estática	<a href="#">Li, Cai e Lee (1998)</a> , <a href="#">Guan et al. (2002)</a> , <a href="#">Park e Kim (2002)</a> e <a href="#">Guan et al. (2002)</a>
Os navios (submarinos) podem ser deslocados para diferentes locais ao longo do cais de atracação	<a href="#">Brown, Lawphongpanich e Thurman (1994)</a> e <a href="#">Brown et al. (1997)</a>
Método FCFS, a distância de liberação entre os navios e a possibilidade de deslocamento do navio ao longo do cais	<a href="#">Lee e Chen (2009)</a>
Os tempos de chegada como um comportamento probabilístico estocástico	<a href="#">Gao et al. (2010)</a>
Teoria de corte e empacotamento bidimensional proposta por <a href="#">Guan e Cheung (2005)</a>	<a href="#">Rodrigues et al. (2016)</a>

## 2.3 Problema de Alocação de Berço Híbrido (PABH)

O PABH possui as características tanto do PABD quanto do PABC segundo [\(IMAI et al., 2005\)](#) e [\(MEISEL; BIERWIRTH, 2009\)](#). No PABH a área (pier) destinada a realizar operações de carga e/ou descarga é dividida em conjunto de seções ou berços no entanto existe a possibilidade de que um navio maior ocupe mais do que um berço e, ainda, que um berço

seja ocupado por mais de um navio (RODRIGUES et al., 2016). Para Banos et al. (2016), no PABH grandes navios podem ocupar mais de um berço no cais do terminal.

Chen e Hsieh (1999) estudaram o problema PABH com data de chegada dinâmica, considerando o tempo de carregamento como fixo e a data de chegada dos navios de forma estocástica. Ainda propuseram um modelo de PLIM considerando chegadas dinâmicas.

Moorthy, Teo Chung-Piaw Kim e Gunther (2007) propuseram um PABH, onde o seu modelo visa representar o *trade-off*<sup>4</sup> entre o tempo de espera dos navios e o custo de movimentação de contêineres entre berços e pátios. Eles modelaram como um problema de empacotamento de retângulos em um cilindro e usam um algoritmo de SA baseado em pares de sequências para resolver o problema. Os dois objetivos de seu modelo são maximizar o nível de serviço (definido como o número de embarcações atendidas em duas horas) e minimizar os custos relacionados ao movimento de contêineres entre berços e pátios.

Giallombardo et al. (2010) apresentaram um modelo de programação quadrática e um de programação linear para representar o PABH. Além disso, os autores utilizaram uma busca tabu e uma técnica de programação matemática para resolver as instâncias baseadas em dados reais.

Zhen, Chew e Lee (2011) propuseram um modelo de PABH integrado que considera a alocação do Guindaste de Cais (GC) e a localização da atracação em índices contínuos. O modelo também considera a disposição da pilha de contêineres no pátio. Eles fornecem e fazem uso de uma heurística para resolver instâncias de seu modelo. Hendriks et al. (2012) estende o modelo PABH para um porto multiterminal que pode alocar duas embarcações conectadas a diferentes terminais e gerar transporte de contêineres interterminais. Os objetivos deste modelo são equilibrar a carga de trabalho do guindaste sobre os terminais ao longo do tempo e minimizar a quantidade de transporte de contêineres interterminais.

Umang, Bierlaire e Vacca (2013) apresentaram três formulações para o PABH. Este trabalho utilizam uma extensão do layout híbrido. Eles dividem o cais em um conjunto de seções de comprimento variável, onde cada seção pode ser ocupada por no máximo um navio ou parte de um navio. Dessa forma, o navio pode ocupar várias seções. E os tempos de manuseio dependem da posição de atracação da embarcação, como também da carga a ser carregada e/ou descarregada. Este modelo considera a data de chegada dinâmica para o caso de portos a graneis.

Nesta linha de pesquisa, diversos trabalhos tais como os Hoffarth e Voss (1993), Nishimura, Imai e Papadimitriou (2001), Cordeau et al. (2005), Imai et al. (2007) e Cheong et al. (2007)

---

<sup>4</sup>O trade-off é um termo inglês que se refere às consequências de uma escolha. Ou seja, a análise fica entre o que é ganho com a escolha feita versus o que se perde ao deixar de seguir por outro caminho. No Brasil, é comum que esse termo seja utilizado como sinônimo de "perde e ganha", fonte (RETORNO, 2021)



estudaram o PABH com diversas variações de função objetivo e de restrições. [Moorthy, Teo Chung-Piaw Kim e Gunther \(2007\)](#) estudaram o problema com data de chegada dinâmica, considerando o tempo de carregamento como fixo e a data de chegada dos navios de forma estocástica. [Cordeau et al. \(2005\)](#), [Imai et al. \(2007\)](#) e [Cheong et al. \(2007\)](#) consideraram que o tempo de operação é dependente da posição de atracação do navio. [Nishimura, Imai e Papadimitriou \(2001\)](#) e [Cheong et al. \(2007\)](#) consideraram restrições de calado e chegada dinâmica. [Dai et al. \(2008\)](#) pesquisaram as posições de atracação dentro das áreas disponíveis usando SA. Uma lista com alguns dos trabalhos encontrado na literatura e referência é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Alguns trabalhos de PABH.

Característica	Referência
PLIM considerando o tempo de carregamento como fixo e a data de chegada dos navios de forma estocástica	<a href="#">Chen e Hsieh (1999)</a>
Chegada dinâmica, considerando o tempo de carregamento como fixo e a data de chegada dos navios de forma estocástica	<a href="#">Moorthy, Teo Chung-Piaw Kim e Gunther (2007)</a>
Representar o <i>trade-off</i> entre o tempo de espera dos navios e o custo de movimentação de contêineres entre berços e pátios	<a href="#">Moorthy, Teo Chung-Piaw Kim e Gunther (2007)</a>
Consideraram que o tempo de operação é dependente da posição de atracação do navio	<a href="#">Cordeau et al. (2005)</a> , <a href="#">Imai et al. (2007)</a> e <a href="#">Cheong et al. (2007)</a>
Restrição de calado e chegada dinâmica	<a href="#">Nishimura, Imai e Papadimitriou (2001)</a> e <a href="#">Cheong et al. (2007)</a>
Pesquisaram as posições de atracação dentro das áreas disponíveis usando SA	<a href="#">Dai et al. (2008)</a>
Busca Tabu e uma técnica de programação matemática para resolver as instâncias baseadas em dados reais	<a href="#">Giallombardo et al. (2010)</a>
Alocar duas embarcações conectadas a diferentes terminais e gerar transporte de contêineres interterminais	<a href="#">Hendriks et al. (2012)</a>
Dividem o cais em um conjunto de seções de comprimento variável e considera a data de chegada dinâmica para o caso de portos a graneis	<a href="#">Umang, Bierlaire e Vacca (2013)</a>



## Capítulo 3

# Problema de Alocação de Berço

Este capítulo descreve o problema de alocação de berços em terminais portuários exportadores de graneis sólidos. A seguir, será definido o problema e apresentada formulação matemática.

### 3.1 Definição do Problema

De acordo com [Vieira e Fialho \(2020\)](#), os terminais de carga a graneis necessitam ser individualizados, subdividindo-se em:

- Os terminais de graneis sólidos (*Dry Bulk*) são dedicados a movimentação de cargas secas em grande volume, sendo as principais cargas de origem agrícola e mineral. A Figura 3 ilustra os principais *commodities*<sup>1</sup> transportadas em granel, segundo ([VIEIRA, 2018](#));
- Os terminais de graneis líquidos (*Liquid Bulks*) são dedicados a movimentação de cargas líquidas em grande volume, sendo as principais cargas líquidas de origem agrícola e mineral. A Figura 2 ilustra as principais cargas transportadas em granel líquidas, segundo ([ALFREDINI; ARASAKI, 2013](#)).

Nos terminais de cargas a granel, as operações de transbordo de cargas na caso de embarque são realizada através da transferência destas dos caminhões e/ou vagões ferroviários para os silos e/ou para as áreas de armazenagem, e a partir de lá, por correias transportadoras que transportam a carga até os porões das embarcações.

---

<sup>1</sup>Vem da palavra tem a raiz *common* (comum em português), que designa produtos com características semelhantes em qualquer lugar do planeta. Essa acepção engloba produtos agrícola e minerais, fonte ([BRASIL, 2021](#))



Figura 2 – Granel líquido (Petróleo, Óleo de soja, Álcool e Gás GLP), fonte [Alfredini e Arasaki \(2013\)](#)

Em relação aos graneis sólidos, 688,9 milhões de toneladas foram movimentadas em 2020, um crescimento de 1,2%. Sobre os graneis líquidos, foram 289,5 milhões de toneladas, com crescimento de 14,8% ([ANTAQ, 2021](#)).

O minério de ferro foi a carga mais movimentada pelo setor portuário em 2020, com 356 milhões de toneladas. Na segunda colocação, vem a parte de petróleo e derivados, com 262 milhões de toneladas, seguidos por contêineres, que totalizaram 118,2 milhões de toneladas, e soja na quarta posição, com 104,2 milhões de toneladas. Na exportação, o minério de ferro também é destaque entre as mercadorias, correspondendo a 52% ([ANTAQ, 2021](#)).

As exportações das empresas brasileiras deverão crescer cerca de 13,7% em 2021 na comparação com ano fiscal de 2020, para 237,3 bilhões de dólares ([AEB, 2021](#)). Dados da [AEB \(2021\)](#), com as vendas externas do país ficando mais dependentes de *commodities* como soja, petróleo e minério de ferro e com os produtos manufaturados <sup>2</sup> sofrendo o impacto negativo da falta de competitividades decorrente do elevado Custo-Brasil. <sup>3</sup>

Segundo [Menezes \(2016\)](#), os principais produtos de exportação em granel movimentados

---

<sup>2</sup>São aqueles produtos fabricados em grande quantidade, de forma padronizada e em série. No processo de fabricação podem ser usado somente as mãos, como era feito antes da Revolução Industrial, ou grande acervo de máquinas, como passou a ocorrer após à Revolução, fonte ([PORTOGENTE, 2018](#)).

<sup>3</sup>Custo Brasil, termo que diz que fazer negócios no Brasil constitui-se como um dos principais obstáculos ao desenvolvimento econômico e revela a existência de distorções na relação entre setor público e privado, fonte ([HADDAD; HEWINGS, 1998](#)).



Figura 3 – Granel Sólido ( Soja, Minério, Milho e Carvão ), fonte ([VIEIRA, 2018](#))

em portos brasileiros são minério de ferro e pelotas, carvão, grãos, fertilizantes e granéis líquidos (combustíveis). O principal produto comercializado é o minério de ferro. São manipulados basicamente três tipos de minério-de-ferro: Granulado, *Sinter feed*<sup>4</sup> e Pelota. Para cada um deles, é derivada uma série de outros produtos, que se diferenciam de acordo com as características químicas (quantidade de ferro, alumina, sílica, manganês e umidade), e físicas (granularidade).

O problema proposto neste trabalho, considera o PAB de um terminal portuário graneleiro de minério de ferro. A Figura 4 fornece uma visão geral de um terminal graneleiro e as respectivas operações de cargas e/ou descarga. O problema de alocação de berços é um problema NP-Difícil em pesquisa operacional no que diz respeito à alocação de espaço de berço para navios em terminais de portuário.

---

<sup>4</sup>Sínter de minério de ferro, que é um aglomerado de partículas finas de minério de ferro variando de tamanho entre 0,150 mm a 6,3mm, fonte ([SCHINAZI, 2008](#)).

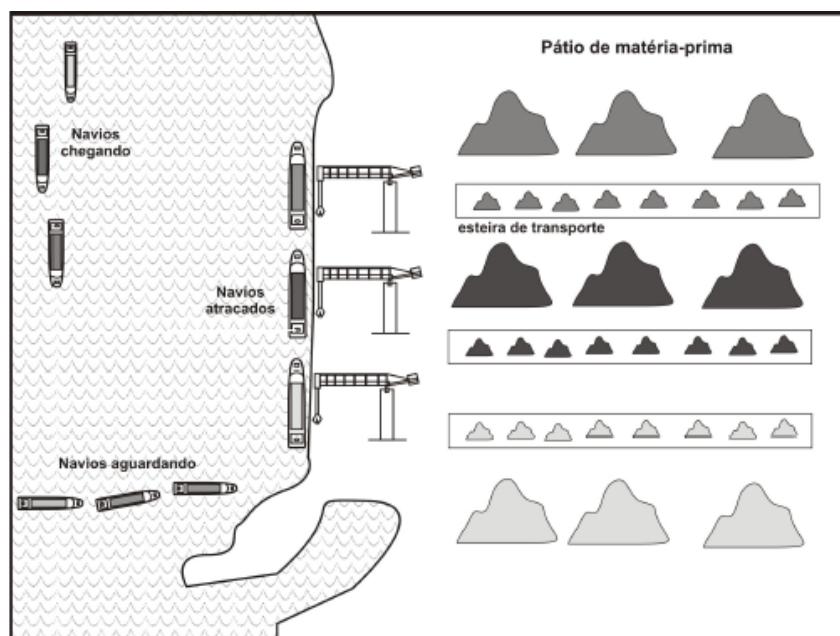


Figura 4 – Porto Graneleiro (BARROS, 2010)

Desse modo, o objetivo desse trabalho é propor um conjunto de algoritmos para determinar a sequência mais eficiente das operações de carga e/ou descarga dos navios que chegam a um determinado porto, considerando quantidade de produto em estoque<sup>5</sup> e efeitos da maré<sup>6</sup>. A partir desses objetivos pretende-se minimizar os tempos de permanência dos navios no porto nas operações de carga e/ou descarga e custos com *demurrage*.<sup>7</sup>

### 3.1.1 Controle de Estoque

Para Faria (2007) o acompanhamento diário dos estoques reais e previstos é de suma importância, uma vez que atrasos podem prejudicar não só a qualidade do produto produzido em um certo período, bem como comprometer o próprio abastecimento, levando à redução ou até mesmo paralisação da produção. Para Mattozo (2006), esses gargalos logísticos impactam diretamente nas operações portuárias, onerando consideravelmente as exportações de grãos e granéis sólidos. De acordo com Barros (2010), esses gargalos associados à produção industrial traz um ônus a mais ao porto nas operações de atracação de navios, tendo em vista que a falta de determinados insumos pode afetar a produção em casos de exportação, pois a falta de algum produto pode inviabilizar a sequência das

<sup>5</sup>O controle de estoque serve para a empresa avaliar a entrada e saída de mercadorias e auxilia uma companhia a reduzir custos e administrar a cadeia de produção e distribuição com mais eficiência, fonte (PHSOFT, 2021)

<sup>6</sup>Movimento regular e periódico das águas do mar, responsável pela sua subida e descida maré baixa e maré alta, fonte (DICIO, 2021)

<sup>7</sup>Demurrage consiste em termo jurídico utilizado no Direito Marítimo e corresponde a uma espécie de multa também denominada de “sobre-estadia”, aplicada como uma forma de compensar pelo atraso na liberação de navio carregado ou descarregado ou, não sendo caso de navio, de perda de prazo envolvendo contêineres, fonte (DIREITO, 2021)

operações de carga e consequentemente de atracação, gerando aumento dos custos de *demurrage*.

### 3.1.2 Condições Favoráveis de Maré

De acordo com dados do Centro de Hidrografia da Marinha do Brasil (CHM), durante um dia, existem dois períodos de maré cheia, preamar, e dois de maré baixa, baixamar. Onde o ciclo de uma maré inicia-se em uma preamar e termina na seguinte, passando por uma baixamar, com duração total de aproximadamente 12 horas (CHM, 2021). Para Hatteras (2021), os portos que não possuem um calado profundo precisam avaliar as tábuas de marés para verificar se o navio terá condição de atracar ou desatracar do berço naquele período de tempo. Assim, sob a influência dos níveis de maré e das correntes marítimas, as atracações de navios são limitadas em janelas de tempo predeterminadas (BARROS, 2010).

Para Menegazzo e Petterini (2018), com frequência é preciso esperar a maré subir para manobrar as embarcações com segurança, o que também gera custos de *demurrage* decorrentes da extrapolação do tempo de uso de equipamentos e serviços. Ainda segundo os autores, as limitações nos acessos aquaviários nacionais aumentam os custos de frete e logística porque, ao mesmo tempo, geram maiores custos de seguro, *demurrage* e impedem que o país participe das rotas dos grandes navios modernos e preços mais competitivos no transporte global.

## 3.2 Modelo Matemático

O modelo matemático descrito a seguir descreve o PAB de um terminal portuário graneleiro de operação de carga e/ou descarga de minério de ferro. O modelo matemático estudado foi proposto por (BARROS, 2010).

Embora este trabalho aborda um tipo específico de terminal portuário, o problema de uma maneira geral, bem como a sua formulação matemática, pode ser adaptada para tratar de diversos outros tipos de operações portuárias.

Nesse modelo, cada berço pode possuir capacidade de carregamento e/ou descarregamento diferenciado das operações. Sendo assim não há restrições na velocidade de atendimento de cada navio em relação aos berços. Portanto, um navio  $i$ , pode atracar em qualquer berço e todas as cargas (produtos) podem ser movimentadas por todos os berços. As embarcações serão atendida por ordem de chegada e somente podem iniciar as operações de carga e/ou descarga após sua chegada no terminal. E uma vez iniciado as operações de carga e/ou descargas, essas não podem sofrer interrupções.

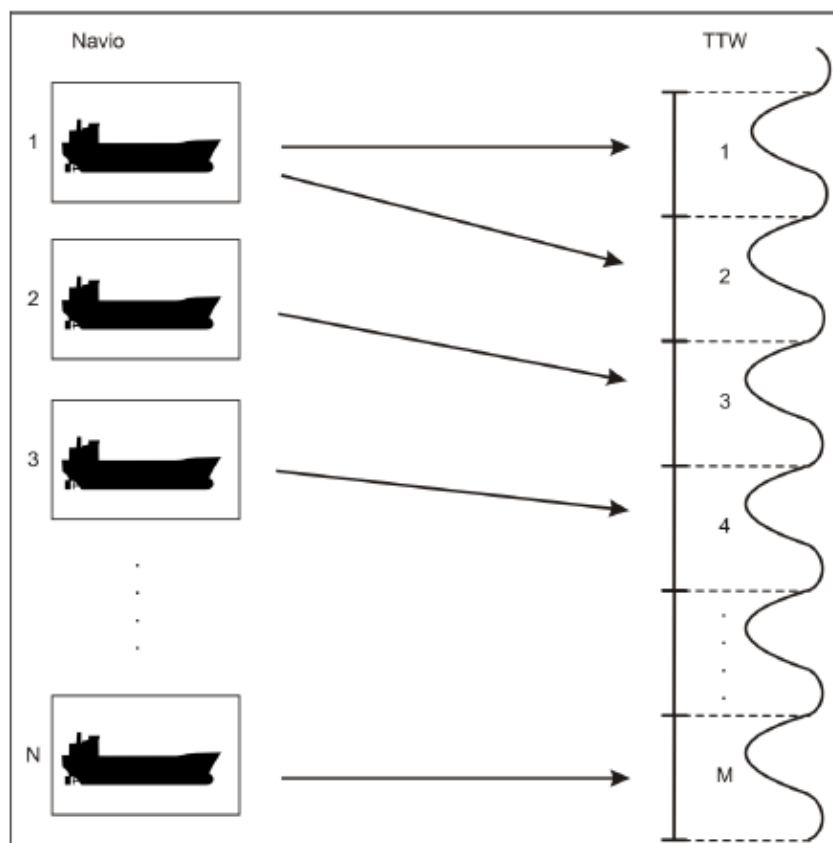


Figura 5 – PAB modelado como problema de transporte (BARROS, 2010)

As janelas de tempo disponíveis para atracação conduzem ao tratamento do tempo na forma discreta, supondo que os períodos com condições favoráveis de maré sejam suficientemente pequenos (BARROS, 2010). Para portos com restrições dos níveis maré, intervalos de tempo (horas) são fornecidos para as operações de atracamento e/ou desatracação. Portanto, o horizonte de planejamento das operações portuárias pode ser dividido por  $|M|$  janelas de tempo. Onde  $M$ , representa a quantidade de janela de tempo necessário para o navio  $i$  completar as operações de carga e/ou descarga.

De acordo com Barros (2010), o PAB é modelado com restrição espacial discreta, como um problema de transporte no qual  $N$  navios são vistos como consumidores, os berços  $L$  e as janelas de marés favoráveis  $M$  ( $TTW$ ), como fornecedores. Na Figura 5, percebe-se que cada navio  $i$  deve ser alocado a um berço  $l$  em um subconjunto de  $TTW$ 's cuja cardinalidade depende do número de marés necessárias  $h_{il}$  para que as operações de carga e/ou descarga sejam completada sem interrupção do processo em curso. Vale destacar que a restrição de disponibilidade de estoque pode inviabilizar as operações de cargas do navio.

O planejamento de todas as operações portuárias é realizado para um horizonte tempo discretizado em  $TTW$ 's. Para considerar os efeitos da maré, os  $TTW$ 's devem possuir um tempo inferior a 12 horas. Esse tempo representa, aproximadamente, o intervalo entre as oscilações das marés altas. O trabalho de Butikov (2002) apresenta uma explicação teórica



sobre o tempo de periodicidade das ondas.

O conjunto de entrada (Tabela 4), as variáveis de decisão (Tabela 5) e parâmetros da expressão 1 do modelo são apresentados a seguir com uma breve descrição. O parâmetro  $h_{il}$  representa o tempo de processamento necessário para um navio  $i$  completar a operação de carga e/ou descarga no berço  $l$  Barros (2010).

Tabela 4 – Definição dos conjuntos de entrada

Conjunto	Descrição
N	conjunto de navios
M	conjunto de $TTW$ 's
L	conjunto de posições de atracação (berços)
K	conjunto de matérias-primas operadas no porto
$a_i$	janela $TTW$ de chegada do navio $i$
$v_l$	velocidade de carregamento / descarregamento do berço $l$
$e_k$	nível de estoque inicial da carga de granel $k$
$c_k$	quantidade de consumo ou produção da carga de granel $k$
$q_{ik}$	capacidade de carga do navio $i$ em relação a carga $k$

Tabela 5 – Variáveis de decisão

Conjunto	Descrição
$x_{ij}$	$\begin{cases} 1 - & \text{se o navio } i \text{ estiver alocado a } TTW j \\ 0 - & \text{caso contrário} \end{cases}$
$u_{il}$	$\begin{cases} 1 - & \text{se o navio } i \text{ estiver alocado no berço } l \\ 0 - & \text{caso contrário} \end{cases}$
$y_{ijl}$	$\begin{cases} 1 - & \text{se o navio } i \text{ estiver alocado na janela } TTW j \text{ e no berço } l \\ 0 - & \text{caso contrário} \end{cases}$

$$h_{il} = \left\lceil \frac{\sum_{k=1}^K q_{ik}}{v_l} \right\rceil \quad (1)$$

### 3.3 Formulação Compacta

A formulação de Programação Linear Inteira (PLI) para o PAB em estudo apresentado nas expressões (2) à (14) foi proposto por (BARROS, 2010). O objetivo é minimizar o somatório dos tempos de serviços sobre todas as operações no horizonte de planejamento dado. Ainda de acordo Barros (2010), nesta abordagem, porém, optou-se por não considerar o *demurrage* diferenciado como fator priorização de navios. Sendo assim, apenas o tempo de serviço total é utilizado com baseia a utilização de *TTW's* por cada navio.

#### 3.3.1 Formulação Compacta

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{j=a_i}^M \sum_{l=1}^L \left\lceil \frac{j - a_i + 1}{h_{il}} \right\rceil \times y_{ijl} \quad (2)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^{a_i-1} x_{ij} = 0, \quad \forall i \in N \quad (3)$$

$$\sum_{j=a_i}^M x_{ij} = \sum_{l=1}^L h_{il} \times u_{il}, \quad \forall i \in N \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^N y_{ijl} \leq 1, \quad \forall j \in M, \forall l \in L \quad (5)$$

$$\sum_{l=1}^L u_{il} = 1, \quad \forall i \in N \quad (6)$$

$$\sum_{z=1}^{j-1} x_{iz} - j \times x_{ij-1} + j \times x_{ij} \leq j, \quad \forall i \in N, \forall j > a_i \in M \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{z=1}^j \sum_{l=1}^L \frac{q_{ik}}{h_{il}} \times y_{izl} \geq j \times c_k - e_k \quad \forall j \in M, \forall k \in K \quad (8)$$

$$y_{ijl} \geq x_{ij} + u_{il} - 1 \quad \forall i \in N, j \in M, l \in L \quad (9)$$

$$y_{ijl} \leq x_{ij} \quad \forall i \in N, j \in M, l \in L \quad (10)$$



$$y_{ijl} \leq u_{il} \quad \forall i \in N, j \in M, l \in L \quad (11)$$

$$u_{il} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in N, \forall l \in L \quad (12)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in N, \forall j \in M \quad (13)$$

$$y_{ijl} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in N, \forall j \in M, \forall l \in L \quad (14)$$

O conjunto de restrições da formulação compacta do PAB são expressas pelas restrições (3) à (14). As restrições (3) e (4) obrigam os navios a atracarem após suas janelas  $TTW$ 's de chegada  $a_i$  e permanecerem em operação durante  $h_{il}$  janelas  $TTW$ 's para completar a operação. O número de navios alocados a uma janela  $TTW$  não podem exceder o total de posições de berços  $l$ , restrição (5). A restrição (6) garantem que o navio  $i$  seja alocado exatamente um berço  $l$ . A restrição (7) evitam soluções com interrupções prematuras nas operações do navio. A restrição (8) garantem que os níveis mínimos de estoque maiores que zero são garantidos. As restrições (9) à (11) em conjunto com função objetivo garantem a consistência do modelo sem tornar-lo não linear. Objetivo é obter  $y_{ijl} = 1$  quando  $x_{ij} = 1$  e  $u_{il} = 1$ , e  $y_{ijl} = 0$  quando pelos menos uma das variáveis,  $x_{ij}$  ou  $u_{il}$ , seja igual a 0. As restrições (12) à (14) definem o domínio das variáveis.

### 3.4 Formulação Estendida

A seguir é apresentado um modelo compacto estendido formulado considerando a formulação proposta por Barros (2010) para resolver o PAB em Portos Graneleiro com restrições de estoque e condições de maré. O objetivo continua sendo minimizar o custo acumulado sobre todas as operações em um horizonte de planejamento dado. Assim, a função objetivo (15) da formulação matemática compacta estendida do PAB é dada conforme segue.

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{j=a_i}^M \sum_{l=1}^L \left\lceil \frac{j - a_i + 1}{h_{il}} \right\rceil \times y_{ijl} + \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^L u_{il} - N \quad (15)$$

Sujeito a: As restrições (3) à (14)

$$\sum_{j=1}^M y_{ijl} \leq h_{il} \times u_{il} \quad \forall i \in N, \forall l \in L \quad (16)$$

$$\sum_{i=1}^N u_{il} \geq 1 \quad \forall l \in L \quad (17)$$

O PAB na formulação estendida, é factível se satisfaz as seguintes restrições (3) à (14). A restrição (16) garantem que o somatório das janelas  $TTW$ 's do navio  $i$  alocado ao berço  $l$  devem ser menor ou igual a  $h_{il}$  do navio  $i$  em relação o berço  $l$  multiplicado pela variável de decisão  $u_{il}$ . A restrição (17) garantem que todo berço  $l$  deve receber pelos menos 1 navio  $i$  alocado. Os principais fatores que impactam as restrições (16) e (17) são: janelas de tempo  $TTW$ 's mais apertada e restrição de acesso aos terminais (berço) em relação aos navios. Visando à obtenção de soluções factíveis aderentes à operação real, e que estas possam ser obtidas em curtos espaços de tempo.

## Capítulo 4

### Abordagem de solução

O modelo de Programação Linear Inteiro Misto (PLIM) para o problema PAB estudado é de fácil compreensão e extremamente simples, porém, por outro lado, computacionalmente de difícil solução. O número elevado de possíveis soluções candidatas a solução do problema tornam totalmente inviável o uso de *solvers* comerciais, como *CPLEX*®. Para tentar contornar estas limitações, o presente trabalho apresenta uma abordagem heurística para resolver o PAB.

#### 4.1 Introdução

Na formulação compacta estendida proposta na seção anterior, a restrição (16) garante a alocação dos navios no berço. Estas restrições requerem um grande consumo de memória e processamento, e estabelecem dificuldades para solucionar o problema estudado.

O grande número de restrições e variáveis inteiras, bem como a quantidade de possíveis soluções para o problema, especialmente sequência de alocação dos navios  $i$  no berço  $l$ , tornam totalmente inviável o uso de *solvers* comerciais, como *CPLEX*®, quando as instâncias do problema abordam situações reais. Por outro lado, o uso de métodos heurísticos são procedimentos que tratam problemas de otimização sem dispor de garantias teóricas nem de que a solução ótima exata seja obtida e nem tampouco de garantias que a solução obtida tenha algum tipo de proximidade em relação à solução ótima encontrada segundo (CUNHA; TAKAHASHI; ANTUNES, 2013). Para contornar estas limitações e obter boas soluções, foi desenvolvido um algoritmo que combina o método heurístico *Large Neighborhood Search* (LNS) e permutação simples.

O algoritmo consiste basicamente em gerar uma solução inicial baseada no método FIFO (onde o primeiro navio a chegar e o primeiro navio a ser atendido) para o obter uma solução inteira factível, respeitando a restrição (3) que obrigam os navios  $i$  a atracarem após suas janelas *TTW's* de chegada, a restrição (4) que garantem aos navios  $i$  permanecerem em

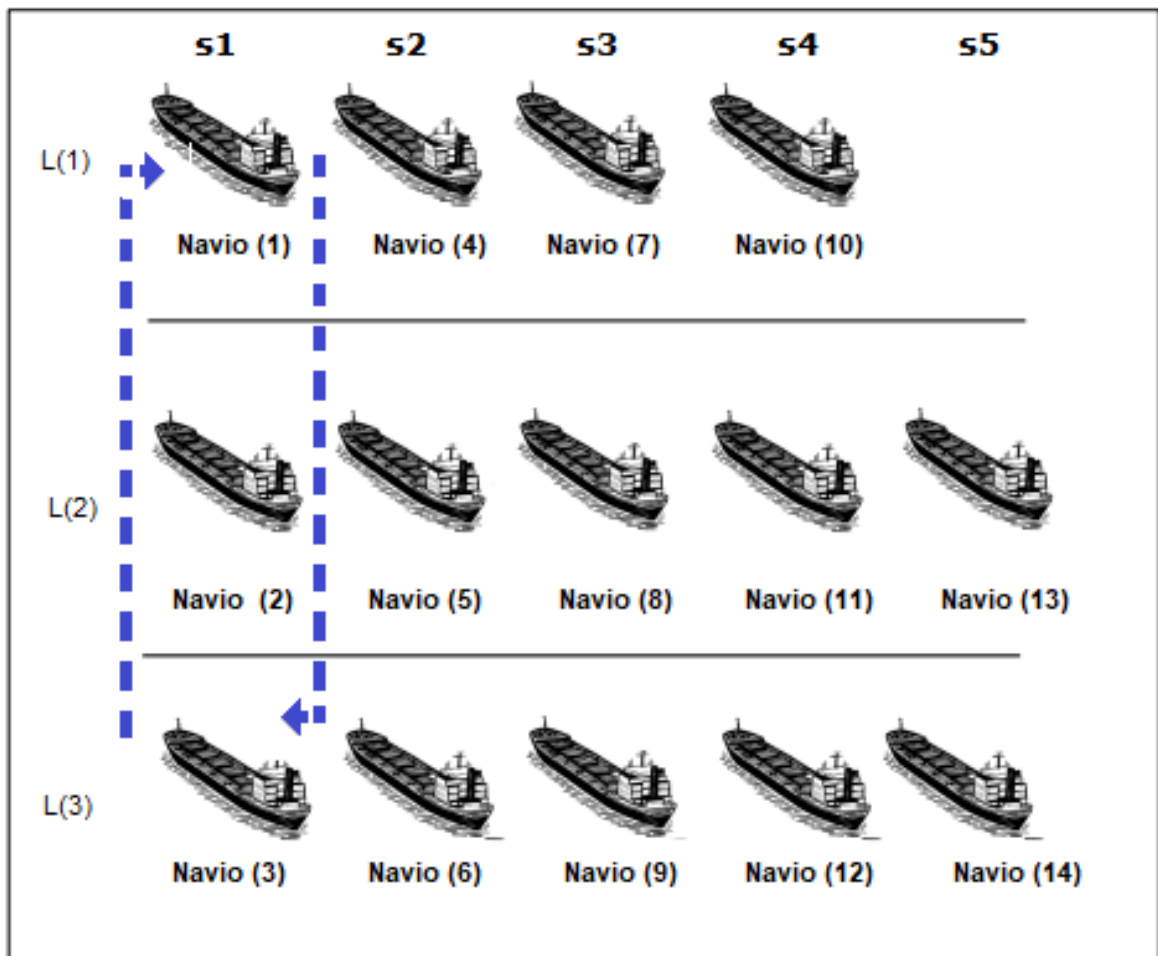


Figura 6 – Movimento dos navios entre os berços

operação durante a  $h_{il}$  janelas  $TTW$ 's para completar a operação de carga e/ou descarga e a restrição (5) garantem que o número de navios alocados a uma janela  $TTW$  não podem exceder o total de posições de Berços. Para cada navio  $i$ , calcula-se o custo de alocação em cada berço  $l$ . Se existir berço  $l$  cuja a cardinalidade do conjunto de navios alocado seja 0 então aloca-se o navio  $i$  no berço  $l$  de menor custo (sem nenhum navio alocado) caso contrário aloca-se o navio  $i$  no berço  $l$  de menor custo (entre todos os berços). Em seguida, são gerados as permutações simples para cada nível da sequência de atracação ( $s1, s2, s3, \dots$ ), que será responsável pela realocação dos navios entre os berços conforme a Figura 6. Após é executado o método heurístico LNS que será responsável por realocar os navios dentro dos berços de acordo com a Figura 7. E por fim, o processo de gerar as permutações simples e LNS são realizados para todas as sequência de atracação até que não seja encontrada nenhuma melhoria da solução (condição de parada).

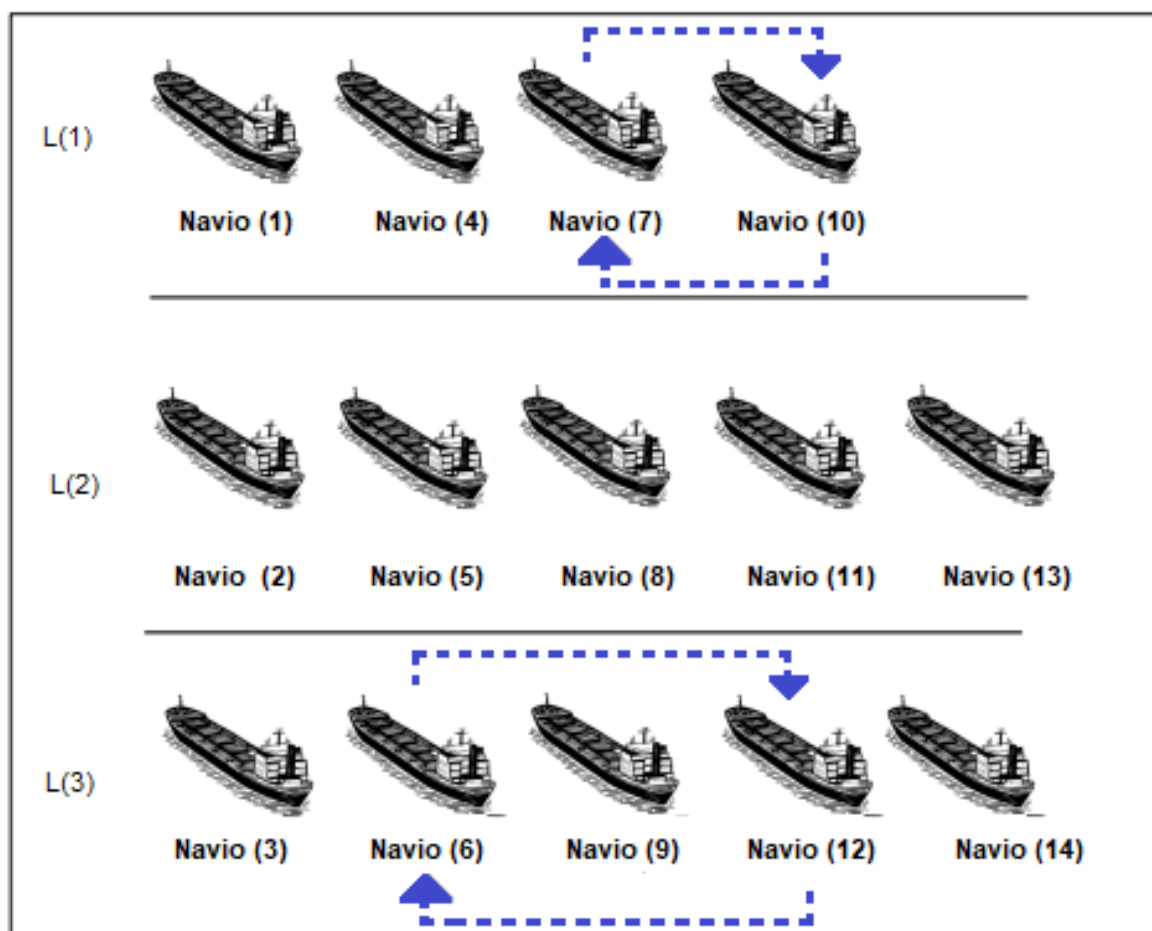


Figura 7 – Movimento dos navios no berço

A Figura 8 apresentam um fluxograma da estratégia adotada. A seguir nas próxima seções é apresentado os algoritmos propostos.

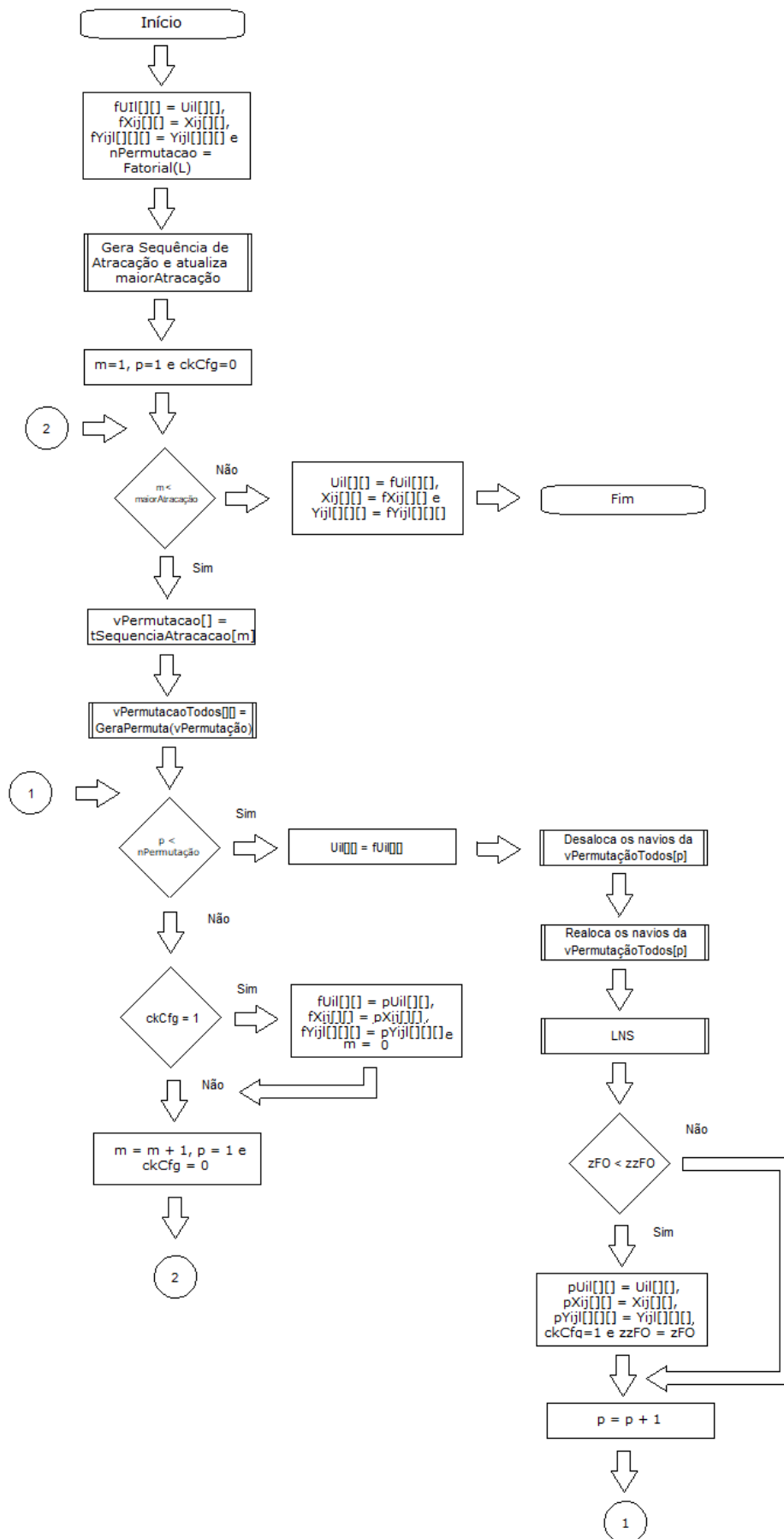


Figura 8 – Fluxograma da Heurística PAB-HE

## 4.2 Algoritmo PAB-HE

Nesta seção é apresentado um algoritmo heurístico para resolver o PAB. No pseudocódigo da função principal do Algoritmo proposto (1) a seguir as seguintes operações são realizadas:

- (1) O algoritmo recebe os seguintes dados de entrada. Onde  $N$  representa a cardinalidade do conjunto de navios  $i$ ,  $M$  representa a cardinalidade do conjunto de janela  $TTW$ 's,  $L$  representa a cardinalidade do conjunto de posições de atracação do berço  $l$ ,  $a_i$  representa o conjunto de janela  $TTW$  de chegada do navio  $i$ ,  $h_{il}$  representa o tempo de processamento necessário para um navio  $i$  completar operação de carga e/ou descarga no berço  $l$ , a variável de decisão  $u_{il}$  representa se o navio  $i$  estiver alocado no berço  $l$ , a variável de decisão  $x_{ij}$  representa se o navio  $i$  estiver alocado na janela  $TTW$   $j$ , a variável de decisão  $y_{ijl}$  representa se o navio  $i$  estiver alocado na janela  $TTW$   $j$  no berço  $l$  e a variável  $zFO$  representa a função objetivo;
- (2) A variável  $zzFO$  representa a melhor função objetivo (solução inteira) e as variáveis auxiliares:  $(fu_{il}$  e  $pu_{il})$  representa se o navio  $i$  estiver alocado no berço  $l$ ,  $(fx_{ij}$  e  $px_{ij})$  representa se o navio  $i$  estiver alocado na janela  $TTW$   $j$  e  $(fy_{ijl}$  e  $py_{ijl})$  se o navio  $i$  estiver alocado na janela  $TTW$   $j$  e no berço  $l$  da da solução candidata a melhor solução. A variável  $nPermutacao$  recebe o fatorial da cardinalidade de berços ( $L$ ) de acordo com pseudocódigo do Algoritmo 7, a variável  $maiorAtracacao$  que recebe a cardinalidade do berço que possui mais navio  $i$  alocado (maior número de navios), a variável  $vPermutacao[L]$  que recebe permutação por sequência de atracação do navios  $i$ , a variável  $vPermutacaoTodos[nPermutacao][L]$  que recebe todas as permutações da sequência de atracação do navios  $i$  em relação aos berços  $l$  (variável  $vPermutacao[]$ ) e variável  $tSequenciaAtracacaoBerco[L][N]$  que recebe a sequência de atracação dos navios  $i$  por berços  $l$ ;
- (3) Gera uma solução inicial factível de acordo com pseudocódigo do Algoritmo (9);
- (4) A variável  $zzFO$  recebe  $MAXB$ , atualiza as variáveis de decisão  $(u_{il}, x_{ij}$  e  $y_{ijl})$  (Solução candidata a melhor solução), a variável  $fu_{il}$  recebe a variável de decisão  $u_{il}$ , a variável  $fx_{ij}$  recebe a variável de decisão  $x_{ij}$  e a variável  $fy_{ijl}$  recebe a variável de decisão  $y_{ijl}$ ;
- (5) Gera a sequência de atracação dos navios  $i$  nos berços  $l$  de acordo com pseudocódigo do Algoritmo (4) e atualiza as variáveis auxiliares  $maiorAtracacao$  e  $tSequenciaAtracacaoBerco[][]$ ;
- (6) Inicializa as variáveis auxiliares:  $m$  recebe 1,  $p$  recebe 1 e  $ckCfg$  recebe 0;
- (7) Faz enquanto  $m < maiorAtracacao$ ;
  - (7.1) Para cada berço  $l$ ;
    - (7.1.1) A variável  $vPermutacao[l]$  recebe  $tSequenciaAtracacaoBerco[l][m]$  (os navios  $i$  alocados na sequência  $m$  de atracação [sequência de  $s1..sN$ ] para cada berço  $l$ );

- (7.2) A variável  $vPermutacaoTodos[][]$  recebe todas as permutações da variável  $vPermutacao[]$  de acordo com pseudocódigo o Algoritmo (5);
- (7.3) A variável auxiliar  $ckCfg$  recebe 0 e  $p$  recebe 1;
- (7.4) Faz enquanto  $p < nPermutacao$ ;
  - (7.4.1) A variável de decisão  $u_{il}$  recebe  $f u_{il}$ ;
  - (7.4.2) Para cada berço  $l$ ;
    - (7.4.2.1) Se  $vPermutacao[] = -1$  (Se não tem navio  $i$  alocado no berço  $l$ ) retorne para o Item (7.4.2) ;
    - (7.4.2.2) A variável de decisão  $u_{il}[][]$  recebe 0 para todos os navios  $i$  que pertence a  $vPermutacao[l]$  (Desaloca todos os navios  $i$  da  $vPermutacao[]$  em todos os berços);
  - (7.4.3) Para cada berço  $l$ ;
    - (7.4.3.1) Se  $[vPermutacaoTodos[p][l]][l] = -1$  (Se não tem navio  $i$  alocado no berço  $l$ ) retorne para o Item (7.4.3);
    - (7.4.3.2) A variável de decisão  $u_{il}[vPermutacaoTodos[p][l]][l]$  recebe 1;
  - (7.4.4) Faz o refinamento da solução pelo método heurístico LNS de acordo com pseudocódigo o Algoritmo (2);
  - (7.4.5) Se  $zFO < zzFO$  então  $zzFO$  recebe  $zFO$ , a variável  $pu_{il}$  recebe a variável de decisão  $u_{il}$ , a variável  $px_{ij}$  recebe a variável de decisão  $x_{ij}$ , a variável  $py_{ijl}$  recebe a variável de decisão  $y_{ijl}$  e a variável auxiliar  $ckCfg$  recebe 1;
  - (7.4.6) A variável auxiliar  $p$  recebe  $p + 1$ ;
  - (7.4.7) Retorne para o item (7.4).
- (7.5) Se  $ckCfg = 1$  (Encontramos uma solução candidata a ótima) então a variável  $f u_{il}$  recebe  $pu_{il}$ , a variável  $f x_{ij}$  recebe a variável  $px_{ij}$ , a variável  $f y_{ijl}$  recebe a variável  $py_{ijl}$ , a variável  $m$  recebe 0, a variável  $ckCfg$  recebe 0, gera uma nova sequência de atracação dos navios  $i$  nos berços  $l$  de acordo com pseudocódigo do Algoritmo (4) e atualiza as variáveis auxiliares ( $maiorAtracao$  e  $tSequenciaAtracaoBerco$ );
- (7.6)  $m$  recebe  $m + 1$  e retorne para item 7.
- (8) Atualiza as variáveis de decisão:  $u_{il}$  recebe  $f u_{il}$ ,  $x_{ij}$  recebe a variável  $f x_{ij}$  e  $y_{ijl}$  recebe a variável  $f y_{ijl}$ .



---

## Algoritmo 1: Pseudocódigo do PAB-HE( $N, M, L, ai, hil, uil, xij, yijl, zFO$ )

---

```
nPermutacao  $\leftarrow$  fatorial(L); // Número de permutações
m  $\leftarrow$  0; zzFO  $\leftarrow$  zFO; maiorAtracao  $\leftarrow$  0; // Inicializa as variáveis auxiliares
vPermutacao[L]; vPermutacaoTodos[nPermutacao][L]; // Declare as variáveis auxiliares
GeraSolucaoInicial(uil, xij, yijl); // Gera uma solução inicial pelo método FIFO
fuil[]  $\leftarrow$  uil[]; fxij[]  $\leftarrow$  xij[]; fyijl[]  $\leftarrow$  yijl[]; // Atualiza as variáveis de decisão com a solução candidata à ótima
GeraAtracao(N, M, L, uil, yijl, maiorAtracao, tSequenciaAtracaoBerco); // Gera a sequência de atracação dos navios i nos berços

enquanto m < maiorAtracao faça
    // Atualiza a variável vPermutacao[] de acordo com o valor do m
    para l  $\leftarrow$  1 até L faça
        | vPermutacao[l]  $\leftarrow$  tSequenciaAtracaoBerco[l][m];
    fim

    // Gera todas as permutações da variável vPermutacao[]
    vPermutacaoTodos[]  $\leftarrow$  GeraPermutacao(vPermutacao[]);
    ckCfg  $\leftarrow$  0; // Declara a variável auxiliar ckCfg
    para n  $\leftarrow$  1 até nPermutacao faça
        para i  $\leftarrow$  1 até N faça
            para l  $\leftarrow$  1 até L faça
                | uil[i][l]  $\leftarrow$  fuil[i][l]; // O variável uil[] recebe a melhor solução encontrada
            fim
        fim

        // Desaloca os navios i que pertence a permutação
        para i  $\leftarrow$  1 até L faça
            se vPermutacao[i] = -1 então
                | continue;
            fim

            para l  $\leftarrow$  1 até L faça
                | uil[vPermutacao[i]][l]  $\leftarrow$  0;
            fim
        fim

        // Aloca o navio i no berço l
        para i  $\leftarrow$  1 até L faça
            se vPermutacaoTodos[p][l] = -1 então
                | continue;
            fim

            para l  $\leftarrow$  1 até L faça
                | uil[vPermutacaoTodos[p][l]][i]  $\leftarrow$  1;
            fim
        fim

        LNS(N, M, L, ai, hil, uil, xij, yijl, zFO);
        // Se encontrou uma melhor a solução, então atualiza.
        se zFO < zzFO então
            zzFO  $\leftarrow$  zFO;
            para i  $\leftarrow$  1 até N faça
                para j  $\leftarrow$  1 até M faça
                    para l  $\leftarrow$  1 até L faça
                        | pui[i][l]  $\leftarrow$  uil[i][l]; pxij[i][l]  $\leftarrow$  xij[i][l]; pyijl[i][l]  $\leftarrow$  yijl[i][l];
                    fim
                fim
            fim

            // Atualiza a variável auxiliar ckCfg ckCfg  $\leftarrow$  1;
        fim
    fim

    // Se encontrou uma solução candidata à ótima então atualiza a solução e reconstrói a sequência de atracação dos navios nos berços
    se ckCfg = 1 então
        para i  $\leftarrow$  1 até N faça
            para j  $\leftarrow$  1 até M faça
                para l  $\leftarrow$  1 até L faça
                    | fuil[i][l]  $\leftarrow$  pui[i][l]; xuij[i][l]  $\leftarrow$  pxij[i][l]; fyijl[i][l]  $\leftarrow$  pyijl[i][l];
                fim
            fim
        fim

        GeraAtracao(N, M, L, uil, yijl, maiorAtracao, tSequenciaAtracaoBerco);
        m  $\leftarrow$  0;
    fim

    m  $\leftarrow$  m + 1;
fim
```

---

### 4.3 Heurística de Refinamento

O procedimento de permutação dos navios nos berços proposto neste estudo pode solucionar em qual o berço  $l$  o navio  $i$  está alocado. Contudo, eventualmente, as soluções ainda pode ser melhorada para o PAB. Os métodos heurísticos abordados a seguir podem ser capaz de fornecerem uma solução de qualidade para o problema abordado neste trabalho.

#### 4.3.1 *Variable Neighborhood Search (VNS)*

A meta heurística VNS que foi proposta em meados da década de 90 por (MLADENOVIC; HANSEN, 1995). O VNS é um método de busca local, o qual consiste em explorar o espaço de soluções, por meio de trocas sistemáticas de estruturas de vizinhança. Contrariamente a outras meta-heurísticas baseadas em métodos de busca local, o método VNS não segue uma trajetória, mas sim explora vizinhanças gradativamente mais “distantes” da solução corrente e focaliza a busca em torno de uma nova solução se, e somente se, um movimento de melhora é realizado (GLOVER; KOCHENBERGER, 2003). A meta heurística de busca em vizinhança variável é uma extensão de um algoritmo de busca local que utiliza a estratégia de mudança de tamanho da vizinhança para sair de soluções ótimas locais.

#### 4.3.2 *Iterated greedy algorithm*

Algoritmos gulosos iterados, do inglês *Iterated greedy algorithm* foram introduzidos por (RUIZ; STUTZLE, 2007). Depois da primeira construção, o algoritmo repetidamente destrói parte da solução atual, e reconstrói-a gulosamente. A forma mais simples da destruição é remover  $d$  elementos na representação por conjuntos, ou resetar  $d$  variáveis na representação por variáveis e aplicar um algoritmo guloso, respectivamente um algoritmo prioridade a partir da solução parcial resultante para obter uma nova solução completa.

Um algoritmo guloso iterativo é o análogo de uma busca local iterativa. Aplicando uma busca local em cada iteração, um algoritmo guloso iterado vira uma busca local iterada, na qual a perturbação é realizada por destruição e reconstrução via um algoritmo guloso.

A estratégia de destruir e reconstruir uma solução também é aplicada em buscas em vizinhanças grandes, e também foi chamada nome *Ruin and Recreate* por (SCHRIMPF et al., 2000).

#### 4.3.3 *Large Neighborhood Search (LNS)*

A heurística LNS foi introduzida por Shaw (1997) para resolução de problema de roteamento. No LNS, uma solução inicial é gradualmente aprimorada por destruição e reparação. Esse método é semelhante a heurística de *Ruin and Recreate* (RR) proposto por Schrimpf et al. (2000). De acordo com Ropke e Pisinger (2006), a estrutura LNS pode ser considerada

uma variante da busca em vizinhança variável VNS proposta por (HANSEN; MLADENOVIC, 1999).

Para Moraes e Silva (2013), a principal diferença é que a LNS opera em um tipo de vizinhança com tamanho variável, enquanto a VNS opera com diferentes estruturas de vizinhanças. Ainda de acordo com Shaw (1997), é um simples procedimento de busca local guloso. Portanto, a pesquisa gulosa é simples, rápida e é adequada para fornecer muito bons resultados para o problema estudado.

A heurística desenvolvida nesta seção trabalho é baseada no método LNS, o objetivo é fazer uma busca local para encontrar a melhor sequência (menor tempo de serviço) para os navios que estão alocados no respectivo berço  $l$ . Após visitar todos os berços do experimento é retornado uma solução inteira.

No pseudocódigo do Algoritmo (2) a seguir as seguintes operações são realizadas:

- (1) O algoritmo recebe os seguintes dados de entrada. Onde  $N$  representa a cardinalidade do conjunto de navios  $i$ ,  $M$  representa a cardinalidade do conjunto de janela  $TTW$ 's,  $L$  representa a cardinalidade do conjunto de posições de atracação do berço  $l$ ,  $a_i$  representa o conjunto de janela  $TTW$  de chegada do navio  $i$ ,  $h_{il}$  representa o tempo de processamento necessário para um navio  $i$  completar operação de carga e/ou descarga no berço  $l$ , a variável de decisão  $u_{il}$  representa se o navio  $i$  estiver alocado no berço  $l$ , a variável de decisão  $x_{ij}$  representa se o navio  $i$  estiver alocado na janela  $TTW$   $j$ , a variável de decisão  $y_{ijl}$  representa se o navio  $i$  estiver alocado na janela  $TTW$   $j$  no berço  $l$  e a variável  $zFO$  representa a função objetivo (solução inteira) da iteração.
- (2) Destroi a solução das variáveis de decisão:  $x_{ij}$  e  $y_{ijl}$ . Inicializa o variável auxiliar  $zL[]$ ;
- (3) Para cada navio  $i$ 
  - (3.1) Para cada berço  $l$ 
    - (3.1.1) Atualiza quantidade de navio  $i$  por berço  $l$  ( $zL[l]$  recebe  $zL[l] + u_{il}[i][l]$ );
- (4) Para cada berço  $l$ ;
  - (4.1) Declare um variável temporária  $zNN[zL[l]][3]$  para realizar as operações de alocação dos navios  $i$  que estão alocado no berço  $l$ ;
  - (4.2) Atualize a variáveis auxiliares:  $zTTW$  recebe  $MAXB$  e  $pNi$  recebe 1;
  - (4.3) Para cada navio  $i$ ;
    - (4.3.1) Se o navio  $i$  estiver alocado no berço  $l$  então  $zNN[pNi][1]$  recebe 1 (identifica o navio  $i$ ),  $zNN[pNi][2]$  recebe 0 (identifica o tempo de serviço de alocação do navio  $i$ ),  $zNN[pNi][3]$  recebe 1 (identifica o status do navio  $i$  como não alocado), a variável auxiliar  $zTTW$  recebe (Se  $zTTW$  for menor que janela de chegada  $TTW$   $a_i$  do navio  $i$  então  $zTTW$  caso contrário  $a_i$  do navio  $i$ ) e a variável  $pNi$  recebe  $pNi + 1$ ;

(4.3.2) Retorne para Item (4.3.1).

- (5) Reconstroi a solução para todos os navios  $i$  que estão alocado no berço  $l$  de acordo com o pseudocódigo do Algoritmo (3), enquanto  $zN > 0$ ;
- (6) Repita o processo para o próximo berço  $l$ .

---

**Algoritmo 2:** Pseudocódigo do LNS( $N, M, L, a_i, h_{il}, u_{il}, x_{ij}, y_{ijl}, zFO$ )

---

```
// Declara e inicializa as variáveis auxiliares
 $zL[L] \leftarrow 0$ ;  $zTTw \leftarrow 0$ ;  $zFO \leftarrow 0$ ;
// Destroi a solução (variáveis decisão:  $x_{ij}$  e  $y_{ijl}$ )
para  $i \leftarrow 1$  até  $N$  faça
    para  $j \leftarrow 1$  até  $M$  faça
        para  $l \leftarrow 1$  até  $L$  faça
             $x_{ij}[i][j] \leftarrow 0$ ;
             $y_{ijl}[i][j][l] \leftarrow 0$ ;
             $zL[l] \leftarrow 0$ ;
        fim
    fim
fim
// Totaliza o quantidade de navio  $i$  por berço  $l$ 
para  $i \leftarrow 1$  até  $N$  faça
    para  $l \leftarrow 1$  até  $L$  faça
         $zL[l] \leftarrow zL[l] + u_{il}[i][l]$ ;
    fim
fim
// Calcula o tempo de serviço do navio  $i$  em relação ao berço  $l$  ( Reconstrói )
para  $l \leftarrow 1$  até  $L$  faça
    // Declara variável ( $zNN$ ) temporário para realizar a alocação do navio  $i$  no berço  $l$ 
     $zNN[zL[l]] [ 3 ]$ ;
    // Última janela  $TTW$  do berço  $l$  disponível para atracação
     $zTTw \leftarrow MAXB$ ;
    // Atualiza os dados do navio  $i$  para o berço  $l$  ( temporário )
     $pNi \leftarrow 1$ ;
    // Inicializa a variável  $zNN$ 
    para  $i \leftarrow 1$  até  $N$  faça
        // se o navio  $i$  está alocado no berço  $l$  então atualiza
        se  $u_{il}[i][l] = 1$  então
            // navio  $i$ 
             $zNN[pNi][1] \leftarrow i$ ;
            // tempo de serviço
             $zNN[pNi][2] \leftarrow 0$ ;
            // Status
             $zNN[pNi][3] \leftarrow 1$ ;
            // Atualiza a menor janela  $TTW$  a partir de chegada disponível
             $zTTw \leftarrow \min(zTTw, a_{il}[i])$ ;
            // Quantidade de navio mais 1
             $pNi \leftarrow pNi + 1$ ;
        fim
    fim
    // Somatório dos navios  $i$  alocados no berço  $l$ 
     $zN \leftarrow zL[l]$ ;
    // Avalia a condição de parada
    enquanto  $zN > 0$  faça
        // Reconstrói a solução
         $ReconstróiSolução(l, M, a_i, h_{il}, x_{ij}, y_{ijl}, zL, zN, zNN, zTTw, zFO)$ ;
    fim
fim
```

---

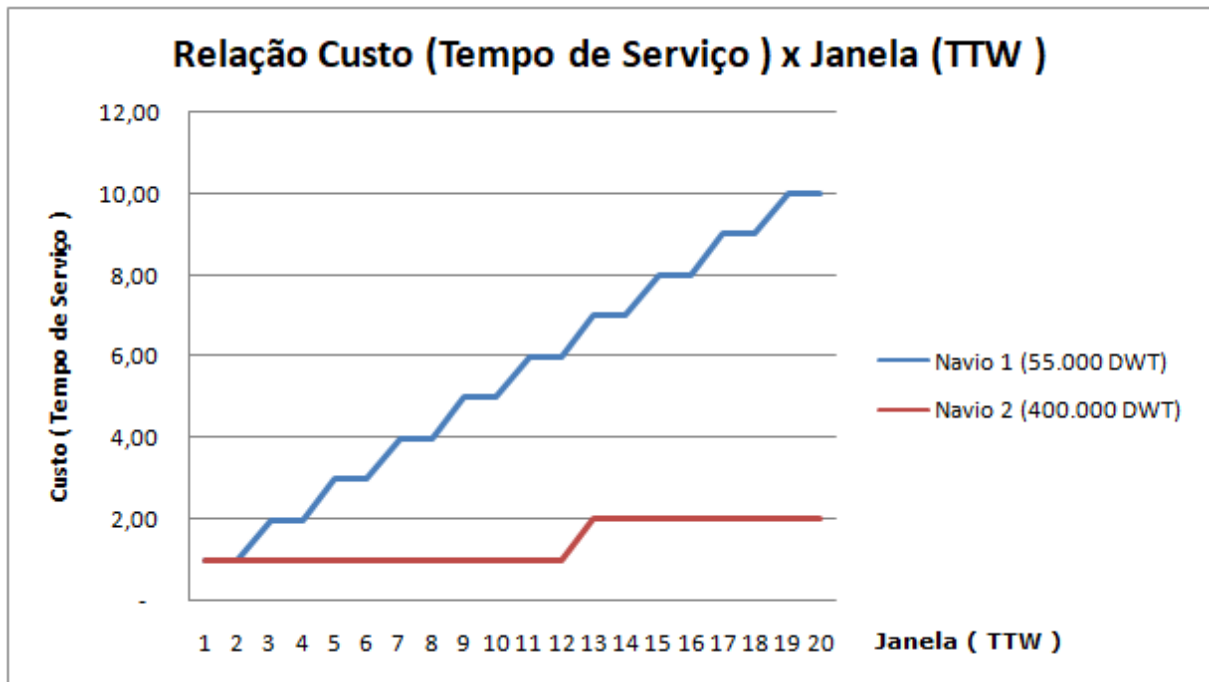


Figura 9 – Movimentação dos navios 1 e 2 considerando a janela de atracação  $TTW_j$  para o berço 1.

A principal ideia desta heurística é remover (alocar) primeiro os navios  $i$  de menor capacidade de carga em função do menor tempo de processamento necessário  $h_{il}$  para um navio  $i$  completar a operação de carga e/ou descarga, respeitando as restrições (3) à (6). Pois quanto maior o tempo de permanência dessas embarcações nos terminais portuários maior será o seu tempo de serviço (custo). O  $h_{il}$  está relacionado a capacidade de movimentar os navios  $i$  dentro do berço, quanto menor for o  $h_{il}$  menor será possibilidade movimentação e quanto maior for o  $h_{il}$  maior será a possibilidade de movimentação da embarcação dentro do berço. Para melhor ilustrar essa abordagem devemos analisar o comportamento do janela de atracação  $TTW_j$  na Equação 2 e a Tabela 6 para os navios 1 e 2. Onde o navio 1 tem capacidade de carga igual a 55.000 DWT tem tempo de processamento  $h_{il}$  é igual a 2 e o navio 2 com capacidade de carga igual a 400.000 DWT tem o  $h_{il}$  é igual a 12 ambas as embarcações deve atracar no berço 1. Observe na Figura 9 que o crescimento dos tempos de serviços do navio 1 é superior ao navio 2. Isso demonstra que a movimentação do navio 1 no berço produz um aumento do tempo de serviço superior ao navio 2. Então, os navios de menor capacidade de carga devem ter prioridade na fila de atracação, isto é, desde que os navios  $i$  atendam a restrição (3). Por outro lado, os navios de maior capacidade de carga permitem uma maior movimentação dentro do berço.

No pseudocódigo do Algoritmo (3), o objetivo é definir o menor tempo de serviço dos navios (i) e realocar (reconstrói) no berço  $l$ . A seguir é apresentado as operações realizadas:

- (1) O algoritmo recebe os seguintes dados de entrada. Onde  $l$  representa o berço onde deve reconstruir a solução inteira,  $M$  representa a cardinalidade do conjunto de janela  $TTW$ 's,  $a_i$  representa o conjunto de janela  $TTW$  de chegada do navio  $i$ ,  $h_{il}$  representa o tempo de processamento necessário para um navio  $i$  completar operação de carga e/ou descarga no berço  $l$ , a variável de decisão  $x_{ij}$  representa se o navio  $i$  estiver alocado na janela  $TTW$   $j$ , a variável de decisão  $y_{ijl}$  representa se o navio  $i$  estiver alocado na janela  $TTW$   $j$  no berço  $l$ ,  $zL$  representa a quantidade de navios alocado no berço  $l$ ,  $zN$  representa o contador de navios  $i$  alocado no berço  $l$ ,  $zNN$  representa a variável que armazena (a identificação, tempo de serviço e o status do navio  $i$ ) alocado no berço  $l$ , a variável  $jTTw$  representa a última janela disponível para alocar o navio  $i$  no berço  $l$  e a variável  $zFO$  representa a função objetivo da solução inteira da iteração.
- (2) Atualiza as variáveis  $zN$  recebe  $zL[l]$  (Quantidade de navios alocado no berço  $l$ ),  $menor$  recebe  $MAXB$  e  $pNi$  recebe -1;
- (3) Para cada navio  $i$  que está alocado no berço  $l$ ;
  - (3.1) O tempo de serviço do navio  $i$  alocado no berço  $l$  recebe 0 ( $zNN[i][2]$ );
  - (3.2) Se navio  $i$  já foi realocado no berço  $l$  então  $zN$  recebe  $zN - 1$ , visita o próximo navio  $i$  e retorna para item (3);
  - (3.3) Se o navio  $i$  não atende de restrição (3) que obrigam os navios  $i$  a atracarem após janela  $TTW$  de chegada  $a_i$  então retorne para item (3.1);
  - (3.4) Calcule o tempo de serviço do navio  $i$  de acordo com a restrição (4), onde o navio  $i$  devem permanecer em operação durante  $h_{il}$   $TTW$ 's necessário para completar a operação de carga e/ou descarga;
  - (3.5) Se  $zNN[i][2]$  (tempo de serviço) menor que  $menor$ , então  $menor$  recebe  $zNN[i][2]$  e  $pNi$  recebe  $i$ ;
  - (3.6) Vá para o próximo navio  $i$  e retorne para item (3.1).
- (4) Se  $pNi < -1$ , então o navio  $pNi$  é reinserido no berço  $l$ , atualiza a variável decisão:  $x_{ij}$  e  $y_{ijl}$  e  $zN = zN - 1$  caso contrário  $zFO$  recebe  $zFO + MAXB$ ;

---

**Algoritmo 3:** Pseudocódigo do ReconstroiSolucao( $l, M, a_i, h_{il}, x_{ij}, y_{ijl}, zL, zN, zNN, zTTw, zFO$ )

---

$zN \leftarrow zL[l]; jTTw \leftarrow MAXB; menor \leftarrow MAXB; pNi \leftarrow -1;$  // Inicializa as variáveis auxiliares

**para**  $i \leftarrow 1$  **até**  $zL[l]$  **faça**

    // Inicializa o tempo de serviço de serviço para alocar o navio  $i$  no berço  $l$

$zNN[i][2] \leftarrow 0;$

    // Se o navio  $i$  já foi alocado no berço  $l$  (status)

**se**  $zNN[i][3] = 0$  **então**

$zN \leftarrow zN - 1;$

        continue;

**fim**

    // Se navio  $i$  atende a restrição (3)

**se**  $a_i[zNN[i][1]] > zTTw$  **então**

$jTTw \leftarrow \min(jTTw, a_i[zNN[i][1]]);$

        continue;

**fim**

    // Declare e inicializa o contador de janela  $TTW$  (Hil)

$zJ \leftarrow hil[zNN[i][1]][l];$

    // Calcula o tempo de serviço do navio  $i$  conforme  $TTW$  ainda disponível

**para**  $j \leftarrow jTTw$  **até**  $M$  **faça**

**se**  $zJ \leq 0$  **então**

            break;

**fim**

        // Atualiza o tempo de serviço do navio  $i$  na  $TTW$

$zNN[i][2] \leftarrow zNN[i][2] + 1;$

$zJ \leftarrow zJ - 1;$

**fim**

    // Atualiza a melhor solução ( navio  $i$  )

**se**  $zNN[i][2] < menor$  **então**

$menor \leftarrow zNN[i][2];$

$pNi \leftarrow i;$

**fim**

**fim**

// Se não encontrou nenhum erro então reconstrói a solução

**se**  $pNi \neq -1$  **então**

    // Status (navio alocado)

$zNN[pNi][3] \leftarrow 0;$

    // Atualiza o contador de navio  $i$  alocado

$zN \leftarrow -1;$

    // Atualiza o contador de  $TTW$

$zJ \leftarrow hil[zNN[pNi][1]][l];$

    // Fixa o navio  $i$  na solução ( Nova solução )

**para**  $j \leftarrow zTTw$  **até**  $M$  **faça**

        // Se já fixou todas as janelas  $TTW$  para o navio  $i$  no berço  $l$

**se**  $zJ \leq 0$  **então**

            break;

**fim**

        // Atualiza as variáveis de decisão (  $x_{ij}$  e  $y_{ijl}$  )

$x_{ij}[zNN[pNi][1]][j] \leftarrow 1;$

$y_{ijl}[zNN[pNi][1]][l] \leftarrow 1;$

        // Atualiza o contador de janela  $TTW$  e  $FO$

$zJ \leftarrow zJ - 1;$

$FO \leftarrow FO + \left\lceil \frac{(j - a_i[zNN[i][1]] + 1)}{hil[zNN[i][1]][l]} \right\rceil;$

**fim**

    // Atualiza a ultima janela disponível para atracação

$zTTw \leftarrow zTTw + hil[zNN[pNi][1]][l];$

    // Se houve violação das restrições (4) ou (12)

**se**  $zJ > 0$  **então**

$zFO \leftarrow zFO + MAXB;$

        break;

**fim**

**fim**

**senão**

    // Atualizar a janela  $TTW$  a ser fixada ( última )

$zTTw \leftarrow jTTw;$

**fim**

---



## 4.4 Sequência de Atracação

No pseudocódigo do Algoritmo (4) a seguir descreve as seguintes operações para construir a sequência de atracação dos navios  $i$  nos berços  $l$ :

- (1) O algoritmo recebe os seguintes dados de entrada. Onde  $N$  representa a cardinalidade do conjunto de navios  $i$ ,  $M$  representa a cardinalidade do conjunto de janela  $TTW$ 's,  $L$  representa a cardinalidade do conjunto de posições de atracação do berço  $l$ , a variável de decisão  $u_{il}$  representa se o navio  $i$  estiver alocado no berço  $l$ , variável de decisão  $y_{ijl}$  representa se o navio  $i$  estiver alocado na janela  $TTW$   $j$  no berço  $l$ , a variável maiorAtracacao representa a cardinalidade do berço  $l$  que recebe o maior número de navios  $i$  e a variável tSequenciaAtracacaoBerco[][] representa a sequência de atracação dos navios  $i$  em cada berços  $l$ ;
- (2) Declare a variável vTmp[N][2] para ordenar os navios  $i$  que estão alocados no berço  $l$ ;
- (3) Para cada berço  $l$ ;
  - (3.1) A variável tSequenciaAtracacaoBerco [][] recebe -1;
  - (3.2) Retorne para o item (3).
- (4) A variável maiorAtracacao recebe 0;
- (5) Para cada berço  $l$ ;
  - (5.1) A variável SequenciaAtracacao recebe 0;
  - (5.2) Para cada navio  $i$ 
    - (5.2.1) A variável vTmp[i][0] recebe o navio  $i$  e vTmp[i][1] recebe -1 para indicar que o navio  $i$  não foi alocado no berço  $l$ ;
    - (5.2.2) Retorne para o item (5.2).
  - (5.3) Para cada navio  $i$ 
    - (5.3.1) Se  $u_{il} = 1$ , então a variável vTmp[i][1] recebe a janela  $TTW$  "j" que representa a primeira janela de atracação do navio  $i$  no berço  $l$ ;
    - (5.3.2) E retorne para o item (5.3).
  - (5.4) Declare a variável auxiliar ckTrue e inicialize com 1;
  - (5.5) Faz enquanto à variável auxiliar ckTrue = 1;
    - (5.5.1) Declare e inicialize as seguintes variáveis auxiliares: ckFlag recebe 0, ckTTW recebe MAXB, ckl recebe 0, ckTmp recebe 0 e ckTrue recebe 0;
    - (5.5.2) Para cada navio  $i$ 
      - (5.5.2.1) Se vTmp[i][1] = -1 então o navio  $i$  não está alocado no berço  $l$  logo retorne para o item (5.5.2);
      - (5.5.2.2) Se vTmp[i][1] < ckTTW então atualize as seguintes variáveis auxiliares: ckl recebe vTmp[i][0], ckTTW recebe vTmp[i][1], ckFlag recebe 1, ckTmp recebe  $i$  e ckTrue recebe 1;
      - (5.5.2.3) Retorne para o item (5.5.2).
    - (5.5.3) Se a variável auxiliar ckFlag for diferente de 1 retorne para o item (5.5);

(5.5.4) Atualize as seguintes variáveis:

A variável tSequenciaAtracaoBerco[l][SequenciaAtracao] recebe ckl, a variável SequenciaAtracao recebe mais 1 e a Variável vTmp[ckTmp][1] recebe -1;

(5.5.5) Retorne para o item (5.5).

---

**Algoritmo 4:** Pseudocódigo do GeraAtracacao( $N, M, L, u_{il}, y_{ijl}$ , maiorAtracacao, tSequenciaAtracacaoBerco)

---

```
// Declare a variável vTmp[][] para ordenação os navios no berço l por ordem da primeira janela TTW de atracação
vTmp[N][2];
// Inicializa a variável tSequenciaAtracacaoBerco[][]
para l ← 1 até L faça
    para i ← 1 até N faça
        | tSequenciaAtracacaoBerco[l][i] ← -1;
    fim
fim
// Constrói a sequência de atracação da solução
maiorAtracacao ← 0;
para l ← 1 até L faça
    SequenciaAtracacao ← 0;
    para i ← 1 até N faça
        // Navio i
        vTmp[i][0] ← i;
        // Janela TTW "j" que inicia o processo de operação do navio i
        vTmp[i][1] ← -1;
    fim
    para i ← 1 até N faça
        // Atualiza a janela TTW "j" de início de operação do navio i no berço l
        se uil[i][l] = 1 então
            para j ← 1 até M faça
                // Se o navio i não estiver alocado na janela j então continue
                se yijl[i][j][l] == 0 então
                    | continue;
                fim
                vTmp[i][1] ← j;
                break;
            fim
        fim
    fim
    // Ordena os navios i conforme a janela TTW de atracação no berço l
    ckTrue ← 1;
    enquanto ckTrue = 1 faça
        // Inicializa as variáveis auxiliares
        ckFlag ← 0; ckTTW ← MAXB; ckI ← 0; ckTmp ← 0; ckTrue ← 0;
        para i ← 1 até N faça
            // Se o navio i não está alocado no berço l
            se vTmp[i][1] = -1 então
                | continue;
            fim
            se vTmp[i][1] < ckTTW então
                // Navio i
                ckI ← vTmp[i][0];
                // TTW
                ckTTW ← vTmp[i][1];
                // Ativo
                ckFlag ← 1;
                // Índice do tmp
                ckTmp ← i;
                // Condição de parada
                ckTrue ← 1;
            fim
        fim
        // Se removeu as marcações de todos navios
        se ckFlag <> 1 então
            | continue;
        fim
        tSequenciaAtracacaoBerco[l][SequenciaAtracacao] ← ckI;
        SequenciaAtracacao ← SequenciaAtracacao + 1;
        vTmp[ckTmp][1] ← -1;
        // Atualiza a maior sequência de atracação dos berços
        maiorAtracacao = max(SequenciaAtracacao, maiorAtracacao );
    fim
fim
```

---

## 4.5 Permutação

O pseudocódigo apresentado no Algoritmo 5 foi adaptado de Souza (2022), descreve o método para construir todas as permutações simples para gerar a movimentação dos navios  $i$  entre os berços  $l$ .

---

**Algoritmo 5:** Pseudocódigo da GeraPermuta(vetor[], inf, sup, vPermutacaoTodos[][])

---

```
se  $inf = sup$  então
    para  $i \leftarrow 1$  até  $sup$  faça
        // Atualiza
         $vPermutacaoTodos[rPermutacao][i] \leftarrow vetor[i]$ ;
    fim
    // Contador de permutações
     $rPermutacao \leftarrow rPermutacao + 1$ ;
fim
else
    para  $i \leftarrow inf$  até  $sup$  faça
        FazTroca(vetor, inf, i); // conforme o pseudocódigo apresentado no Algoritmo 6
        GeraPermuta(vetor, inf + 1, sup, vPermutacaoTodos);
        FazTroca(vetor, inf, i);
    fim
end
```

---

O pseudocódigo apresentado no Algoritmo 6, descreve o método de troca das permutações simples.

---

**Algoritmo 6:** Pseudocódigo FazTroca(vetor[], i, j)

---

```
 $aux \leftarrow vetor[i]$ ;
 $vetor[i] \leftarrow vetor[j]$ ;
 $vetor[j] \leftarrow aux$ ;
```

---

## 4.6 Fatorial

O pseudocódigo apresentado no Algoritmo 7, descreve o método de cálculo do fatorial de um dado número ( $n$ ).

---

**Algoritmo 7:** Pseudocódigo Fatorial( $n$ )

---

```
 $cResult \leftarrow 0$ ;
para  $i \leftarrow 1$  até  $n$  faça
     $cReturn \leftarrow cReturn * i$ ;
fim
 $n \leftarrow cResult$ ;
```

---

## 4.7 Método de Cálculo do TTW (M)

O pseudocódigo apresentado no Algoritmo 8, descreve o método de calculo do  $TTW$  (M), onde  $M$  representa a quantidade de janela  $TTW$ 's necessária para os navios  $i$  concluir as operações de carga e/ou descarga no horizonte de planejamento considerado.

---

**Algoritmo 8:** Pseudocódigo de CalculoTTW(TTW)

---

```
 $zTTw \leftarrow 0;$   
 $cVI \leftarrow MAXB;$   
para  $i \leftarrow 1$  até  $N$  faça  
     $zTTw \leftarrow zTTw + \text{Capacidade de carga do navio } i;$   
    se  $\text{Capacidade de carga do navio } i \leq cVI$  então  
         $cVI \leftarrow \text{Capacidade de carga do navio } i;$   
    fim  
fim  
 $TTW \leftarrow \frac{zTTw}{cVI};$ 
```

---

## 4.8 Solução Inicial

Uma solução inicial de boa qualidade é muito importante, uma vez que bons pontos de partida permitem acelerar o processo de busca local, (CHAVES et al., 2007). De acordo com Rafael et al. (2015), poucos estudos se preocuparam em limitar o espaço de busca da otimização, trabalhando apenas com as variáveis de maior significância e com a melhor faixa de valores para cada variável.

Na maioria dos portos brasileiros, salvo aqueles que apresentam regras comerciais muito específicas, a sequência de atendimento é dada pela ordem de chegada (RAFAEL et al., 2015).

A seguir é apresentado uma proposta baseada no método FIFO, que constrói uma solução inicial factível. O pseudocódigo do Algoritmo (9), constrói uma solução inicial com base na ordem de chegada nos navios  $i$  no porto.

O objetivo continua sendo minimizar o tempo de serviço acumulado de janelas  $TTW$ 's sobre todas as operações de carga e/ou descarga em um horizonte de planejamento dado. Onde cada navio  $i$  deve ser alocado no berço  $l$  de menor tempo de serviço. As operações devem ser realizadas:

- (1) O algoritmo recebe os seguintes dados de entrada. Onde  $N$  representa a cardinalidade do conjunto de navios  $i$ ,  $M$  representa a cardinalidade do conjunto de janela  $TTW$ 's,  $L$  representa a cardinalidade do conjunto de posições de atracação do berço  $l$ ,  $a_i$  representa o conjunto de janela  $TTW$  de chegada do navio  $i$ ,  $h_{il}$  representa o tempo

- de processamento necessário para um navio  $i$  completar operação de carga e/ou descarga no berço  $l$ , a variável de decisão  $u_{il}$  representa se o navio  $i$  estiver alocado no berço  $l$ , a variável de decisão  $x_{ij}$  representa se o navio  $i$  estiver alocado na janela  $TTW$   $j$ , a variável de decisão  $y_{ijl}$  representa se o navio  $i$  estiver alocado na janela  $TTW$   $j$  no berço  $l$  e a variável  $zFO$  representa a função objetivo;
- (2) Declara e inicializa as variáveis:  $jTTW$  recebe 0,  $iL$  recebe 0,  $zL[]$  recebe 0,  $zHil[]$  recebe 0,  $iJ$  recebe 0 e  $zTTW[L]$  recebe 0. Declare as variáveis auxiliares  $smenor$ ,  $cmenor$ ,  $sL$  e  $cL$ ;
  - (3) Para cada navio  $i$ ;
    - (3.1) As variáveis auxiliares  $smenor$  recebe  $MAXB$ ,  $cmenor$  recebe  $MABX$ ,  $sL$  recebe -1 e  $cL$  recebe -1;
    - (3.2) Para cada berço  $l$ , é executada as seguintes instruções;
      - (3.2.1) Se o berço  $l$  não nenhum navio  $i$  alocado ( $zNL[l] = 0$ ) ou a última janela  $TTW$  utilizada é menor que janela  $TTW$  de chegada  $a_i$  do navio  $i$  então  $jTTW$  recebe  $a_i$  caso contrário  $jTTW$  recebe  $zTTW[l]$ ;
      - (3.2.2) Calcula o tempo de serviço  $o$  para alocar o navio  $i$  no berço  $l$  respeitando a restrição (3), se não atende a restrição, então vá para o próximo berço  $l$  no item (3.2);
      - (3.2.3) Se berço  $l$  não têm nenhum navio  $i$  alocado então, se  $zL < smenor$  então  $smenor$  recebe  $zL$  e  $sL$  recebe  $l$ ;
      - (3.2.4) Se  $zL < cmenor$  então  $cmenor$  recebe  $zL$  e  $cL$  recebe  $l$ ;
  - (4) A variável auxiliar  $iL$  recebe  $cL$ ;
  - (5) Se tem berço sem nenhum navio  $i$  alocado então a variável auxiliar  $iL$  recebe  $sL$ ;
  - (6)  $zL[iL]$  recebe  $zL[iL] + 1$ ;
  - (7) Aloca o navio  $i$  no berço  $iL$ , atualiza as variáveis de decisão: ( $u_{il}$ ,  $x_{ij}$  e  $y_{ijl}$ ) e as variáveis auxiliares: ( $zL$ ,  $zHil$ ,  $zTTW$ ,  $zFO$  e  $iJ$ );
  - (8) Retorne para o item (3);

## Algoritmo 9: Pseudocódigo do Solução Inicial(N, M, L, ai, hil, uil, xij, yijl, zFO)

// Declara e inicializa as variáveis auxiliares, decisão e função objetivo

$iL \leftarrow 0$ ;  $iJ \leftarrow 0$ ;  $zJ \leftarrow 0$ ;  $jTW \leftarrow 0$ ;  $zTTW[L] \leftarrow 0$ ;  $zL[L] \leftarrow 0$ ;  $zHil[L] \leftarrow 0$ ;

$u_{iL}[0] \leftarrow 0$ ;  $x_{iJ}[0] \leftarrow 0$ ;  $y_{iJ}[0][0] \leftarrow 0$ ;  $zFO \leftarrow 0$ ;

**para**  $i \leftarrow 1$  **até**  $N$  **faça**

$smenor \leftarrow MAX$ ;  $sL \leftarrow -1$ ;  $cmenor \leftarrow MAX$ ;  $cL \leftarrow -1$ ; // Inicializa as variáveis auxiliares

**para**  $l \leftarrow 1$  **até**  $L$  **faça**

$zHil[l] \leftarrow 0$ ; // Inicializa o custo do berço  $l$  para o navio  $i$

$jTW \leftarrow zTTW[l] + 1$ ; // Atualiza a última posição da janela  $TTW$  de atracação do berço conhecida mais 1

**se**  $jTW \geq ai[i]$  **então**

|  $iJ \leftarrow jTW$ ;

**fim**

**else**

|  $iJ \leftarrow ai[i]$ ;

**end**

// Se houve violação da restrição (4)

**se**  $Hil[i][l] > M - jTW$  **então**

| continue;

**fim**

// Atualiza a qtd de janela  $TTW$  do navio  $i$  no berço  $l$

$zJ \leftarrow Hil[i][l]$ ;

// Calculo do custo para alocar o navio  $i$  no berço  $l$

**para**  $j \leftarrow iJ$  **até**  $M$  **faça**

**se**  $zJ = 0$  **então**

| break;

**fim**

// Atualiza o tempo de serviço para o navio  $i$  no berço  $l$

$zHil[l] \leftarrow zHil[l] + \left\lceil \frac{j - ai[i] + 1}{h_{iL}[i][l]} \right\rceil$ ;

$zJ \leftarrow zJ + 1$ ;

**fim**

// Violação da restrição (4)

**se**  $zJ > 0$  **então**

|  $zHil[l] \leftarrow zHil[l] + MAXB$ ;

**fim**

// Atualiza o berço de menor custo

**se**  $zHil[l] < cmenor$  **então**

|  $cmenor \leftarrow zHil[l]$ ;

|  $cL \leftarrow l$ ;

**fim**

// Atualiza o berço de menor custo ( sem navio alocado )

**se**  $zL[l] == 0$  **então**

**se**  $zHil[l] < smenor$  **então**

|  $smenor \leftarrow zHil[l]$ ;

|  $sL \leftarrow l$ ;

**fim**

**fim**

**fim**

$iL \leftarrow cL$ ; // Berço de menor custo

// Se tem berço sem nenhum navio alocado

**se**  $sL < -1$  **então**

|  $iL \leftarrow sL$ ;

**fim**

$jTW \leftarrow ai[i]$ ; // Janela  $TTW$  disponível para atracação do navio  $i$  no berço  $iL$

**se**  $zTTW[iL] + 1 > jTW$  **então**

|  $jTW \leftarrow zTTW[iL] + 1$ ;

**fim**

// Qtd de janela  $TTW$  necessário para alocar o navio  $i$  no berço  $iL$

$iJ \leftarrow Hil[i][iL]$ ;

**para**  $j \leftarrow jTTW$  **até**  $M$  **faça**

**se**  $iJ \leq 0$  **então**

| break;

**fim**

// Atualiza a solução

$u_{iL}[i][iL] \leftarrow 1$ ;  $x_{iJ}[i][0] \leftarrow 1$ ;  $y_{iJ}[i][0][iL] \leftarrow 1$ ;

$zL[iL] \leftarrow zL[iL] + 1$ ; // Adiciona mais um navio  $i$  no berço

$zHil[iL] \leftarrow zHil[iL] + \left\lceil \frac{j - ai[i] + 1}{h_{iL}[i][iL]} \right\rceil$  // Atualiza o custo por berço

$zTTW[iL] \leftarrow \max(zTTW[iL], j)$ ; // Última janela  $TTW$  do berço  $l$  utilizada

$zFO \leftarrow zFO + \left\lceil \frac{j - ai[i] + 1}{h_{iL}[i][iL]} \right\rceil$  // Atualiza a função objetivo

$iJ \leftarrow iJ + 1$ ;

**fim**

**fim**

## 4.9 Solução Formulação Compacta Estendida Relaxada

Para solução do problema PAB na formulação estendida relaxada foi utilizada a seguinte abordagem. Como as restrições (9) à (11) em conjunto com função objetivo da formulação estendida do PAB garantem a consistência do modelo. Onde o objetivo é obter  $y_{ijl} = 1$  quando  $x_{ij} = 1$  e  $u_{il} = 1$ , e  $y_{ijl} = 0$  quando pelos menos uma das variáveis,  $x_{ij}$  ou  $u_{il}$ , seja igual a 0. Então se relaxarmos as variáveis de decisão:  $x_{ij}$ ,  $u_{il}$  e  $y_{ijl}$  o valor da função objetivo é igual a 0, logo o problema torna-se assim infactível (sem solução). Para contornar essa limitação foi relaxada apenas as variáveis decisão  $x_{ij}$  e  $y_{ijl}$  e a variável decisão  $u_{il}$  permanece inteira.

No pseudocódigo do Algoritmo (10) a seguir as seguintes operações são realizadas:

- (1) O algoritmo recebe os seguintes dados de entrada. Onde  $N$  representa a cardinalidade do conjunto de navios  $i$ ,  $M$  representa a cardinalidade do conjunto de janela  $TTW$ 's,  $L$  representa a cardinalidade do conjunto de posições de atracação do berço  $l$ ,  $a_i$  representa o conjunto de janela  $TTW$  de chegada do navio  $i$ ,  $h_{il}$  representa o tempo de processamento necessário para um navio  $i$  completar operação de carga e/ou descarga no berço  $l$ , a variável de decisão  $u_{il}$  representa se o navio  $i$  estiver alocado no berço  $l$ , variável de decisão  $x_{ij}$  representa se o navio  $i$  estiver alocado na janela  $TTW$ , variável de decisão  $y_{ijl}$  representa se o navio  $i$  estiver alocado na janela  $TTW$   $j$  no berço  $l$  e  $zFO$  representa a função objetivo;
- (2) Resolve o modelo relaxado pelo *CPLEX*®;
- (3) A variável auxiliar  $zFo$  recebe  $MAXB$ ;
- (4) Aplica a método heurístico proposto para refinar a solução do problema relaxado conforme o algoritmo 1.

---

**Algoritmo 10:** Pseudocódigo do PAB-RELAXADO( $N, M, L, a_i, h_{il}, u_{il}, x_{ij}, y_{ijl}, zFO$ )

---

```
// Ler os dados de entrada
. . . .
// Resolve o modelo relaxado pelo CPLEX®
CPLEX-RELAXADO();
// Melhor solução
 $zFO \leftarrow MAXB$ ;
// Método heurístico de refinamento da solução
PAB-HE( $N, M, L, a_i, h_{il}, u_{il}, x_{ij}, y_{ijl}, zFO$ );
```

---



## 4.10 Aplicação do algoritmo

Para ilustrar o algoritmo proposto neste trabalho consideremos o problema PAB (instância 1 da Tabela 18) conforme o conjunto de dados de entrada abaixo.

- conjunto de navios  $N = 10$ ;
- conjunto de  $TTW$   $M = 40$ ;
- conjunto de posições de atracação (berços)  $L = 2$ ;
- conjunto de matérias-primas operadas no porto  $K = 1$ ;
- janela  $TTW$  de chegada do navio  $i$   $ai[40] = [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40]$ ;
- velocidade de carregamento e/ou descarregamento do berço  $vl[L] = [36, 52]$ ;
- nível de estoque inicial da carga de granel  $ek[K] = [2245]$ ;
- quantidade de consumo e/ou produção da carga de granel  $ck[K] = [27]$ ;
- capacidade de carga do navio  $i$  em relação a carga  $K$

$$q^{ik}[N, K] = \begin{bmatrix} [[55] \\ [400] \\ [80] \\ [300] \\ [200] \\ [400] \\ [55] \\ [55] \\ [300] \\ [400]] \end{bmatrix}$$

Na Tabela 6, a coluna navio representa o navio ( $i$ ), a coluna  $ck(1)$  representa capacidade de carga de navio ( $i$ ) em relação ao produto  $k$ . A coluna  $\sum_{i=1}^K$  representa o somatório da carga de cada navio( $i$ ). As colunas  $vl(1)$  e  $vl(2)$  representa a velocidade dos berços 1 e 2. E por fim, as colunas  $l(1)$  e  $l(2)$  representa o tempo serviço necessário para cada navio ( $i$ ) concluir a operação de carga e/ou descarga. A seguir apresentados os valores para o exemplo numérico proposto.

Tabela 6 – Tempo de processamento necessário para um navio  $i$  completar à operação de carga e/ou descarga em um berço  $l$  ( $h_{il}$ )

	Capacidade de Carga		Velocidade Berço		$H_{il}$	
Navio	$c_k(1)$	$\sum_{i=1}^K$	$v_l(1)$	$v_l(2)$	$l(1)$	$l(2)$
1	55	55	36	52	2	2
2	400	400	36	52	12	8
3	80	80	36	52	3	2
4	300	300	36	52	9	6
5	200	200	36	52	6	4
6	400	400	36	52	12	8
7	55	55	36	52	2	2
8	55	55	36	52	2	2
9	300	300	36	52	9	6
10	400	400	36	52	12	8

Na Tabela 7, a coluna modelo representa a formulação do modelo do PAB, a coluna LB representa o limite inferior, a coluna FO representa a função objetivo, a coluna GAP fornece o GAP entre função objetivo e limite inferior dado por  $GAP_1 = ((FO - LB) / FO) \times 100$ , a coluna tempo representa os tempos computacionais decorridos, expressos em segundos. Os valores das colunas: LB, FO,  $GAP_1$  e Tempo obtidos pelo algoritmo do *solver* CPLEX® para a formulação Compacta proposta por Barros (2010) e Formulação Compacta Estendida proposta. E para Formulação Compacta Estendida Relaxada os valores obtidos via algoritmo heurístico com *solver* CPLEX®.

Na formulação compacta estendida, o *solver* CPLEX® gastou um tempo médio de 18,5200 segundos para resolver o problema com um GAP de 2,29%. A formulação compacta estendida com refinamento da solução por heurística gastou um tempo médio de 0,3601 segundos para resolver o problema com um GAP de 6,12%.

A Tabela 8 a seguir apresenta a melhor solução inteira encontrada, detalhamento da variável decisão  $y_{ijl}$  e na Figura 10 é apresentado um gráfico das operações do horizonte de planejamento dado.

Tabela 7 – Resumo do Modelo na formulação Compacta proposta por Barros (2010), Formulação Compacta Estendida e Formulação Compacta Estendida Relaxada - Refinamento da solução pela heurística proposta

Modelo	LB	FO	$GAP_1$	Tempo (sec)
Formulação Compacta Barros (2010)	95,6851	98	2,36	19,2400
Formulação Compacta Estendida	95,7536	98	2,29	18,5200
Formulação Compacta Estendida Relaxada - HE	95,7536	102	6,12	0,3601

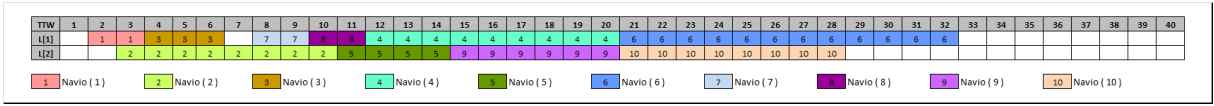


Figura 10 – Evolução das operações de atracções dos navios  $i$  x berços  $l$  em relação as janelas  $TTW$ 's

Tabela 8 – Resumo da variável de decisão  $y_{ijl}$  sobre custo (Tempo de Serviço)

Variável decisão $y_{ijl}$	Valor da variável	$\lceil \frac{j-a_i+1}{h_{il}} \rceil$ e/ou Custo
$y_{ijl} [1][2][1]$	1	1
$y_{ijl} [1][3][1]$	1	1
$y_{ijl} [2][3][2]$	1	1
$y_{ijl} [2][4][2]$	1	1
$y_{ijl} [2][5][2]$	1	1
$y_{ijl} [2][6][2]$	1	1
$y_{ijl} [2][7][2]$	1	1
$y_{ijl} [2][8][2]$	1	1
$y_{ijl} [2][9][2]$	1	1
$y_{ijl} [2][10][2]$	1	1
$y_{ijl} [3][4][1]$	1	1
$y_{ijl} [3][5][1]$	1	1
$y_{ijl} [3][6][1]$	1	1
$y_{ijl} [4][12][1]$	1	1
$y_{ijl} [4][13][1]$	1	1
$y_{ijl} [4][14][1]$	1	2
$y_{ijl} [4][15][1]$	1	2
$y_{ijl} [4][16][1]$	1	2
$y_{ijl} [4][17][1]$	1	2
$y_{ijl} [4][18][1]$	1	2
$y_{ijl} [4][19][1]$	1	2
$y_{ijl} [4][20][1]$	1	2
$y_{ijl} [5][11][2]$	1	2
$y_{ijl} [5][12][2]$	1	2
$y_{ijl} [5][13][2]$	1	2
$y_{ijl} [5][14][2]$	1	3
$y_{ijl} [6][21][1]$	1	2
$y_{ijl} [6][22][1]$	1	2
$y_{ijl} [6][23][1]$	1	2
$y_{ijl} [6][24][1]$	1	2
$y_{ijl} [6][25][1]$	1	2
$y_{ijl} [6][26][1]$	1	2
$y_{ijl} [6][27][1]$	1	2
$y_{ijl} [6][28][1]$	1	2
$y_{ijl} [6][29][1]$	1	2
$y_{ijl} [6][30][1]$	1	2
$y_{ijl} [6][31][1]$	1	3
$y_{ijl} [6][32][1]$	1	3
$y_{ijl} [7][8][1]$	1	1
$y_{ijl} [7][9][1]$	1	1
$y_{ijl} [8][10][1]$	1	1
$y_{ijl} [8][11][1]$	1	2
$y_{ijl} [9][15][2]$	1	1
$y_{ijl} [9][16][2]$	1	2
$y_{ijl} [9][17][2]$	1	2
$y_{ijl} [9][18][2]$	1	2
$y_{ijl} [9][19][2]$	1	2
$y_{ijl} [9][20][2]$	1	2
$y_{ijl} [10][21][2]$	1	2
$y_{ijl} [10][22][2]$	1	2
$y_{ijl} [10][23][2]$	1	2
$y_{ijl} [10][24][2]$	1	2
$y_{ijl} [10][25][2]$	1	2
$y_{ijl} [10][26][2]$	1	2
$y_{ijl} [10][27][2]$	1	3
$y_{ijl} [10][28][2]$	1	3
Função Objetivo		98

#### 4.10.1 Algoritmo da Heurística Proposto - Exemplo

A seguir é descrito a sequência das etapas para construção de solução do PAB pelo método heurístico proposto neste trabalho.

##### 4.10.1.1 Solução Inicial

Nesta seção é apresentado a sequência de operações para construção de uma solução inicial factível baseado na método FIFO. Os seguintes passos são realizados:

- (i) Para o navio 1, calcule o tempo de serviço para alocar o navio 1 nos berços 1 e 2, respectivamente, respeitando as restrições (3) e ordem de chegada do navio é  $ai[1] = 2$  (início da janela de atracação), temos os seguintes valores de tempos de serviços: 2 para o berço 1 e 2 para o berço 2, então aloca-se o navio 1 no berço 1 de menor tempo de serviço, vale salientar que os berços não possui nenhum navio alocado. Para mais detalhes ver as Figuras (11 e 12);
- (ii) Para o navio 2, calcule o tempo de serviço para alocar o navio nos berços 1 e 2 respectivamente, respeitando as seguintes restrições:
  - (a) Restrição (3), obrigam os navios  $i$  a atracarem após sua janela  $TTW$  de chegada  $a_i$ , onde a janela  $TTW$  de chegada do navio 2 é  $ai[2] = 3$ ;
  - (b) Restrição (7), evita soluções com interrupções prematuras nas operações do navios para o berço 1;
  - (c) A disponibilidade de janela de atracação deve iniciar-se na janela  $TTW = 4$  para o berço 1;

Temos os seguintes valores de tempos de serviços: 13 para o berço 1 e 8 para o berço 2, então aloca-se o navio 2 no berço 2, pois temos o berço 2 sem nenhum navio alocado. Para mais detalhes ver Figuras 13 e 14;

- (iii) Para o navio 3, calcule o tempo de serviço para alocar o navio nos berços 1 e 2 respectivamente, respeitando as seguintes restrições:
  - (a) Restrição (3), obrigam os navios  $i$  a atracarem após sua janela  $TTW$  de chegada  $a_i$ , onde a janela  $TTW$  de chegada do navio 3 é  $ai[3] = 4$ ;
  - (b) Restrição (7), evita soluções com interrupções prematuras nas operações do navios para o berço 1 e 2;
  - (c) A disponibilidade de janela de atracação deve iniciar-se na janela  $TTW = 4$  para o berço 1 e janela  $TTW = 11$  para o berço 2;

Temos os seguintes valores de tempos de serviços são: 3 e 8, então aloca-se o navio 3 no berço 1, pois temos o berço 1 com menor tempo de serviço. Para mais detalhes ver Figuras 15 e 16;

- (iv) Para o navio 4, calcule o tempo de serviço para alocar o navio nos berços 1 e 2 respectivamente, respeitando as seguintes restrições:
  - (a) Restrição (3), obrigam os navios  $i$  a atracarem após sua janela  $TTW$  de chegada

$a_i$ , onde a janela  $TTW$  de chegada do navio 4 é  $ai[4] = 5$ ;

- (b) Restrição (7), evita soluções com interrupções prematuras nas operações do navios para o berço 1 e 2;
- (c) A disponibilidade de janela de atracação deve iniciar-se na janela  $TTW = 7$  para o berço 1 e janela  $TTW = 11$  para o berço 2;

Temos os seguintes valores de tempos de serviços: 11 e 12, então aloca-se o navio 4 no berço 1, pois temos o berço 1 com menor tempo de serviço. Para mais detalhes ver Figuras 17 e 18;

- (v) Para o navio 5, calcule o tempo de serviço para alocar o navio nos berços 1 e 2 respectivamente, respeitando as seguintes restrições:

- (a) Restrição (3), obrigam os navios  $i$  a atracarem após sua janela  $TTW$  de chegada  $a_i$ , onde a janela  $TTW$  de chegada do navio 5 é  $ai[5] = 6$ ;
- (b) Restrição (7), evita soluções com interrupções prematuras nas operações do navios para o berço 1 e 2;
- (c) A disponibilidade de janela de atracação deve iniciar-se na janela  $TTW = 16$  para o berço 1 e janela  $TTW = 11$  para o berço 2;

Temos os seguintes valores de tempos de serviços: 16 e 9, então aloca-se o navio 5 no berço 2, pois temos o berço 2 com menor tempo de serviço. Para mais detalhes ver Figuras 19 e 20;

- (vi) Para o navio 6, calcule o tempo de serviço para alocar o navio nos berços 1 e 2 respectivamente, respeitando as seguintes restrições:

- (a) Restrição (3), obrigam os navios  $i$  a atracarem após sua janela  $TTW$  de chegada  $a_i$ , onde a janela  $TTW$  de chegada do navio 6 é  $ai[6] = 7$ ;
- (b) Restrição (7), evita soluções com interrupções prematuras nas operações do navios para o berço 1 e 2;
- (c) A disponibilidade de janela de atracação deve iniciar-se na janela  $TTW = 16$  para o berço 1 e janela  $TTW = 15$  para o berço 2;

Temos os seguintes valores de tempos de serviços: 21 e 16, então aloca-se o navio 6 no berço 2, pois temos o berço 2 com menor tempo de serviço. Para mais detalhes ver Figuras 21 e 22;

- (vii) Para o navio 7, calcule o tempo de serviço para alocar o navio nos berços 1 e 2 respectivamente, respeitando as seguintes restrições:

- (a) Restrição (3), obrigam os navios  $i$  a atracarem após sua janela  $TTW$  de chegada  $a_i$ , onde a janela  $TTW$  de chegada do navio 7 é  $ai[7] = 8$ ;
- (b) Restrição (7), evita soluções com interrupções prematuras nas operações do navios para o berço 1 e 2;
- (c) A disponibilidade de janela de atracação deve iniciar-se na janela  $TTW = 16$  para o berço 1 e janela  $TTW = 23$  para o berço 2;

Temos os seguintes valores de tempos de serviços: 10 e 17, então aloca-se o navio 7

no berço 1, pois temos o berço 1 com menor tempo de serviço. Para mais detalhes ver Figuras 23 e 24;

- (viii) Para o navio 8, calcule o tempo de serviço para alocar o navio nos berços 1 e 2 respectivamente, respeitando as seguintes restrições:

- (a) Restrição (3), obrigam os navios  $i$  a atracarem após sua janela  $TTW$  de chegada  $a_i$ , onde a janela  $TTW$  de chegada do navio 8 é  $ai[8] = 9$ ;
- (b) Restrição (7), evita soluções com interrupções prematuras nas operações do navios para o berço 1 e 2;
- (c) A disponibilidade de janela de atracação deve iniciar-se na janela  $TTW = 18$  para o berço 1 e janela  $TTW = 23$  para o berço 2;

Temos os seguintes valores de tempos de serviços: 11 e 16, então aloca-se o navio 8 no berço 1, pois temos o berço 1 com menor tempo de serviço. Para mais detalhes ver Figuras 25 e 26;

- (ix) Para o navio 9, calcule o tempo de serviço para alocar o navio nos berços 1 e 2 respectivamente, respeitando as seguintes restrições:

- (a) Restrição (3), obrigam os navios  $i$  a atracarem após sua janela  $TTW$  de chegada  $a_i$ , onde a janela  $TTW$  de chegada do navio 9 é  $ai[9] = 10$ ;
- (b) Restrição (7), evita soluções com interrupções prematuras nas operações do navios para o berço 1 e 2;
- (c) A disponibilidade de janela de atracação deve iniciar-se na janela  $TTW = 20$  para o berço 1 e janela  $TTW = 23$  para o berço 2;

Temos os seguintes valores de tempos de serviços: 19 e 19, então aloca-se o navio 9 no berço 1, pois temos o berço 1 com menor tempo de serviço. Para mais detalhes ver Figuras 27 e 28;

- (x) Para o navio 10, calcule o tempo de serviço para alocar o navio nos berços 1 e 2 respectivamente, respeitando as seguintes restrições:

- (a) Restrição (3), obrigam os navios  $i$  a atracarem após sua janela  $TTW$  de chegada  $a_i$ , onde a janela  $TTW$  de chegada do navio 10 é  $ai[10] = 11$ ;
- (b) Restrição (7), evita soluções com interrupções prematuras nas operações do navios para o berço 1 e 2;
- (c) A disponibilidade de janela de atracação deve iniciar-se na janela  $TTW = 29$  para o berço 1 e janela  $TTW = 23$  para o berço 2;

Temos os seguintes valores de tempos de serviços: 30 e 20, então aloca-se o navio 10 no berço 2, pois temos o berço 2 com menor tempo de serviço. Para mais detalhes ver Figuras 29 e 30;

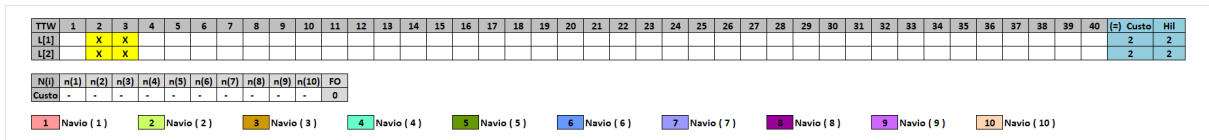


Figura 11 – Tempo de processamento para completar a operação de carga e/ou descarga do navio 1, de acordo com a Tabela 6, o  $h_{il}$  são: 2 para o berço 1 e 2 para o berço 2.

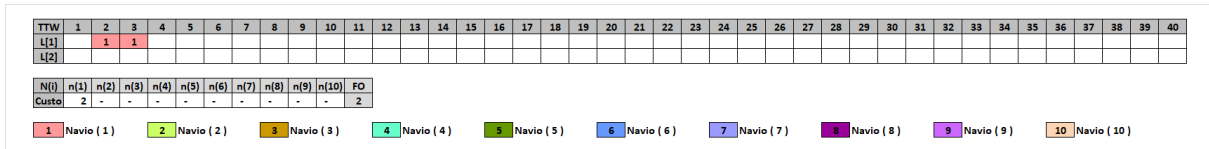


Figura 12 – Evolução das operações de atracções do navio 1 no berço / em relação as janelas TTW's

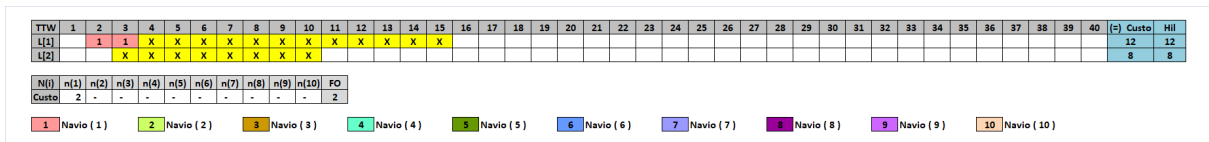


Figura 13 – Tempo de processamento para completar a operação de carga e/ou descarga do navio 2, de acordo com a Tabela 6, o  $h_{il}$  são: 12 para o berço 1 e 8 para o berço 2.

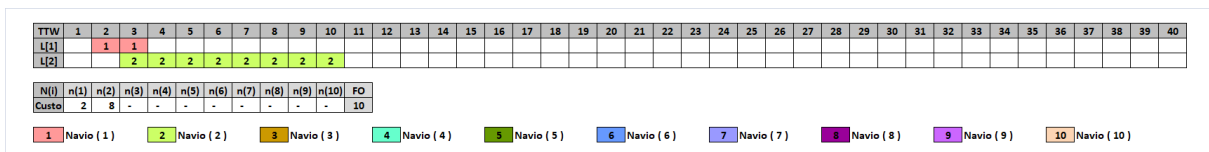


Figura 14 – Evolução das operações de atracções dos navio 1 e 2 nos berços / em relação as janelas TTW's

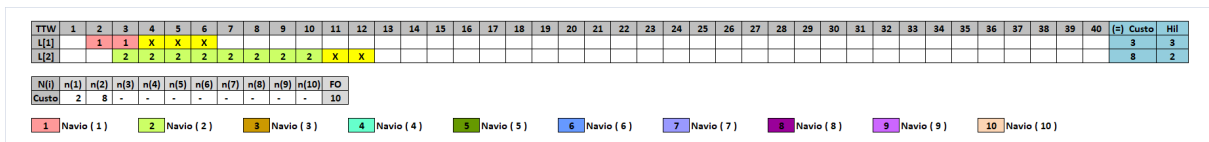


Figura 15 – Tempo de processamento para completar a operação de carga e/ou descarga do navio 3, de acordo com a Tabela 6, o  $h_{il}$  são: 3 para o berço 1 e 2 para o berço 2.



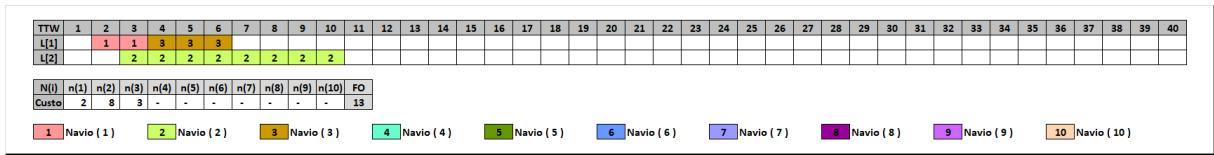


Figura 16 – Evolução das operações de atracções dos navio de 1 a 3 nos berços / em relação as janelas  $TTW$ 's

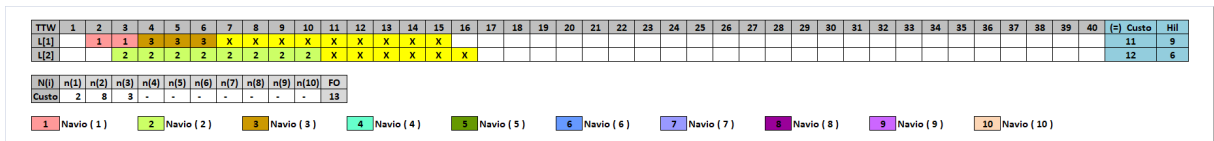


Figura 17 – Tempo de processamento para completar a operação de carga e/ou descarga do navio 4, de acordo com a Tabela 6, o  $h_{il}$  são: 9 para o berço 1 e 6 para o berço 2.

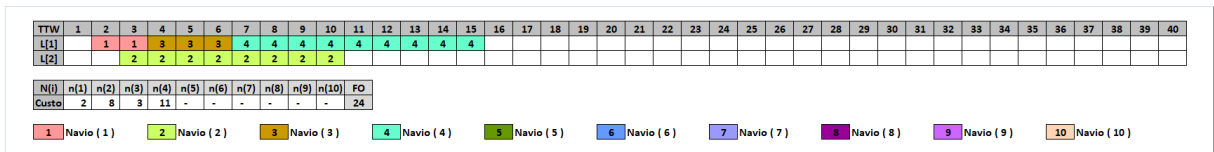


Figura 18 – Evolução das operações de atracções dos navio de 1 a 4 nos berços / em relação as janelas  $TTW$ 's

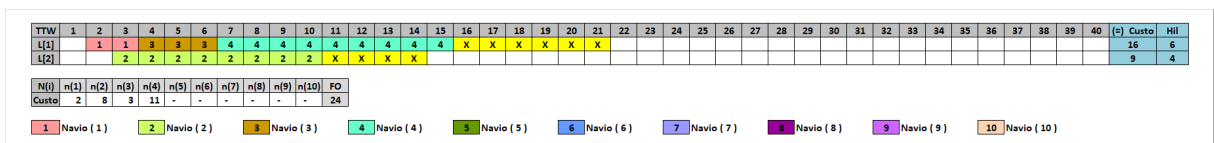


Figura 19 – Tempo de processamento para completar a operação de carga e/ou descarga do navio 5, de acordo com a Tabela 6, o  $h_{il}$  são: 6 para o berço 1 e 4 para o berço 2.

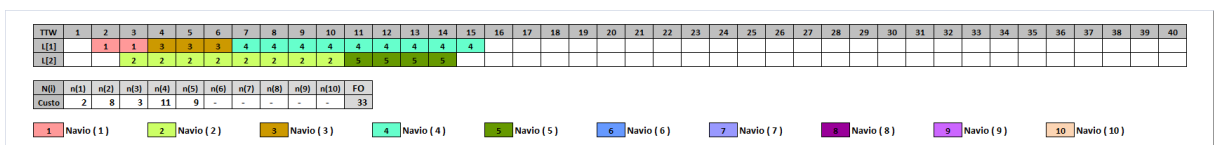


Figura 20 – Evolução das operações de atracções dos navio de 1 a 5 nos berços / em relação as janelas  $TTW$ 's

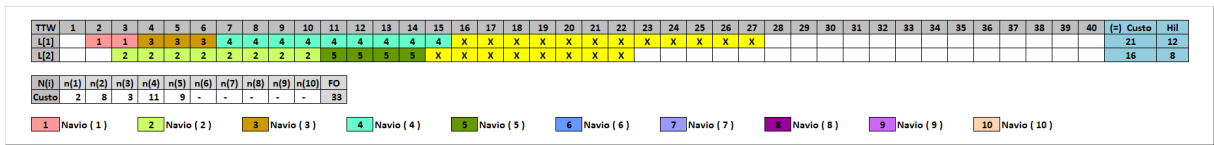


Figura 21 – Tempo de processamento para completar a operação de carga e/ou descarga do navio 6, de acordo com a Tabela 6, o  $h_{il}$  são: 12 para o berço 1 e 8 para o berço 2.

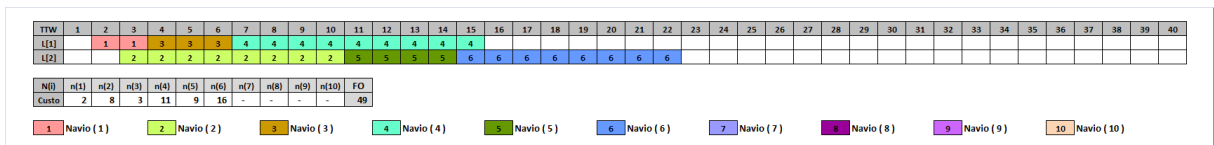


Figura 22 – Evolução das operações de atracações dos navio de 1 a 6 nos berços / em relação as janelas TTW's

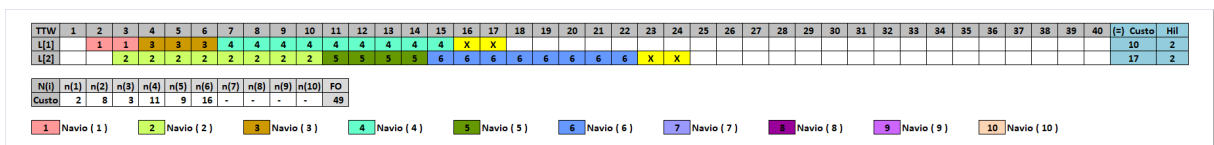


Figura 23 – Tempo de processamento para completar a operação de carga e/ou descarga do navio 7, de acordo com a Tabela 6, o  $h_{il}$  são: 2 para o berço 1 e 2 para o berço 2.

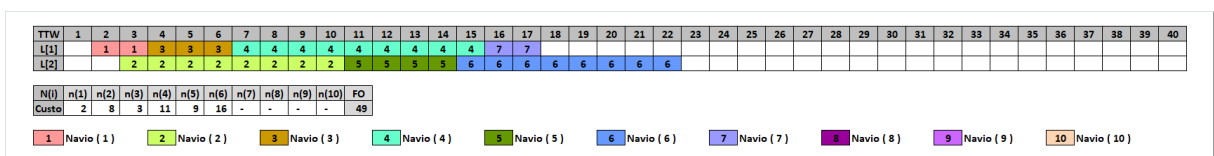


Figura 24 – Evolução das operações de atracações dos navio de 1 a 7 nos berços / em relação as janelas TTW's

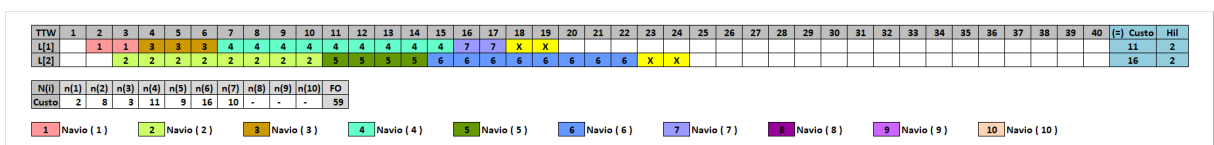


Figura 25 – Tempo de processamento para completar a operação de carga e/ou descarga do navio 8, de acordo com a Tabela 6, o  $h_{il}$  são: 2 para o berço 1 e 2 para o berço 2.

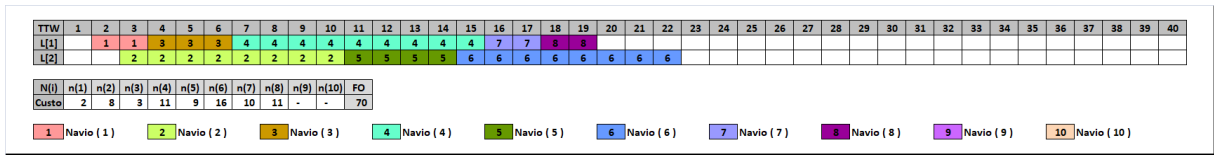


Figura 26 – Evolução das operações de atracções dos navio de 1 a 8 nos berços / em relação as janelas  $TTW$ 's

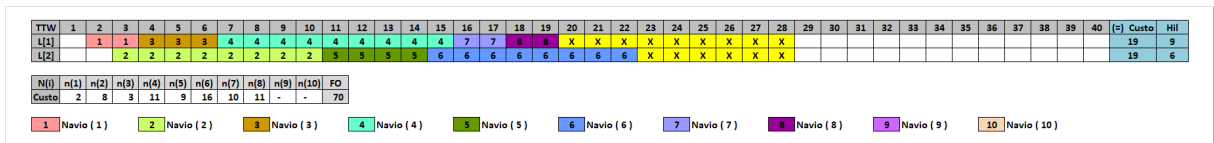


Figura 27 – Tempo de processamento para completar a operação de carga e/ou descarga do navio 9, de acordo com a Tabela 6, o  $h_{il}$  são: 9 para o berço 1 e 6 para o berço 2.

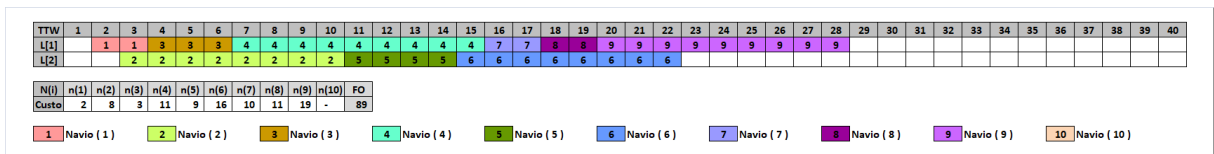


Figura 28 – Evolução das operações de atracções dos navio de 1 a 9 nos berços / em relação as janelas  $TTW$ 's

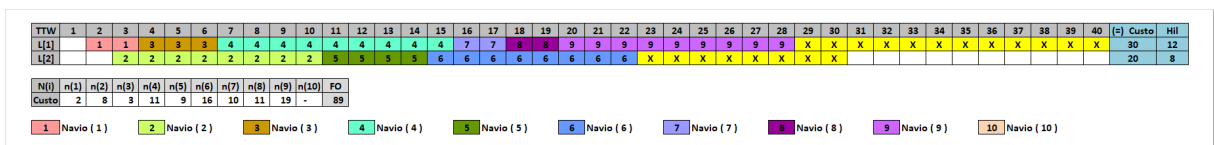


Figura 29 – Tempo de processamento para completar a operação de carga e/ou descarga do navio 10, de acordo com a Tabela 6, o  $h_{il}$  são: 12 para o berço 1 e 8 para o berço 2.

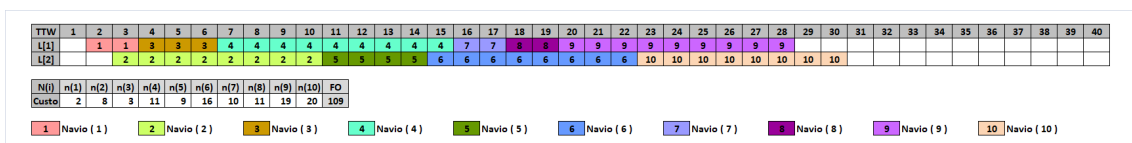


Figura 30 – Evolução das operações de atracções dos navio de 1 a 10 nos berços / em relação as janelas  $TTW$ 's

Tabela 9 – Resumo da variável de decisão  $y_{ijl}$  sobre custo (Tempo de Serviço)

Variável decisão $y_{ijl}$	Valor da variável	$\lceil \frac{j-ai+1}{h_{il}} \rceil$ e/ou Custo
$y_{ijl} [1][2][1]$	1	1
$y_{ijl} [1][3][1]$	1	1
$y_{ijl} [2][3][2]$	1	1
$y_{ijl} [2][4][2]$	1	1
$y_{ijl} [2][5][2]$	1	1
$y_{ijl} [2][6][2]$	1	1
$y_{ijl} [2][7][2]$	1	1
$y_{ijl} [2][8][2]$	1	1
$y_{ijl} [2][9][2]$	1	1
$y_{ijl} [2][10][2]$	1	1
$y_{ijl} [3][4][1]$	1	1
$y_{ijl} [3][5][1]$	1	1
$y_{ijl} [3][6][1]$	1	1
$y_{ijl} [4][7][1]$	1	1
$y_{ijl} [4][8][1]$	1	1
$y_{ijl} [4][9][1]$	1	1
$y_{ijl} [4][10][1]$	1	1
$y_{ijl} [4][11][1]$	1	1
$y_{ijl} [4][12][1]$	1	1
$y_{ijl} [4][13][1]$	1	1
$y_{ijl} [4][14][1]$	1	2
$y_{ijl} [4][15][1]$	1	2
$y_{ijl} [5][11][2]$	1	2
$y_{ijl} [5][12][2]$	1	2
$y_{ijl} [5][13][2]$	1	2
$y_{ijl} [5][14][2]$	1	3
$y_{ijl} [6][15][2]$	1	2
$y_{ijl} [6][16][2]$	1	2
$y_{ijl} [6][17][2]$	1	2
$y_{ijl} [6][18][2]$	1	2
$y_{ijl} [6][19][2]$	1	2
$y_{ijl} [6][20][2]$	1	2
$y_{ijl} [6][21][2]$	1	2
$y_{ijl} [6][22][2]$	1	2
$y_{ijl} [7][16][1]$	1	5
$y_{ijl} [7][17][1]$	1	5
$y_{ijl} [8][18][1]$	1	5
$y_{ijl} [8][19][1]$	1	6
$y_{ijl} [9][20][1]$	1	2
$y_{ijl} [9][21][1]$	1	2
$y_{ijl} [9][22][1]$	1	2
$y_{ijl} [9][23][1]$	1	2
$y_{ijl} [9][24][1]$	1	2
$y_{ijl} [9][25][1]$	1	2
$y_{ijl} [9][26][1]$	1	2
$y_{ijl} [9][27][1]$	1	2
$y_{ijl} [9][28][1]$	1	3
$y_{ijl} [10][23][2]$	1	2
$y_{ijl} [10][24][2]$	1	2
$y_{ijl} [10][25][2]$	1	2
$y_{ijl} [10][26][2]$	1	2
$y_{ijl} [10][27][2]$	1	3
$y_{ijl} [10][28][2]$	1	3
$y_{ijl} [10][29][2]$	1	3
$y_{ijl} [10][30][2]$	1	3
Função Objetivo		109

#### 4.10.1.2 Movimentação dos navios entre os Berços - Permutação Simples

Na Tabela 10, a coluna Berço representa o berço e as colunas [s1 .. s10] representa o identificação do navio na sequência de atracação no horizonte de planejamento dado de acordo com Algoritmo 4.

Tabela 10 – Resumo da sequência de atracação inicial dos navios  $i$  por berço  $l$  no horizonte de planejamento

Berço	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7	s8	s9	s10
L(1)	1	3	4	7	8	9				
L(2)	2	5	6	10						

O número de permutação simples é obtido a partir do fatorial do número de berço ( $L$ ) de acordo com o Algoritmo 7. Inicializa-se as variáveis auxiliares:  $zzFO$  recebe 109 (função objetivo da solução inicial),  $f u_{il}$  recebe a variável de decisão  $u_{il}$ ,  $f x_{ij}$  recebe a variável de decisão  $x_{ij}$ ,  $f y_{ijl}$  recebe a variável de decisão  $y_{ijl}$ ,  $m$  recebe 1 e  $maiorAtracacao$  recebe 6 (representa a cardinalidade do berço que recebe o maior número de navios  $i$  conforme o  $L(1)$  da Tabela 10). A seguir as seguintes operações são realizadas:

- (1) Para a sequência de atracação da coluna s1 dos berços L(1) e L(2) da Tabela 10 temos os seguintes navios 1 e 2. Então gera-se todas as permutações simples da sequência de atracação s1 (navios 1 e 2) que constitui nos seguintes conjuntos: (1, 2) e (2, 1). Então faz os seguintes passos:
  - (1.1) A variável de decisão  $u_{il}$  recebe  $f u_{il}$ . Para a permutação (1, 2) deve-se deslocar os navios 1 e 2 de todos os berços (variável de decisão  $u_{il}$ ). Em seguida aloca-se o navio 1 no berço 1 e navio 2 no berço 2 (variável de decisão  $u_{il}$ ) conforme a coluna s1 da Figura 31 (a). Aplica-se o método heurístico de refinamento LNS para fazer a movimentação dos navios dentro dos berços 1 e 2 com objetivo de encontrar a melhor sequência de atracação dos navios (de menor tempo de serviço) e reconstrói a solução de acordo com a Figura 31 (b). E por fim, como solução encontrada é igual a 109 não houve melhoria da solução;
  - (1.2) A variável de decisão  $u_{il}$  recebe  $f u_{il}$ . Para a permutação (2, 1) deve-se deslocar os navios 2 e 1 de todos os berços (variável de decisão  $u_{il}$ ). Em seguida aloca-se o navio 2 do berço 1 e navio 1 no berço 2 (variável de decisão  $u_{il}$ ) conforme a coluna s1 da Figura 31 (c). Aplica-se o método heurístico de refinamento LNS para fazer a movimentação dos navios dentro dos berços 1 e 2 com objetivo de encontrar a melhor sequência de atracação dos navios (de menor tempo de serviço) e reconstrói a solução de acordo com a Figura 31 (d). E por fim, como solução encontrada é igual a 137 não houve melhoria da solução;
  - (1.3) A variável auxiliar  $m$  recebe  $m + 1$ ;

- (2) Para a sequência de atracação da coluna s2 dos berços L(1) e L(2) da Tabela 10 temos os seguintes navios 3 e 5. Então gera-se todas as permutações simples da sequência de atracação s2 (navios 3 e 5) que constitui nos seguintes conjuntos: (3, 5) e (5, 3). Então faz os seguintes passos:
- (2.1) A variável de decisão  $u_{il}$  recebe  $f u_{il}$ . Para a permutação (3, 5) deve-se desalocar os navios 3 e 5 de todos os berços (variável de decisão  $u_{il}$ ). Em seguida aloca-se o navio 3 no berço 1 e navio 5 no berço 2 (variável de decisão  $u_{il}$ ) conforme a coluna s2 da Figura 32 (a). Aplica-se o método heurístico de refinamento LNS para fazer a movimentação dos navios dentro dos berços 1 e 2 com objetivo de encontrar a melhor sequência de atracação dos navios (de menor tempo de serviço) e reconstrói a solução de acordo com a Figura 32 (b). E por fim, como solução encontrada é igual a 109 não houve melhoria da solução;
- (2.2) A variável de decisão  $u_{il}$  recebe a variável  $f u_{il}$ . Para a permutação (5, 3) deve-se desalocar os navios 5 e 3 de todos os berços (variável de decisão  $u_{il}$ ). Em seguida aloca-se o navio 5 do berço 1 e navio 3 no berço 2 (variável de decisão  $u_{il}$ ) conforme a coluna da Figura 32 (c). Aplica-se o método heurístico de refinamento LNS para fazer a movimentação dos navios dentro dos berços 1 e 2 com objetivo de encontrar a melhor sequência de atracação dos navios (de menor tempo de serviço) e reconstrói a solução de acordo com a Figura 32 (d). E por fim, como solução encontrada é igual a 118 não houve melhoria da solução;
- (2.3) A variável auxiliar m recebe  $m + 1$ ;
- (3) Para a sequência de atracação da coluna s3 dos berços L(1) e L(2) da Tabela 10 temos os seguintes navios 4 e 6. Então gera-se todas as permutações simples da sequência de atracação s3 (navios 4 e 6) que constitui nos seguintes conjuntos: (4, 6) e (6, 4). Então faz os seguintes passos:
- (3.1) A variável de decisão  $u_{il}$  recebe  $f u_{il}$ . Para a permutação (4, 6) deve-se desalocar os navios 4 e 6 de todos os berços (variável de decisão  $u_{il}$ ). Em seguida aloca-se o navio 4 no berço 1 e navio 6 no berço 2 (variável de decisão  $u_{il}$ ) conforme a coluna s3 da Figura 33 (a). Aplica-se o método heurístico de refinamento LNS para fazer a movimentação dos navios dentro dos berços 1 e 2 com objetivo de encontrar a melhor sequência de atracação dos navios (de menor tempo de serviço) e reconstrói a solução de acordo com a Figura 33 (b). E por fim, como solução encontrada é igual a 109 não houve melhoria da solução;
- (3.2) A variável de decisão  $u_{il}$  recebe  $f u_{il}$ . Para a permutação (6, 4) deve-se desalocar os navios 6 e 4 de todos os berços (variável de decisão  $u_{il}$ ). Em seguida aloca-se o navio 6 do berço 1 e navio 4 no berço 2 (variável de decisão  $u_{il}$ ) conforme a coluna s3 da Figura 33 (c). Aplica-se o método heurístico de refinamento LNS para fazer a movimentação dos navios dentro dos berços 1 e 2 com objetivo

de encontrar a melhor sequência de atracação dos navios (de menor tempo de serviço) e reconstrói a solução de acordo com a Figura 33 (d). E por fim, como solução encontrada é igual a 117 não houve melhoria da solução;

(3.3) A variável auxiliar  $m$  recebe  $m + 1$ ;

(4) Para a sequência de atracação da coluna s4 dos berços L(1) e L(2) da Tabela 10 temos os seguintes navios 7 e 10. Então gera-se todas as permutações simples da sequência de atracação s4 (navios 7 e 10) que constitui nos seguintes conjuntos: (7, 10) e (10, 7). Então faz os seguintes passos:

(4.1) A variável de decisão  $u_{il}$  recebe  $f_{u_{il}}$ . Para a permutação (7, 10) deve-se desalocar os navios 7 e 10 de todos os berços (variável de decisão  $u_{il}$ ). Em seguida aloca-se o navio 7 no berço 1 e navio 10 no berço 2 (variável de decisão  $u_{il}$ ) conforme a coluna s4 Figura 34 (a). Aplica-se o método heurístico de refinamento LNS para fazer a movimentação dos navios dentro dos berços 1 e 2 com objetivo de encontrar a melhor sequência de atracação dos navios (de menor tempo de serviço) e reconstrói a solução de acordo com a Figura 34 (b). E por fim, como solução encontrada é igual a 109 não houve melhoria da solução;

(4.2) A variável de decisão  $u_{il}$  recebe  $f_{u_{il}}$ . Para a permutação (10, 7) deve-se desalocar os navios 10 e 7 de todos os berços (variável de decisão  $u_{il}$ ). Em seguida aloca-se o navio 10 do berço 1 e navio 7 no berço 2 (variável de decisão  $u_{il}$ ) conforme a coluna s4 da Figura 34 (c). Aplica-se o método heurístico de refinamento LNS para fazer a movimentação dos navios dentro dos berços 1 e 2 com objetivo de encontrar a melhor sequência de atracação dos navios (de menor tempo de serviço) e reconstrói a solução de acordo com a Figura 34 (d). E por fim, como solução encontrada é igual a 112 não houve melhoria da solução;

(4.3) A variável auxiliar  $m$  recebe  $m + 1$ ;

(5) Para a sequência de atracação da coluna s5 dos berços L(1) e L(2) da Tabela 10 temos o navio 8. Então gera-se todas as permutações simples da sequência de atracação s5 (navio 8) que constitui nos seguintes conjuntos: (8, -1)<sup>1</sup> e (-1, 8). Então faz os seguintes passos:

(5.1) A variável de decisão  $u_{il}$  recebe  $f_{u_{il}}$ . Para a permutação (8, -1) deve-se desalocar o navio 8 de todos os berços (variável de decisão  $u_{il}$ ). Em seguida aloca-se o navio 8 no berço 1 (variável de decisão  $u_{il}$ ) conforme a coluna s5 da Figura 35 (a). Aplica-se o método heurístico de refinamento LNS para fazer a movimentação dos navios dentro dos berços 1 e 2 com objetivo de encontrar a melhor sequência de atracação dos navios (de menor tempo de serviço) e reconstrói a solução de acordo com a Figura 35 (b). E por fim, como solução encontrada é igual a 109 não houve melhoria da solução;

---

<sup>1</sup>-1 Indica que o berço não tem navio alocado na sequência de atracação

- (5.2) A variável de decisão  $u_{il}$  recebe  $f u_{il}$ . Para a permutação (-1, 8) deve-se desalocar o navio 8 de todos os berços (variável de decisão  $u_{il}$ ). Em seguida aloca-se o navio 8 do berço 2 (variável de decisão  $u_{il}$ ) conforme da coluna s5 da Figura 35 (c). Aplica-se o método heurístico de refinamento LNS para fazer a movimentação dos navios dentro dos berços 1 e 2 com objetivo de encontrar a melhor sequência de atracação dos navios (de menor tempo de serviço) e reconstrói a solução de acordo com a Figura 35 (d). E por fim, como solução encontrada é igual a 106 houve melhoria da solução, então atualiza-se as variáveis auxiliares:  $pu_{il}$  recebe a variável de decisão  $u_{il}$ ,  $px_{ij}$  recebe a variável de decisão  $x_{ij}$ ,  $py_{ijl}$  recebe a variável de decisão  $y_{ijl}$ , a melhora solução encontrada é igual a 106, reconstrói a sequência de atracação dos navios conforme a Tabela 11, zzFO recebe 106 e variável auxiliar m recebe 0;
- (5.3) Como houve melhora da solução candidata a ótima então atualiza as variáveis auxiliares:  $f u_{il}$  recebe  $pu_{il}$ ,  $f x_{ij}$  recebe  $px_{ij}$ ,  $f y_{ijl}$  recebe  $y_{ijl}$ , maiorAtracacao recebe 5 (representa a cardinalidade do berço que recebe o maior número de navios  $i$  conforme o berço L(1) da Tabela 11) e a variável auxiliar m recebe  $m + 1$ ;
- (6) Para a sequência de atracação da coluna s1 dos berços L(1) e L(2) da Tabela 11 temos os seguintes navios 1 e 2. Então gera-se todas as permutações simples da sequência de atracação s1 (navios 1 e 2) que constitui nos seguintes conjuntos: (1, 2) e (2, 1). Então faz os seguintes passos:
- (6.1) A variável de decisão  $u_{il}$  recebe  $f u_{il}$ . Para a permutação (1, 2) deve-se desalocar os navios 1 e 2 de todos os berços (variável de decisão  $u_{il}$ ). Em seguida aloca-se o navio 1 no berço 1 e navio 2 no berço 2 (variável de decisão  $u_{il}$ ) conforme a coluna s1 da Figura 36 (a). Aplica-se o método heurístico de refinamento LNS para fazer a movimentação dos navios dentro dos berços 1 e 2 com objetivo de encontrar a melhor sequência de atracação dos navios (de menor tempo de serviço) e reconstrói a solução de acordo com a Figura 36 (b). E por fim, como solução encontrada é igual a 106 não houve melhoria da solução;
- (6.2) A variável de decisão  $u_{il}$  recebe  $f u_{il}$ . Para a permutação (2, 1) deve-se desalocar os navios 2 e 1 de todos os berços (variável de decisão  $u_{il}$ ). Em seguida aloca-se o navio 2 do berço 1 e navio 1 no berço 2 (variável de decisão  $u_{il}$ ) conforme a coluna s1 da Figura 36 (c). Aplica-se o método heurístico de refinamento LNS para fazer a movimentação dos navios dentro dos berços 1 e 2 com objetivo de encontrar a melhor sequência de atracação dos navios (de menor tempo de serviço) e reconstrói a solução de acordo com a Figura 36 (d). E por fim, como solução encontrada é igual a 128 não houve melhoria da solução;
- (6.3) A variável auxiliar m recebe  $m + 1$ ;
- (7) Para a sequência de atracação da coluna s2 dos berços L(1) e L(2) da Tabela 11



temos os seguintes navios 3 e 8. Então gera-se todas as permutações simples da sequência de atracação s2 (navios 3 e 8) que constitui nos seguintes conjuntos: (3, 8) e (8, 3). Então faz os seguintes passos:

(7.1) A variável de decisão  $u_{il}$  recebe  $f u_{il}$ . Para a permutação (3, 8) deve-se deslocar os navios 3 e 8 de todos os berços (variável de decisão  $u_{il}$ ). Em seguida aloca-se o navio 3 no berço 1 e navio 8 no berço 2 (variável de decisão  $u_{il}$ ) conforme a coluna s2 da Figura 37 (a). Aplica-se o método heurístico de refinamento LNS para fazer a movimentação dos navios dentro dos berços 1 e 2 com objetivo de encontrar a melhor sequência de atracação dos navios (de menor tempo de serviço) e reconstrói a solução de acordo com a Figura 37 (b). E por fim, como solução encontrada é igual a 106 não houve melhoria da solução;

(7.2) A variável de decisão  $u_{il}$  recebe  $f u_{il}$ . Para a permutação (8, 3) deve-se deslocar os navios 8 e 3 de todos os berços (variável de decisão  $u_{il}$ ). Em seguida aloca-se o navio 8 do berço 1 e navio 3 no berço 2 (variável de decisão  $u_{il}$ ) conforme a coluna s2 da Figura 37 (c). Aplica-se o método heurístico de refinamento LNS para fazer a movimentação dos navios dentro dos berços 1 e 2 com objetivo de encontrar a melhor sequência de atracação dos navios (de menor tempo de serviço) e reconstrói a solução de acordo com a Figura 37 (d). E por fim, como solução encontrada é igual a 113 não houve melhoria da solução;

(7.3) A variável auxiliar m recebe  $m + 1$ ;

(8) Para a sequência de atracação da coluna s3 dos berços L(1) e L(2) da Tabela 11 temos os navios 4 e 5. Então gera-se todas as permutações simples da sequência de atracação s3 (navios 4 e 5) que constitui nos seguintes conjuntos: (4, 5) e (5, 4). Então faz os seguintes passos:

(8.1) A variável de decisão  $u_{il}$  recebe  $f u_{il}$ . Para a permutação (4, 5) deve-se deslocar os navios 4 e 5 de todos os berços (variável de decisão  $u_{il}$ ). Em seguida aloca-se o navio 4 no berço 1 e o navio 5 no berço 2 (variável de decisão  $u_{il}$ ) conforme a coluna s3 da Figura 38 (a). Aplica-se o método heurístico de refinamento LNS para fazer a movimentação dos navios dentro dos berços 1 e 2 com objetivo de encontrar a melhor sequência de atracação dos navios (de menor tempo de serviço) e reconstrói a solução de acordo com a Figura 38 (b). E por fim, como solução encontrada é igual a 106 não houve melhoria da solução;

(8.2) A variável de decisão  $u_{il}$  recebe  $f u_{il}$ . Para a permutação (5, 4) deve-se deslocar os navios 5 e 4 de todos os berços (variável de decisão  $u_{il}$ ). Em seguida aloca-se o navio 5 no berço 1 e o navio 4 no berço 2 (variável de decisão  $u_{il}$ ) conforme a coluna s3 da Figura 38 (c). Aplica-se o método heurístico de refinamento LNS para fazer a movimentação dos navios dentro dos berços 1 e 2 com objetivo de encontrar a melhor sequência de atracação dos navios (de menor tempo de serviço) e reconstrói a solução de acordo com a Figura 38 (d).

- E por fim, como solução encontrada é igual a 103 houve melhoria da solução, então atualiza-se as variáveis auxiliares:  $pu_{il}$  recebe a variável de decisão  $u_{il}$ ,  $px_{ij}$  recebe a variável de decisão  $x_{ij}$ ,  $py_{ijl}$  recebe a variável de decisão  $y_{ijl}$ , a melhora solução encontrada é igual a 103, reconstrói a sequência de atracação dos navios conforme a Tabela 12,  $zzFO$  recebe 103 e variável auxiliar  $m$  recebe 0;
- (8.3) Como houve melhora da solução candidata a ótima então atualiza as variáveis auxiliares:  $fu_{il}$  recebe  $pu_{il}$ ,  $fx_{ij}$  recebe  $px_{ij}$ ,  $fy_{ijl}$  recebe  $y_{ijl}$ , maiorAtracacao recebe 5 (representa a cardinalidade do berço que recebe o maior número de navios  $i$  conforme o berço L(1) da Tabela 12) e a variável auxiliar  $m$  recebe  $m + 1$ ;
- (9) Para a sequência de atracação da coluna s1 dos berços L(1) e L(2) da Tabela 12 temos os seguintes navios 1 e 2. Então gera-se todas as permutações simples da sequência de atracação s1 (navios 1 e 2) que constitui nos seguintes conjuntos: (1, 2) e (2, 1). Então faz os seguintes passos:
- (9.1) A variável de decisão  $u_{il}$  recebe  $fu_{il}$ . Para a permutação (1, 2) deve-se desalocar os navios 1 e 2 de todos os berços (variável de decisão  $u_{il}$ ). Em seguida aloca-se o navio 1 no berço 1 e navio 2 no berço 2 (variável de decisão  $u_{il}$ ) conforme a coluna s1 da Figura 39 (a). Aplica-se o método heurístico de refinamento LNS para fazer a movimentação dos navios dentro dos berços 1 e 2 com objetivo de encontrar a melhor sequência de atracação dos navios (de menor tempo de serviço) e reconstrói a solução de acordo com a Figura 39 (b). E por fim, como solução encontrada é igual a 103 não houve melhoria da solução;
- (9.2) A variável de decisão  $u_{il}$  recebe  $fu_{il}$ . Para a permutação (2, 1) deve-se desalocar os navios 2 e 1 de todos os berços (variável de decisão  $u_{il}$ ). Em seguida aloca-se o navio 2 do berço 1 e navio 1 no berço 2 (variável de decisão  $u_{il}$ ) conforme a coluna s1 da Figura 39 (c). Aplica-se o método heurístico de refinamento LNS para fazer a movimentação dos navios dentro dos berços 1 e 2 com objetivo de encontrar a melhor sequência de atracação dos navios (de menor tempo de serviço) e reconstrói a solução de acordo com a Figura 39 (d). E por fim, como solução encontrada é igual a 126 não houve melhoria da solução;
- (9.3) A variável auxiliar  $m$  recebe  $m + 1$ ;
- (10) Para a sequência de atracação da coluna s2 dos berços L(1) e L(2) da Tabela 12 temos os seguintes navios 3 e 8. Então gera-se todas as permutações simples da sequência de atracação s2 (navios 3 e 8) que constitui nos seguintes conjuntos: (3, 8) e (8, 3). Então faz os seguintes passos:
- (10.1) A variável de decisão  $u_{il}$  recebe  $fu_{il}$ . Para a permutação (3, 8) deve-se desalocar os navios 3 e 8 de todos os berços (variável de decisão  $u_{il}$ ). Em seguida aloca-se o navio 3 no berço 1 e navio 8 no berço 2 (variável de decisão

- $u_{il}$ ) conforme a coluna s2 da Figura 40 (a). Aplica-se o método heurístico de refinamento LNS para fazer a movimentação dos navios dentro dos berços 1 e 2 com objetivo de encontrar a melhor sequência de atracação dos navios (de menor tempo de serviço) e reconstrói a solução de acordo com a Figura 40 (b). E por fim, como solução encontrada é igual a 103 não houve melhoria da solução;
- (10.2) A variável de decisão  $u_{il}$  recebe  $f_{u_{il}}$ . Para a permutação (8, 3) deve-se desalocar os navios 8 e 3 de todos os berços (variável de decisão  $u_{il}$ ). Em seguida aloca-se o navio 8 do berço 1 e navio 3 no berço 2 (variável de decisão  $u_{il}$ ) conforme a coluna s2 da Figura 40 (c). Aplica-se o método heurístico de refinamento LNS para fazer a movimentação dos navios dentro dos berços 1 e 2 com objetivo de encontrar a melhor sequência de atracação dos navios (de menor tempo de serviço) e reconstrói a solução de acordo com a Figura 40 (d). E por fim, como solução encontrada é igual a 111 não houve melhoria da solução;
- (10.3) A variável auxiliar m recebe  $m + 1$ ;
- (11) Para a sequência de atracação da coluna s3 dos berços L(1) e L(2) da Tabela 12 temos os seguintes navios 5 e 4. Então gera-se todas as permutações simples da sequência de atracação s3 (navios 5 e 4) que constitui nos seguintes conjuntos: (5, 4) e (4, 5). Então faz os seguintes passos:
- (11.1) A variável de decisão  $u_{il}$  recebe  $f_{u_{il}}$ . Para a permutação (5, 4) deve-se desalocar os navios 5 e 4 de todos os berços (variável de decisão  $u_{il}$ ). Em seguida aloca-se o navio 5 no berço 1 e navio 4 no berço 2 (variável de decisão  $u_{il}$ ) conforme a coluna s3 da Figura 41 (a). Aplica-se o método heurístico de refinamento LNS para fazer a movimentação dos navios dentro dos berços 1 e 2 com objetivo de encontrar a melhor sequência de atracação dos navios (de menor tempo de serviço) e reconstrói a solução de acordo com a Figura 41 (b). E por fim, como solução encontrada é igual a 103 não houve melhoria da solução;
- (11.2) A variável de decisão  $u_{il}$  recebe  $f_{u_{il}}$ . Para a permutação (4, 5) deve-se desalocar os navios 4 e 5 de todos os berços (variável de decisão  $u_{il}$ ). Em seguida aloca-se o navio 4 do berço 1 e navio 5 no berço 2 (variável de decisão  $u_{il}$ ) conforme a coluna s3 da Figura 41 (c). Aplica-se o método heurístico de refinamento LNS para fazer a movimentação dos navios dentro dos berços 1 e 2 com objetivo de encontrar a melhor sequência de atracação dos navios (de menor tempo de serviço) e reconstrói a solução de acordo com a Figura 41 (d). E por fim, como solução encontrada é igual a 106 não houve melhoria da solução;
- (11.3) A variável auxiliar m recebe  $m + 1$ ;
- (12) Para a sequência de atracação da coluna s4 dos berços L(1) e L(2) da Tabela 12 temos os seguintes navios 7 e 6. Então gera-se todas as permutações simples da sequência de atracação s4 (navios 7 e 6) que constitui nos seguintes conjuntos: (7, 6) e (6, 7). Então faz os seguintes passos:

- (12.1) A variável de decisão  $u_{il}$  recebe  $f u_{il}$ . Para a permutação (7, 6) deve-se desalocar os navios 7 e 6 de todos os berços (variável de decisão  $u_{il}$ ). Em seguida aloca-se o navio 7 no berço 1 e navio 6 no berço 2 (variável de decisão  $u_{il}$ ) conforme a coluna s4 da Figura 42 (a). Aplica-se o método heurístico de refinamento LNS para fazer a movimentação dos navios dentro dos berços 1 e 2 com objetivo de encontrar a melhor sequência de atracação dos navios (de menor tempo de serviço) e reconstrói a solução de acordo com a Figura 42 (b). E por fim, como solução encontrada é igual a 103 não houve melhoria da solução;
- (12.2) A variável de decisão  $u_{il}$  recebe  $f u_{il}$ . Para a permutação (6, 7) deve-se desalocar os navios 6 e 7 de todos os berços (variável de decisão  $u_{il}$ ). Em seguida aloca-se o navio 6 do berço 1 e navio 7 no berço 2 (variável de decisão  $u_{il}$ ) conforme a coluna s4 da Figura 42 (c). Aplica-se o método heurístico de refinamento LNS para fazer a movimentação dos navios dentro dos berços 1 e 2 com objetivo de encontrar a melhor sequência de atracação dos navios (de menor tempo de serviço) e reconstrói a solução de acordo com a Figura 42 (d). E por fim, como solução encontrada é igual a 104 não houve melhoria da solução;
- (12.3) A variável auxiliar  $m$  recebe  $m + 1$ ;
- (13) Para a sequência de atracação da coluna s5 dos berços L(1) e L(2) da Tabela 12 temos os navios 9 e 10. Então gera-se todas as permutações simples da sequência de atracação s5 (navios 9 e 10) que constitui nos seguintes conjuntos: (9, 10) e (10, 9). Então faz os seguintes passos:
- (13.1) A variável de decisão  $u_{il}$  recebe  $f u_{il}$ . Para a permutação (9, 10) deve-se desalocar os navios 9 e 10 de todos os berços (variável de decisão  $u_{il}$ ). Em seguida aloca-se o navio 9 no berço 1 e o navio 10 no berço 2 (variável de decisão  $u_{il}$ ) conforme a coluna s5 da Figura 43 (a). Aplica-se o método heurístico de refinamento LNS para fazer a movimentação dos navios dentro dos berços 1 e 2 com objetivo de encontrar a melhor sequência de atracação dos navios (de menor tempo de serviço) e reconstrói a solução de acordo com a Figura 43 (b). E por fim, como solução encontrada é igual a 103 não houve melhoria da solução;
- (13.2) A variável de decisão  $u_{il}$  recebe  $f u_{il}$ . Para a permutação (10, 9) deve-se desalocar os navios 10 e 9 de todos os berços (variável de decisão  $u_{il}$ ). Em seguida aloca-se o navio 10 no berço 1 e o navio 9 no berço 2 (variável de decisão  $u_{il}$ ) conforme a coluna s5 da Figura 43 (c). Aplica-se o método heurístico de refinamento LNS para fazer a movimentação dos navios dentro dos berços 1 e 2 com objetivo de encontrar a melhor sequência de atracação dos navios (de menor tempo de serviço) e reconstrói a solução de acordo com a Figura 43 (d). E por fim, como solução encontrada é igual a 102 houve melhoria da solução, então atualiza-se as variáveis auxiliares:  $pu_{il}$  recebe a variável de decisão  $u_{il}$ ,  $px_{ij}$  recebe a variável de decisão  $x_{ij}$ ,  $py_{ijl}$  recebe a variável de decisão  $y_{ijl}$ , a

melhora solução encontrada é igual a 102, reconstrói a sequência de atracação dos navios conforme a Tabela 13,  $zzFO$  recebe 102 e variável auxiliar  $m$  recebe 0;

- (13.3) Como houve melhora da solução candidata a ótima então atualiza as variáveis auxiliares:  $f_{u_{il}}$  recebe  $pu_{il}$ ,  $f_{x_{ij}}$  recebe  $px_{ij}$ ,  $f_{y_{ijl}}$  recebe  $y_{ijl}$ ,  $maiorAtracacao$  recebe 5 (representa a cardinalidade do berço que recebe o maior número de navios  $i$  conforme o berço L(1) da Tabela 13) e a variável auxiliar  $m$  recebe  $m + 1$ ;
- (14) Para a sequência de atracação da coluna  $s1$  dos berços L(1) e L(2) da Tabela 13 temos os seguintes navios 1 e 2. Então gera-se todas as permutações simples da sequência de atracação  $s1$  (navios 1 e 2) que constitui nos seguintes conjuntos: (1, 2) e (2, 1). Então faz os seguintes passos:
- (14.1) A variável de decisão  $u_{il}$  recebe  $f_{u_{il}}$ . Para a permutação (1, 2) deve-se desalocar os navios 1 e 2 de todos os berços (variável de decisão  $u_{il}$ ). Em seguida aloca-se o navio 1 no berço 1 e navio 2 no berço 2 (variável de decisão  $u_{il}$ ) conforme a coluna  $s1$  da Figura 44 (a). Aplica-se o método heurístico de refinamento LNS para fazer a movimentação dos navios dentro dos berços 1 e 2 com objetivo de encontrar a melhor sequência de atracação dos navios (de menor tempo de serviço) e reconstrói a solução de acordo com a Figura 44 (b). E por fim, como solução encontrada é igual a 102 não houve melhoria da solução;
- (14.2) A variável de decisão  $u_{il}$  recebe  $f_{u_{il}}$ . Para a permutação (2, 1) deve-se desalocar os navios 2 e 1 de todos os berços (variável de decisão  $u_{il}$ ). Em seguida aloca-se o navio 2 do berço 1 e navio 1 no berço 2 (variável de decisão  $u_{il}$ ) conforme a coluna  $s1$  da Figura 44 (c). Aplica-se o método heurístico de refinamento LNS para fazer a movimentação dos navios dentro dos berços 1 e 2 com objetivo de encontrar a melhor sequência de atracação dos navios (de menor tempo de serviço) e reconstrói a solução de acordo com a Figura 44 (d). E por fim, como solução encontrada é igual a 125 não houve melhoria da solução;
- (14.3) A variável auxiliar  $m$  recebe  $m + 1$ ;
- (15) Para a sequência de atracação da coluna  $s2$  dos berços L(1) e L(2) da Tabela 13 temos os seguintes navios 3 e 8. Então gera-se todas as permutações simples da sequência de atracação  $s2$  (navios 3 e 8) que constitui nos seguintes conjuntos: (3, 8) e (8, 3). Então faz os seguintes passos:
- (15.1) A variável de decisão  $u_{il}$  recebe  $f_{u_{il}}$ . Para a permutação (3, 8) deve-se desalocar os navios 3 e 8 de todos os berços (variável de decisão  $u_{il}$ ). Em seguida aloca-se o navio 3 no berço 1 e navio 8 no berço 2 (variável de decisão  $u_{il}$ ) conforme a coluna  $s2$  da Figura 45 (a). Aplica-se o método heurístico de refinamento LNS para fazer a movimentação dos navios dentro dos berços 1 e 2 com objetivo de encontrar a melhor sequência de atracação dos navios (de

- menor tempo de serviço) e reconstrói a solução de acordo com a Figura 45 (b). E por fim, como solução encontrada é igual a 102 não houve melhoria da solução;
- (15.2) A variável de decisão  $u_{il}$  recebe  $f u_{il}$ . Para a permutação (8, 3) deve-se desalocar os navios 8 e 3 de todos os berços (variável de decisão  $u_{il}$ ). Em seguida aloca-se o navio 8 do berço 1 e navio 3 no berço 2 (variável de decisão  $u_{il}$ ) conforme a coluna s2 da Figura 45 (c). Aplica-se o método heurístico de refinamento LNS para fazer a movimentação dos navios dentro dos berços 1 e 2 com objetivo de encontrar a melhor sequência de atracação dos navios (de menor tempo de serviço) e reconstrói a solução de acordo com a Figura 45 (d). E por fim, como solução encontrada é igual a 110 não houve melhoria da solução;
- (15.3) A variável auxiliar m recebe  $m + 1$ ;
- (16) Para a sequência de atracação da coluna s3 dos berços L(1) e L(2) da Tabela 13 temos os seguintes navios 5 e 4. Então gera-se todas as permutações simples da sequência de atracação s3 (navios 5 e 4) que constitui nos seguintes conjuntos: (5, 4) e (4, 5). Então faz os seguintes passos:
- (16.1) A variável de decisão  $u_{il}$  recebe  $f u_{il}$ . Para a permutação (5, 4) deve-se desalocar os navios 5 e 4 de todos os berços (variável de decisão  $u_{il}$ ). Em seguida aloca-se o navio 5 no berço 1 e navio 4 no berço 2 (variável de decisão  $u_{il}$ ) conforme a coluna s3 da Figura 46 (a). Aplica-se o método heurístico de refinamento LNS para fazer a movimentação dos navios dentro dos berços 1 e 2 com objetivo de encontrar a melhor sequência de atracação dos navios (de menor tempo de serviço) e reconstrói a solução de acordo com a Figura 46 (b). E por fim, como solução encontrada é igual a 102 não houve melhoria da solução;
- (16.2) A variável de decisão  $u_{il}$  recebe  $f u_{il}$ . Para a permutação (4, 5) deve-se desalocar os navios 4 e 5 de todos os berços (variável de decisão  $u_{il}$ ). Em seguida aloca-se o navio 4 do berço 1 e navio 5 no berço 2 (variável de decisão  $u_{il}$ ) conforme a coluna s3 da Figura 46 (c). Aplica-se o método heurístico de refinamento LNS para fazer a movimentação dos navios dentro dos berços 1 e 2 com objetivo de encontrar a melhor sequência de atracação dos navios (de menor tempo de serviço) e reconstrói a solução de acordo com a Figura 46 (d). E por fim, como solução encontrada é igual a 105 não houve melhoria da solução;
- (16.3) A variável auxiliar m recebe  $m + 1$ ;
- (17) Para a sequência de atracação da coluna s4 dos berços L(1) e L(2) da Tabela 13 temos os seguintes navios 7 e 9. Então gera-se todas as permutações simples da sequência de atracação s4 (navios 7 e 9) que constitui nos seguintes conjuntos: (7, 9) e (9, 7). Então faz os seguintes passos:
- (17.1) A variável de decisão  $u_{il}$  recebe  $f u_{il}$ . Para a permutação (7, 9) deve-se desalocar os navios 7 e 9 de todos os berços (variável de decisão  $u_{il}$ ). Em seguida aloca-se o navio 7 no berço 1 e navio 9 no berço 2 (variável de decisão



- $u_{il}$ ) conforme a coluna s4 da Figura 47 (a). Aplica-se o método heurístico de refinamento LNS para fazer a movimentação dos navios dentro dos berços 1 e 2 com objetivo de encontrar a melhor sequência de atracação dos navios (de menor tempo de serviço) e reconstrói a solução de acordo com a Figura 47 (b). E por fim, como solução encontrada é igual a 102 não houve melhoria da solução;
- (17.2) A variável de decisão  $u_{il}$  recebe  $f u_{il}$ . Para a permutação (9, 7) deve-se desalocar os navios 9 e 7 de todos os berços (variável de decisão  $u_{il}$ ). Em seguida aloca-se o navio 9 do berço 1 e navio 7 no berço 2 (variável de decisão  $u_{il}$ ) conforme a coluna s4 da Figura 47 (c). Aplica-se o método heurístico de refinamento LNS para fazer a movimentação dos navios dentro dos berços 1 e 2 com objetivo de encontrar a melhor sequência de atracação dos navios (de menor tempo de serviço) e reconstrói a solução de acordo com a Figura 47 (d). E por fim, como solução encontrada é igual a 104 não houve melhoria da solução;
- (17.3) A variável auxiliar m recebe  $m + 1$ ;
- (18) Para a sequência de atracação da coluna s5 dos berços L(1) e L(2) da Tabela 13 temos os seguintes navios 10 e 6. Então gera-se todas as permutações simples da sequência de atracação s5 (navios 10 e 6) que constitui nos seguintes conjuntos: (10, 6) e (6, 10). Então faz os seguintes passos:
- (18.1) A variável de decisão  $u_{il}$  recebe  $f u_{il}$ . Para a permutação (10, 6) deve-se desalocar os navios 10 e 6 de todos os berços (variável de decisão  $u_{il}$ ). Em seguida aloca-se o navio 10 no berço 1 e navio 6 no berço 2 (variável de decisão  $u_{il}$ ) conforme a coluna s5 da Figura 48 (a). Aplica-se o método heurístico de refinamento LNS para fazer a movimentação dos navios dentro dos berços 1 e 2 com objetivo de encontrar a melhor sequência de atracação dos navios (de menor tempo de serviço) e reconstrói a solução de acordo com a Figura 48 (b). E por fim, como solução encontrada é igual a 102 não houve melhoria da solução;
- (18.2) A variável de decisão  $u_{il}$  recebe  $f u_{il}$ . Para a permutação (6, 10) deve-se desalocar os navios 6 e 10 de todos os berços (variável de decisão  $u_{il}$ ). Em seguida aloca-se o navio 6 do berço 1 e navio 10 no berço 2 (variável de decisão  $u_{il}$ ) conforme a coluna s5 da Figura 48 (c). Aplica-se o método heurístico de refinamento LNS para fazer a movimentação dos navios dentro dos berços 1 e 2 com objetivo de encontrar a melhor sequência de atracação dos navios (de menor tempo de serviço) e reconstrói a solução de acordo com a Figura 48 (d). E por fim, como solução encontrada é igual a 102 não houve melhoria da solução;
- (18.3) A variável auxiliar m recebe  $m + 1$ . Como a variável auxiliar m é maior que maiorAtracacao foi atingido a condição de parada.

Na próxima seção deste trabalho é apresentado em detalhes a aplicação do método heurístico de refinamento LNS do item (13.2).

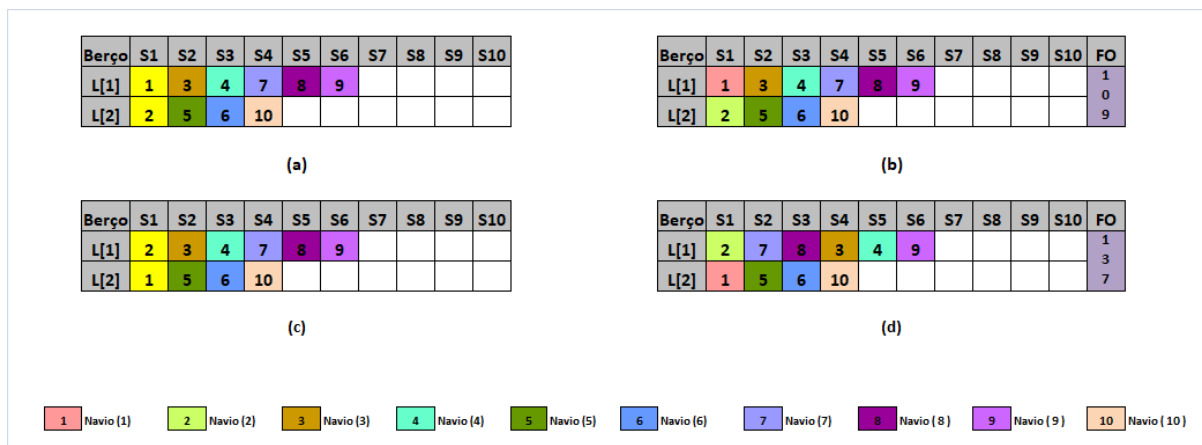


Figura 31 – Evolução das permutações dos navios 1 e 2 da coluna s1 (sequência de atracação) da Tabela 10

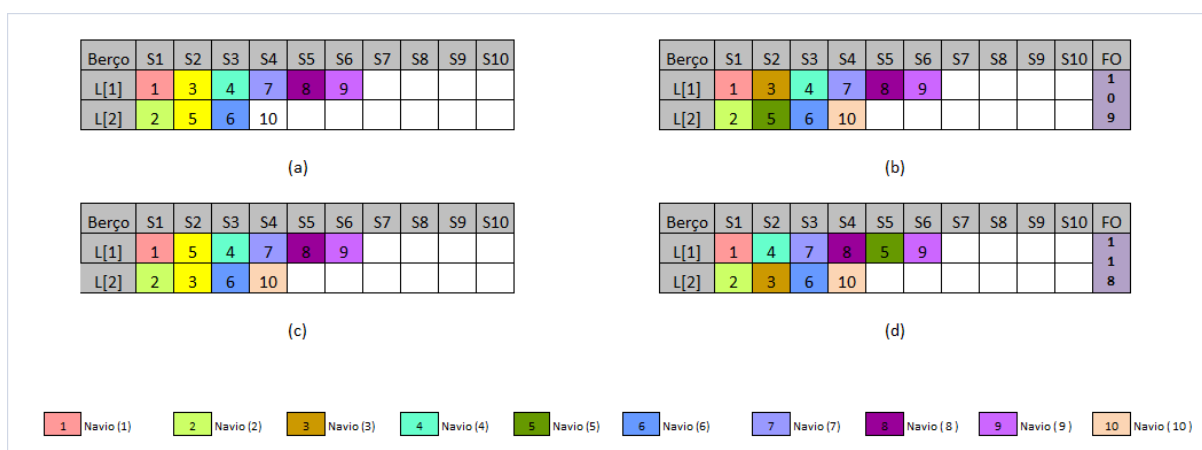


Figura 32 – Evolução das permutações dos navios 3 e 5 da coluna s2 (sequência de atracação) da Tabela 10

Tabela 11 – Resumo da sequência de atracação dos navios  $i$  por berço  $l$  no horizonte de planejamento

Berço	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7	s8	s9	s10
L(1)	1	3	4	7	9					
L(2)	2	8	5	6	10					

Tabela 12 – Resumo da sequência de atracação dos navios  $i$  por berço  $l$  no horizonte de planejamento

Berço	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7	s8	s9	s10
L(1)	1	3	5	7	9					
L(2)	2	8	4	6	10					



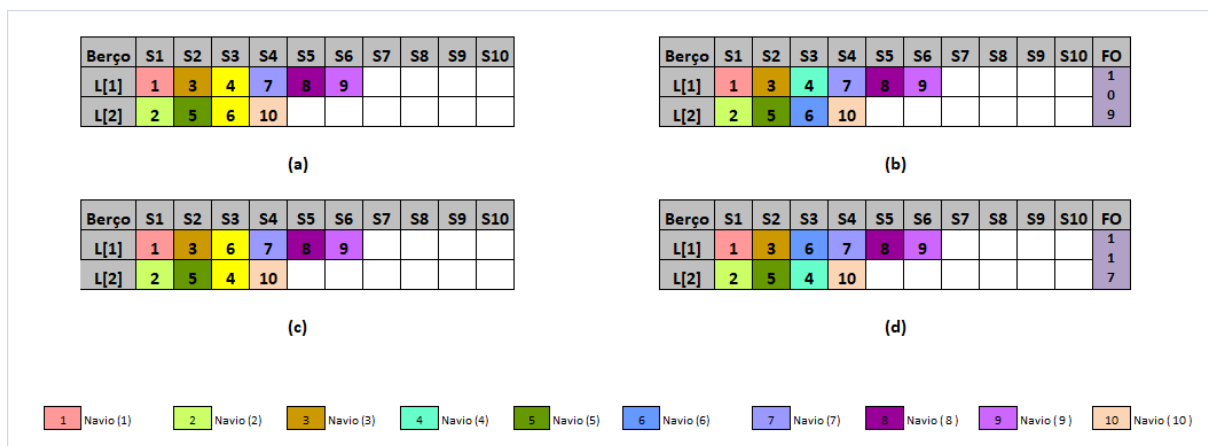


Figura 33 – Evolução das permutações dos navios 4 e 6 da coluna s3 (sequência de atracação) da Tabela 10

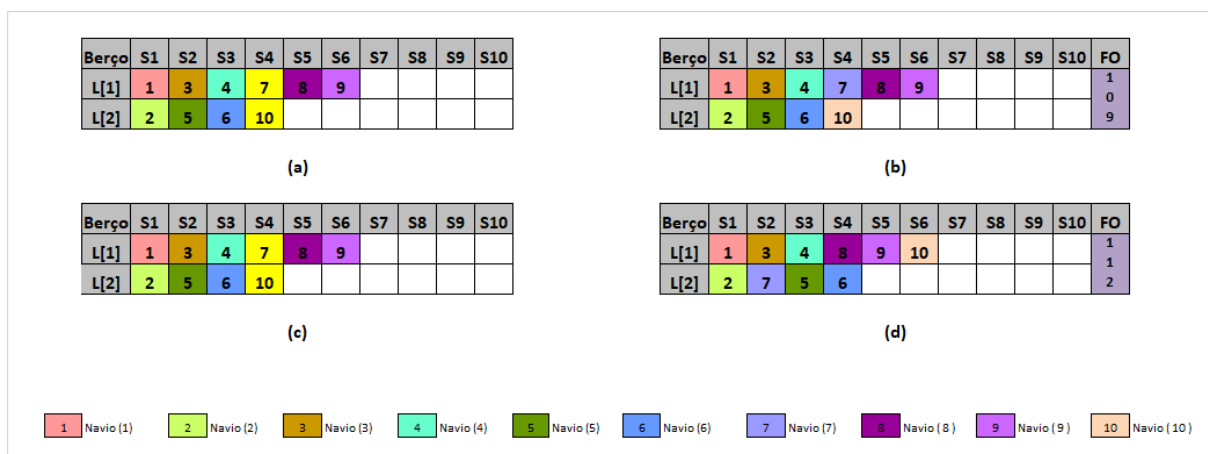


Figura 34 – Evolução das permutações dos navios 7 e 10 da coluna s4 (sequência de atracação) da Tabela 10

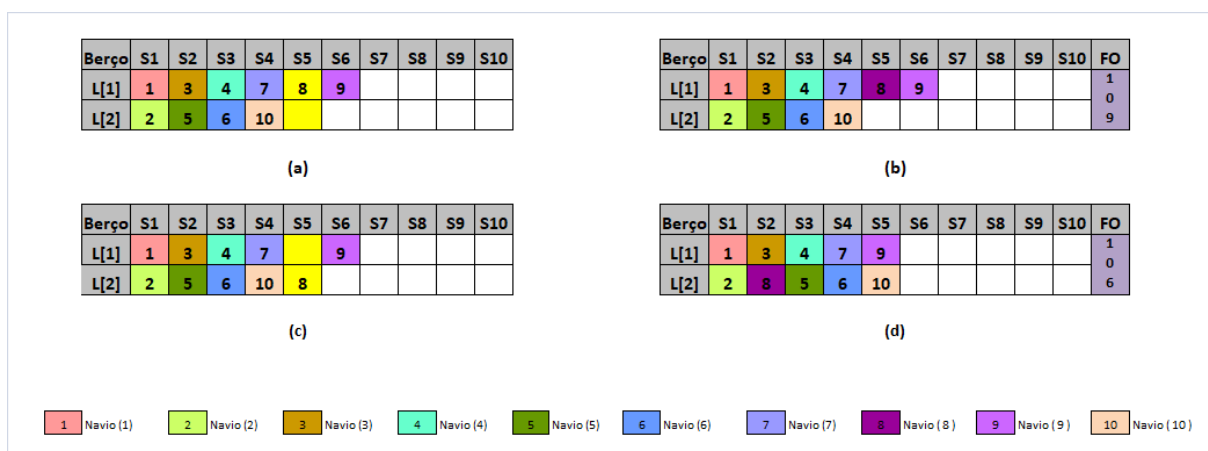


Figura 35 – Evolução das permutações do navio 8 da coluna s5 (sequência de atracação) da Tabela 10

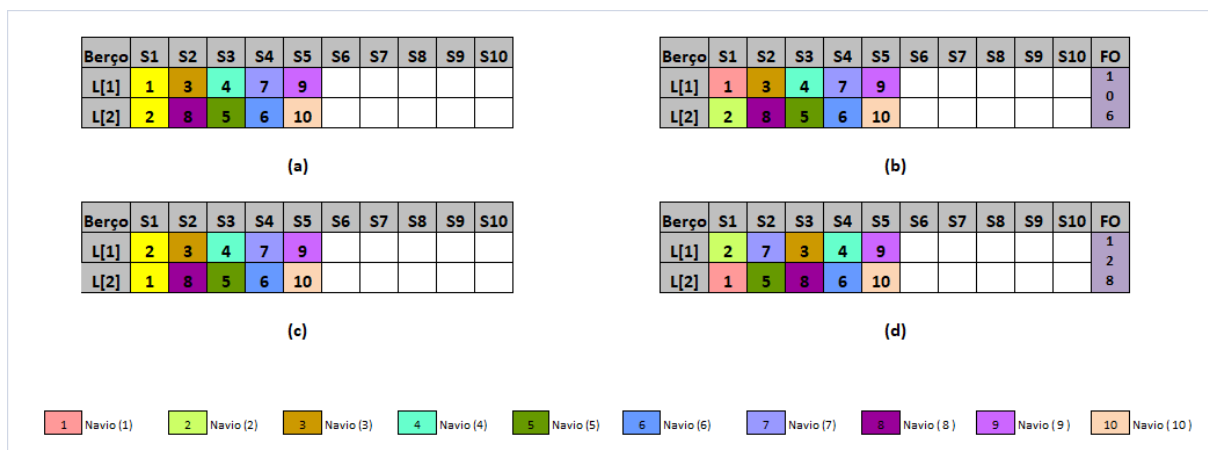


Figura 36 – Evolução das permutações dos navios 1 e 2 da coluna s1 (sequência de atracação) da Tabela 11

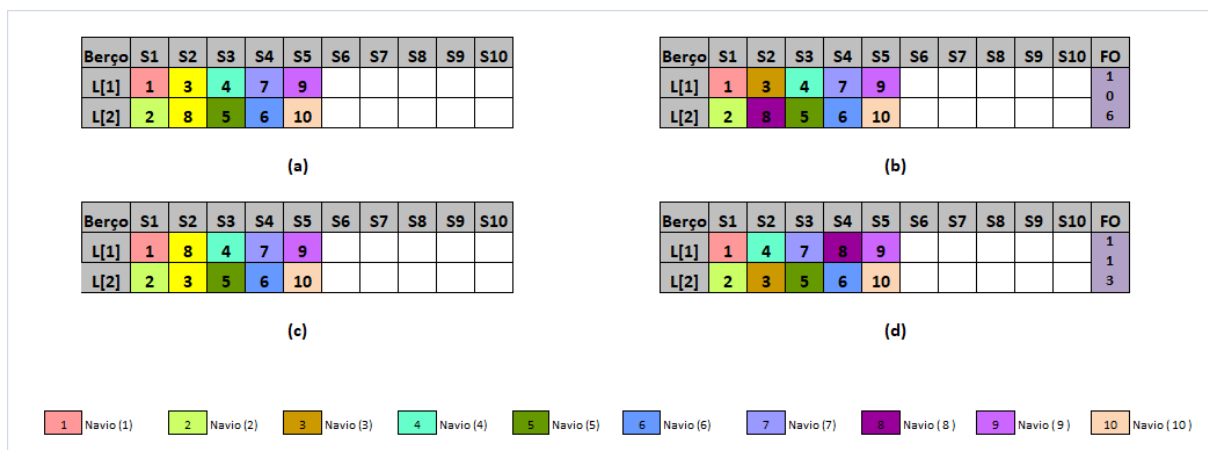


Figura 37 – Evolução das permutações dos navios 3 e 8 da coluna s2 (sequência de atracação) da Tabela 11

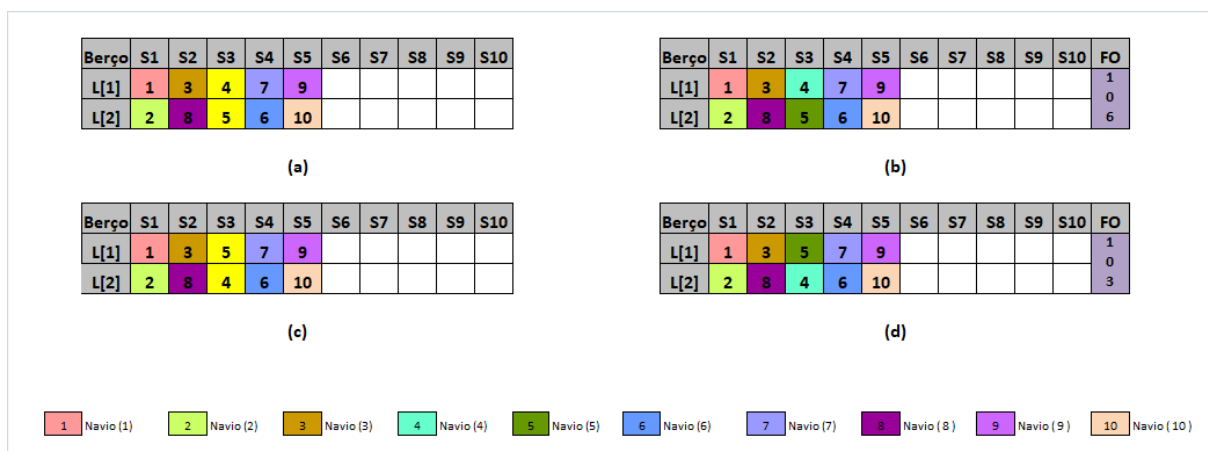


Figura 38 – Evolução das permutações dos navios 4 e 5 da coluna s3 (sequência de atracação) da Tabela 11

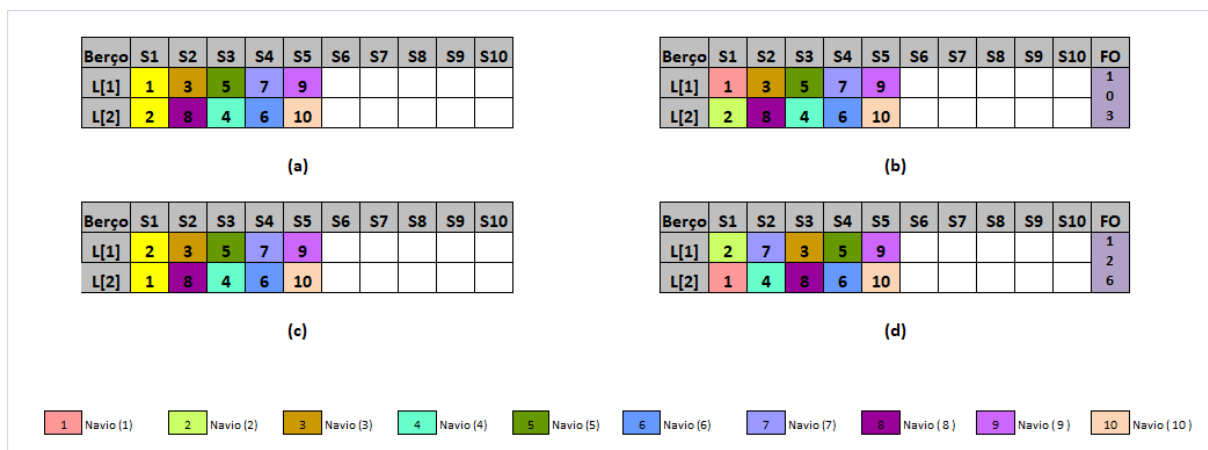


Figura 39 – Evolução das permutações dos navios 1 e 2 da coluna s1 (sequência de atracação) da Tabela 12

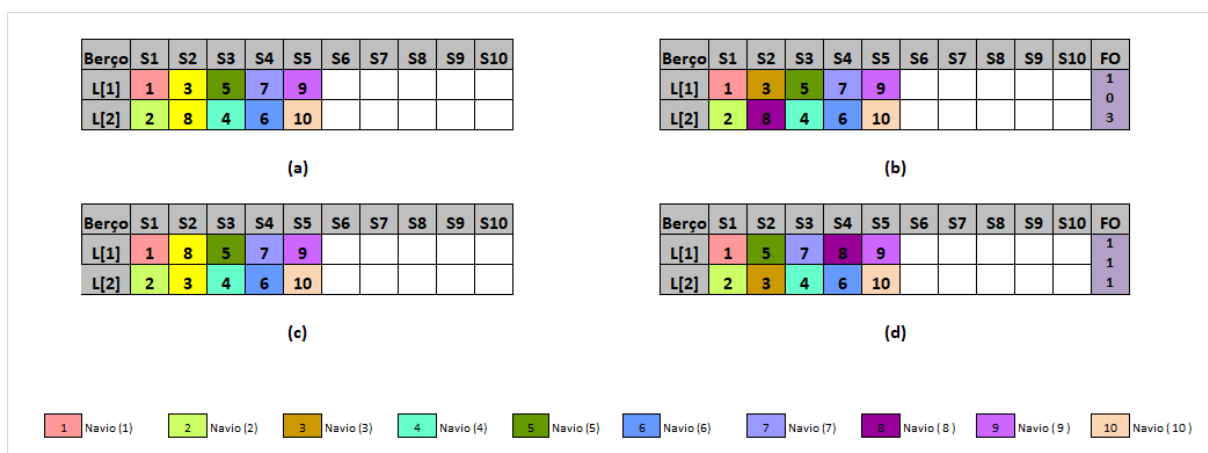


Figura 40 – Evolução das permutações dos navios 3 e 8 da coluna s2 (sequência de atracação) da Tabela 12

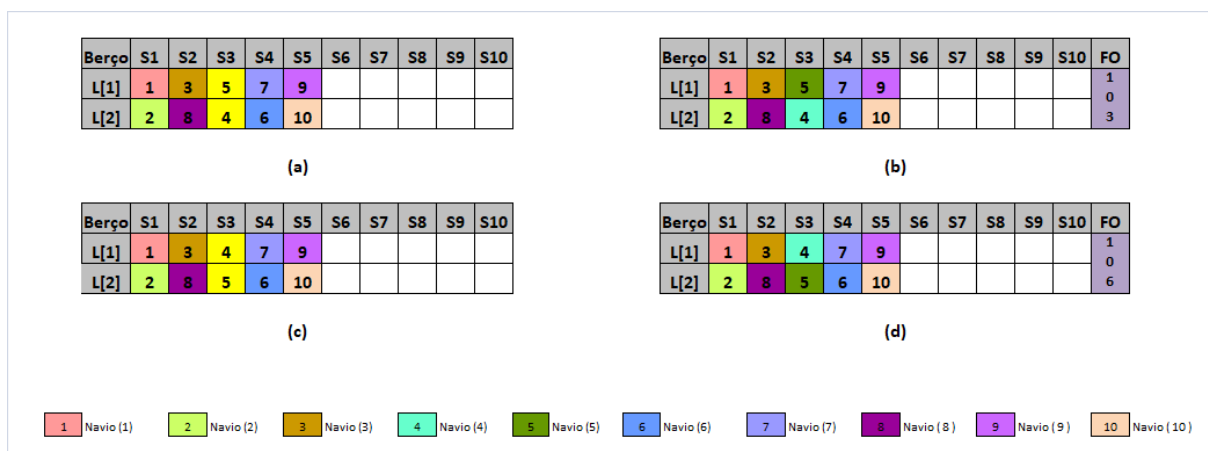


Figura 41 – Evolução das permutações dos navios 4 e 5 da coluna s3 (sequência de atracação) da Tabela 12

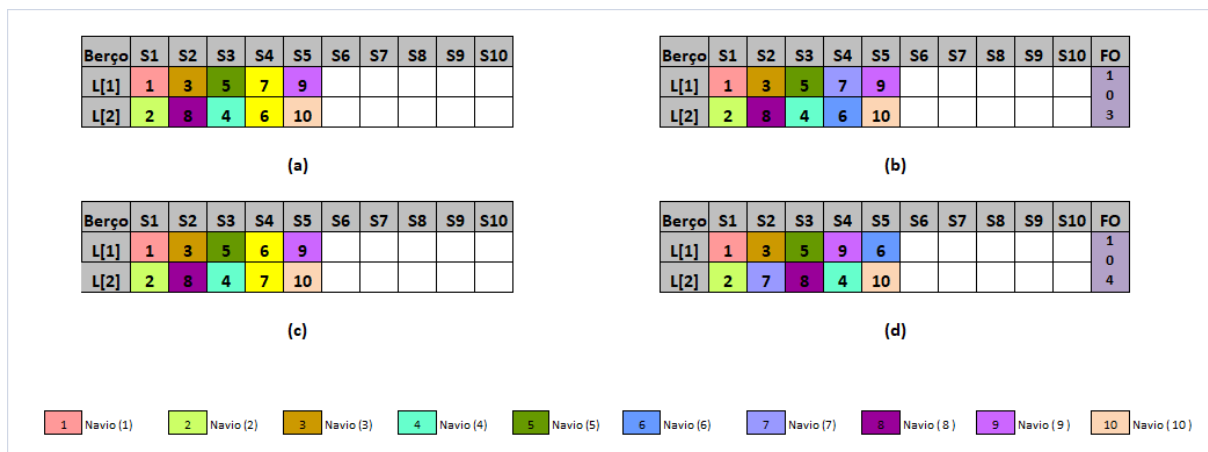


Figura 42 – Evolução das permutações dos navios 6 e 7 da coluna s4 (sequência de atracação) da Tabela 12

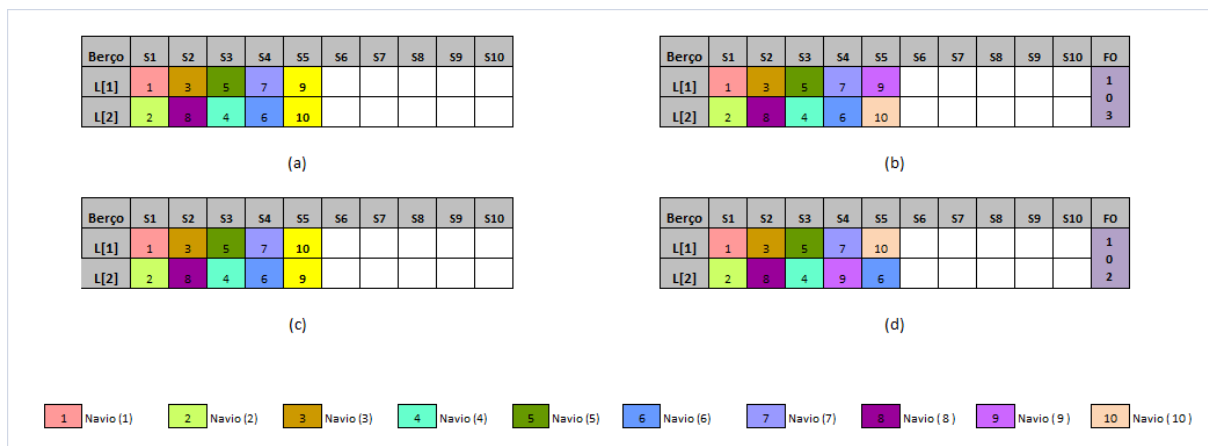


Figura 43 – Evolução das permutações dos navios 9 e 10 da coluna s5 (sequência de atracação) da Tabela 12

Tabela 13 – Resumo da sequência de atracação dos navios  $i$  por berço  $l$  no horizonte de planejamento

Berço	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7	s8	s9	s10
L(1)	1	3	5	7	10					
L(2)	2	8	4	9	6					

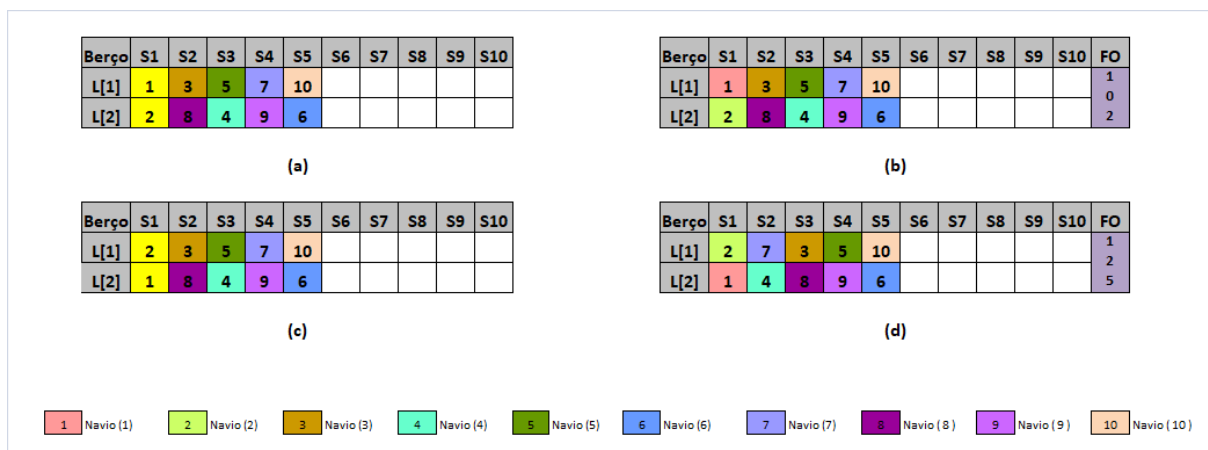


Figura 44 – Evolução das permutações dos navios 1 e 2 da coluna s1 (sequência de atracação) da Tabela 13

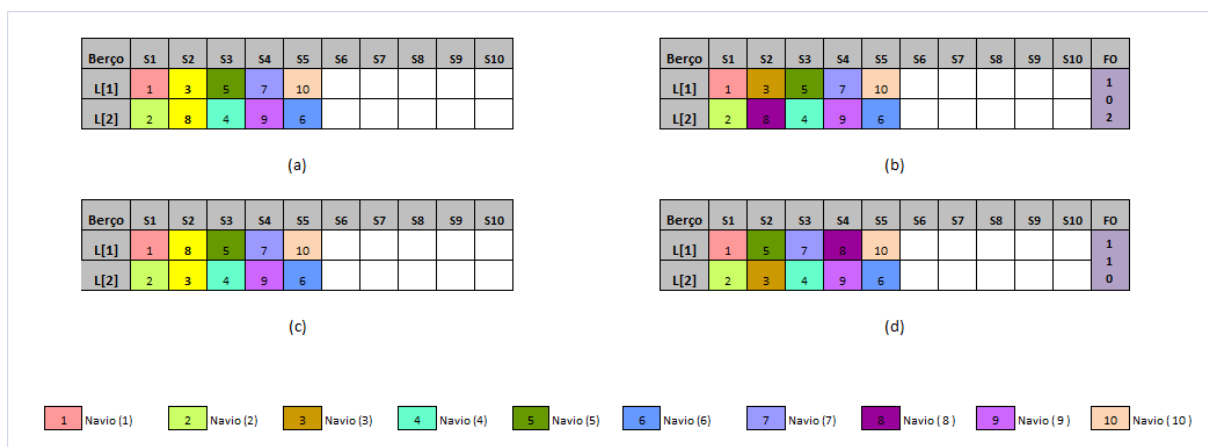


Figura 45 – Evolução das permutações dos navios 3 e 8 da coluna s2 (sequência de atracação) da Tabela 13

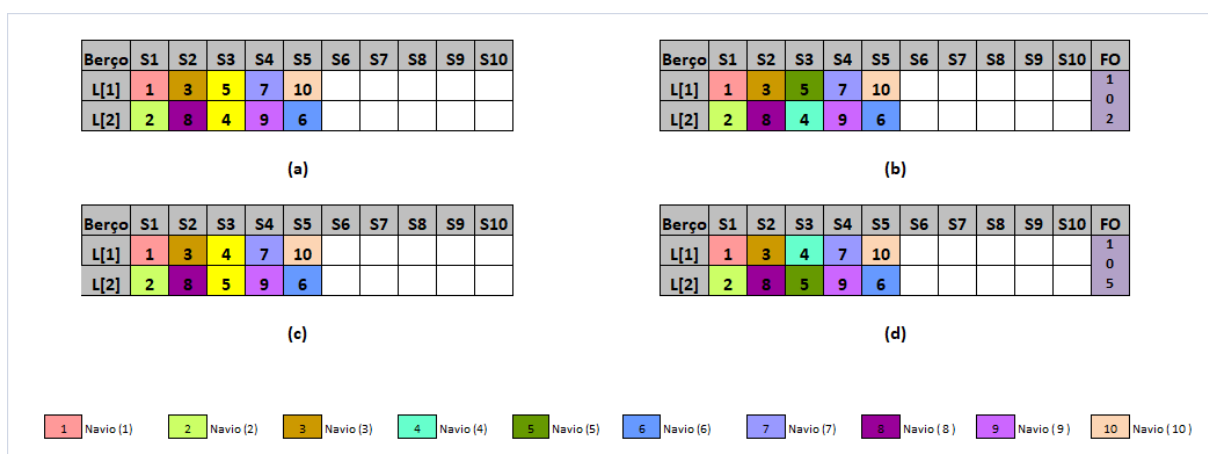


Figura 46 – Evolução das permutações dos navios 5 e 4 da coluna s3 (sequência de atracação) da Tabela 13

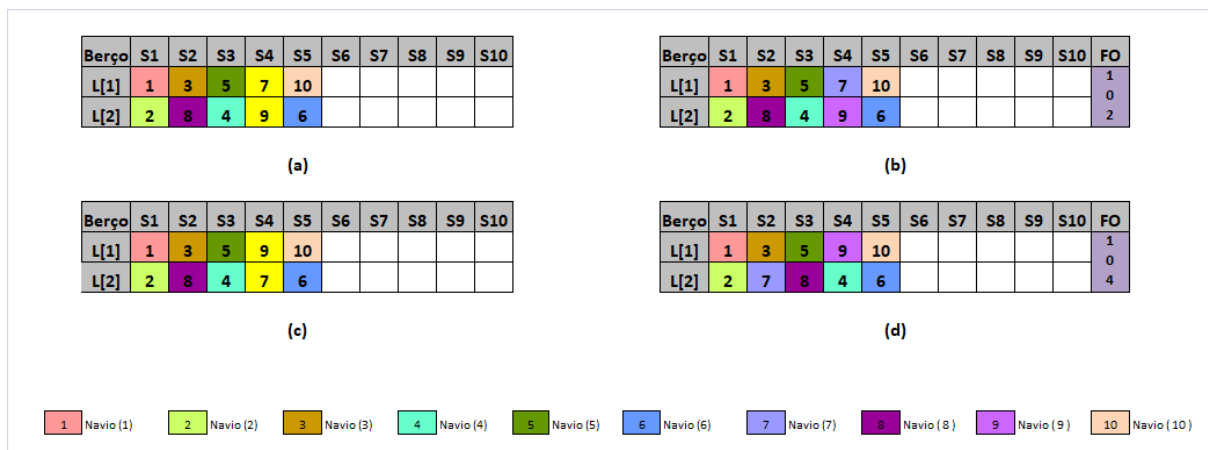


Figura 47 – Evolução das permutações dos navios 7 e 9 da coluna s4 (sequência de atracação) da Tabela 13

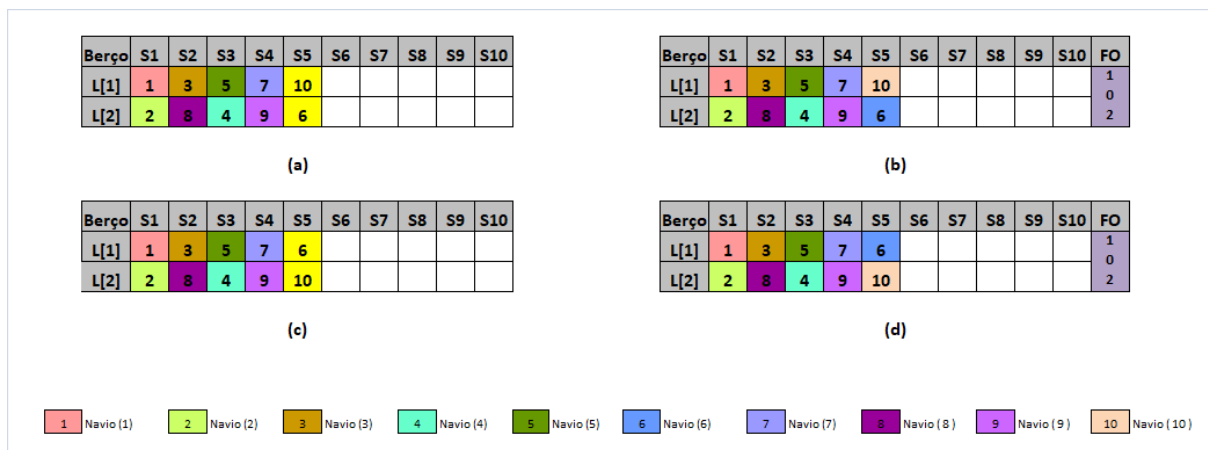


Figura 48 – Evolução das permutações dos navios 10 e 6 da coluna s5 (sequência de atracação) da Tabela 13

#### 4.10.1.3 Movimentação dos navios dentro do Berço - Método Heurística LNS

A heurística de refinamento LNS é responsável por realocar (movimentar) os navios dentro dos berços para encontrar a melhor sequência (de menor tempo de serviço). A seguir as seguintes operações são realizadas para os berços 1 e 2:

- (1) Para berço 1 temos os seguintes navios: 1, 3, 5, 7 e 10 para realocar, se houver melhoria na solução. A variável auxiliar  $zTTW$  recebe 2 (Menor posição da janela  $TTW$  de atracação disponível por ordem de chegada no terminal ou seja do navio 1), então calcule os tempos de serviços de alocação:
  - (1.1) Dos navios 1, 3, 5, 7 e 10 a partir da janela de atracação  $zTTW$  igual a 2 do berço 1, respeitando a restrição (3) que obrigam os navios  $i$  a atracarem após suas janelas  $TTW$ 's de chegada  $a_i$  e o parâmetro  $h_{il}$  (que diz respeito ao tempo

- de processamento necessário para um navio  $i$  completar a operação de carga e/ou descarga), temos o tempo de serviço do navio 1 é igual a 2 e os tempos de serviços dos navios 3, 5, 7 e 10 são iguais a MAXB (pois houve violação da restrição (3)), conforme demonstrado na Figura 49. Então aloca-se navio 1 no intervalo de janela  $TTW$  de 2 à 3 de menor tempo de serviço (2), a variável auxiliar  $zTTW$  recebe (atualiza) 4, remove o navio 1 da lista do berço (realocar);
- (1.2) Para os navios 3, 5, 7 e 10 a partir da janela de atracação  $zTTW$  igual a 4 do berço 1 respeitando a restrição (3) e o parâmetro  $h_{il}$ , temos o tempo de serviço do navio 3 é igual a 3 e os tempos de serviços dos navios 5, 7 e 10 são iguais a MAXB (pois houve violação da restrição (3)), conforme demonstrado na Figura 50. Então aloca-se navio 3 no intervalo de janela  $TTW$  de 4 à 6 de menor tempo de serviço (3), a variável auxiliar  $zTTW$  recebe (atualiza) 7, remove o navio 3 da lista do berço (realocar);
- (c) Para os navios 5, 7 e 10 a partir da janela de atracação  $zTTW$  igual a 7 do berço 1 respeitando a restrição (3) e o parâmetro  $h_{il}$ , temos o tempo de serviço do navio 5 é igual a 6 e os tempos de serviços dos navios 7 e 10 são iguais a MAXB (pois houve violação da restrição (3)), conforme demonstrado na Figura 51. Então aloca-se navio 5 no intervalo de janela  $TTW$  de 4 à 6 de menor tempo de serviço (3), a variável auxiliar  $zTTW$  recebe 13, remove o navio 5 da lista do berço (realocar);
- (1.3) Para os navios 7 e 10 a partir da janela de atracação  $zTTW$  igual a 13 do berço 1 respeitando a restrição (3) e o parâmetro  $h_{il}$ , temos o tempo de serviço do navio 7 é igual a 2 e para o navio 10 igual a 12 (doze) conforme demonstrado na Figura 52. Então aloca-se navio 7 no intervalo de janela  $TTW$  de 13 à 14 de menor tempo de serviço (2), a variável auxiliar  $zTTW$  recebe 15, remove o navio 7 da lista do berço (realocar);
- (1.4) Para o navio 10 a partir da janela de atracação  $zTTW$  igual a 15 do berço 1 respeitando a restrição (3) e o parâmetro  $h_{il}$ , temos o tempo de serviço do navio 10 é igual a 12 conforme demonstrado na Figura 53. Como não houve violação de nenhuma restrição então aloca-se navio 10 no intervalo de janela  $TTW$  de 15 à 26 de menor tempo de serviço (12) e remove o navio 7 da lista do berço (realocar).
- (2) Para berço 2 temos os seguintes navios: 2, 4, 6, 8 e 9 para realocar, se houver melhora na solução. A variável auxiliar  $zTTW$  recebe 3 (Menor posição da janela  $TTW$  de atracação disponível por ordem de chegada no terminal ou seja do navio 2), então calcule os tempos de serviços de alocação:
- (2.1) Dos navios 2, 4, 6, 8 e 9 a partir da janela de atracação  $zTTW$  igual a 3 do berço 2, respeitando a restrição (3) que obrigam os navios  $i$  a atracarem após suas janelas  $TTW$ 's de chegada  $a_i$  e o parâmetro  $h_{il}$  (que diz respeito ao tempo de

processamento necessário para um navio  $i$  completar a operação de carga e/ou descarga), temos o tempo de serviço do navio 2 igual 3 e os tempos de serviços dos navios 4, 6, 8 e 9 são iguais a  $MAXB$  (pois houve violação da restrição (3)), conforme demonstrado na Figura 54. Então aloca-se navio 2 no intervalo de janela  $TTW$  de 3 à 10 de menor tempo de serviço (8), a variável auxiliar  $zTTW$  recebe (atualiza) 11, remove o navio 2 da lista do berço (realocar);

- (2.2) Para os navios 4, 6, 8 e 9 a partir da janela de atracação  $zTTW$  igual a 11 (onze) do berço 2 respeitando a restrição (3) e o parâmetro  $h_{il}$ , temos os seguintes tempos de serviços: do navio 4 é igual a 6, do navio 6 é igual a 8, do navio 8 é igual a 2 e do navio 9 é igual a 6. Conforme demonstrado na Figura 55. Então aloca-se navio 8 no intervalo de janela  $TTW$  de 11 à 12 de menor tempo de serviço (2), a variável auxiliar  $zTTW$  recebe (atualiza) 13, remove o navio 8 da lista do berço (realocar);
- (2.3) Para os navios 4, 6 e 9 a partir da janela de atracação  $zTTW$  igual a 13 do berço 2 respeitando a restrição (3) e o parâmetro  $h_{il}$ , temos os seguintes tempos de serviços: do navio 4 é igual a 6, do navio 6 é igual a 8 e do navio 9 é igual a 6. Conforme demonstrado na Figura 56. Então aloca-se navio 4 no intervalo de janela  $TTW$  de 13 à 18 de menor tempo de serviço (6), a variável auxiliar  $zTTW$  recebe (atualiza) 19, remove o navio 4 da lista do berço (realocar);
- (2.4) Para os navios 6 e 9 a partir da janela de atracação  $zTTW$  igual a 19 do berço 2 respeitando a restrição (3) e o parâmetro  $h_{il}$ , temos os seguintes tempos de serviços: do navio 6 é igual a 8 e do navio 9 é igual a 6. Conforme demonstrado na Figura 57. Então aloca-se navio 9 no intervalo de janela  $TTW$  de 19 à 24 de menor tempo de serviço (6), a variável auxiliar  $zTTW$  recebe (atualiza) 25, remove o navio 9 da lista do berço (realocar);
- (2.5) E por fim aloca o navio 6 a partir da janela de atracação  $zTTW$  igual a 25 do berço 2 respeitando a restrição (3) e o parâmetro  $h_{il}$ , temos o tempo de serviço do navio 9 é igual a 8 conforme demonstrado na Figura 53. Como não houve violação de nenhuma restrição então aloca-se navio 9 no intervalo de janela  $TTW$  de 25 à 32 de menor tempo de serviço (8) e remove o navio 6 da lista do berço (realocar).



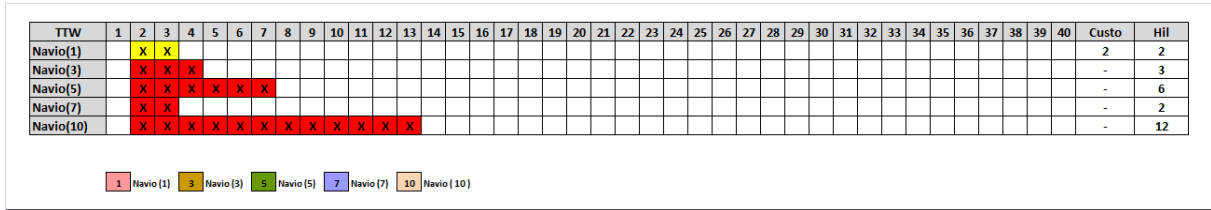


Figura 49 – Resultado da aplicação da heurística LNS no berço 1 para os navios: 1, 3, 5, 7 e 10.

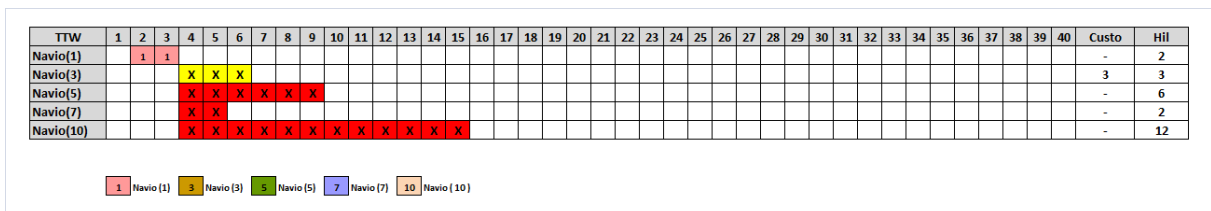


Figura 50 – Resultado da aplicação da heurística LNS no berço 1 para os navios: 3, 5, 7 e 10.

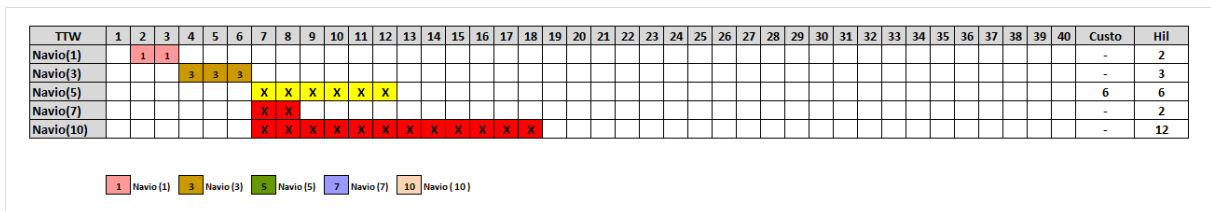


Figura 51 – Resultado da aplicação da heurística LNS no berço 1 para os navios: 5, 7 e 10.

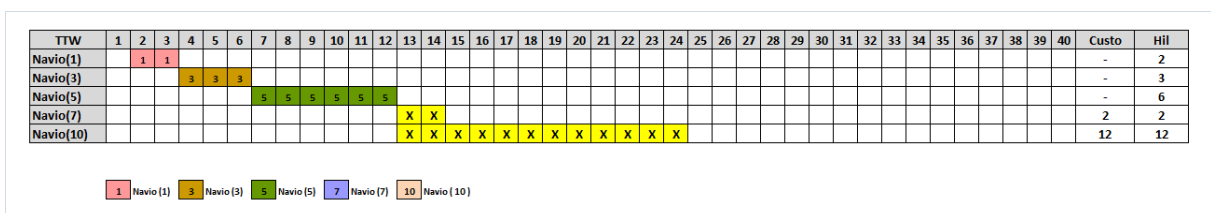


Figura 52 – Resultado da aplicação da heurística LNS no berço 1 para os navios: 7 e 10.

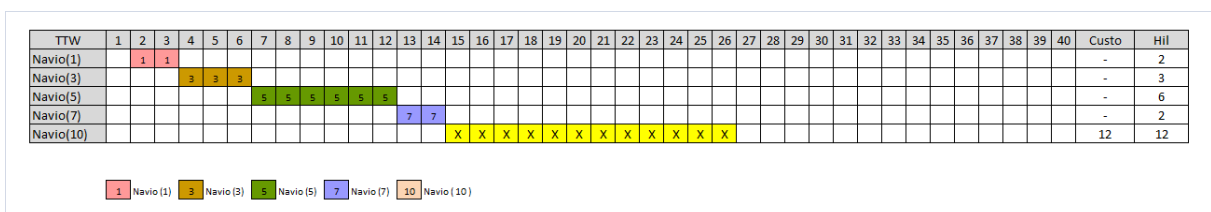


Figura 53 – Resultado da aplicação da heurística LNS no berço 1 para o navio 10.

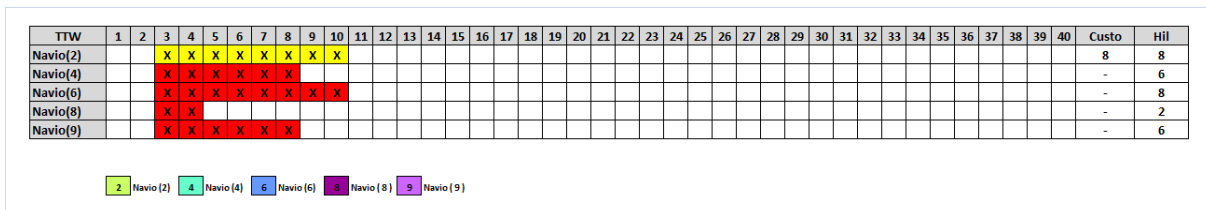


Figura 54 – Resultado da aplicação da heurística LNS no berço 1 para os navios: 2, 4, 6, 8 e 9.

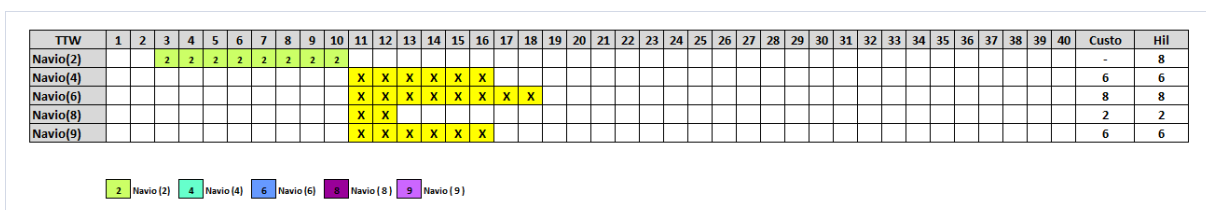


Figura 55 – Resultado da aplicação da heurística LNS no berço 1 para os navios: 4, 6, 8 e 9.

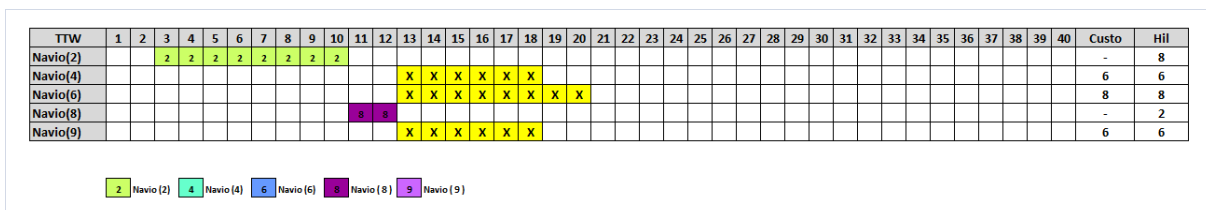


Figura 56 – Resultado da aplicação da heurística LNS no berço 1 para os navios: 4, 6 e 9.

Nas Figuras 59 e 60 são apresentado o resumo da aplicação da heurística refinamento LNS no berço para os berços 1 e 2.

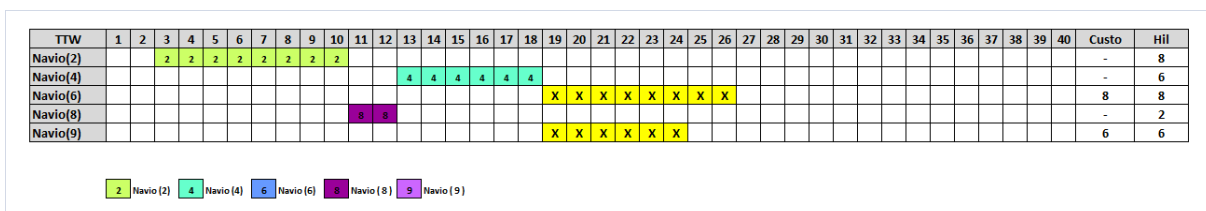


Figura 57 – Resultado da aplicação da heurística LNS no berço 1 para os navios: 6 e 9.

TTW	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	Custo	Hil
Navio(2)			2	2	2	2	2	2	2	2																														-	8	
Navio(4)													4	4	4	4	4	4																							-	6
Navio(6)																			X	X	X	X	X	X	X	X															8	8
Navio(8)											8	8																												-	2	
Navio(9)																			X	X	X	X	X	X	X															6	6	

2

 Navio (2)

4

 Navio (4)

6

 Navio (6)

8

 Navio (8)

9

 Navio (9)

Figura 58 – Resultado da aplicação da heurística LNS no berço 1 para o navio 9.

TTW	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	Custo	Hil	
Navio(1)		1	1																																						-	2	
Navio(3)				3	3	3																																				-	3
Navio(5)							5	5	5	5	5	5																														-	6
Navio(7)													7	7																												-	2
Navio(10)															10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10															-	12

1

 Navio (1)

3

 Navio (3)

5

 Navio (5)

7

 Navio (7)

10

 Navio (10)

Figura 59 – Resultado da aplicação da heurística LNS no berço 1.

TTW	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	Custo	Hil
Navio(2)			2	2	2	2	2	2	2	2																														-	8	
Navio(4)													4	4	4	4	4	4																							-	6
Navio(6)																									6	6	6	6	6	6	6	6	6								-	8
Navio(8)											8	8																													-	2
Navio(9)																				9	9	9	9	9	9																-	6

2

 Navio [2] 

4

 Navio [4] 

6

 Navio [6] 

8

 Navio [8] 

9

 Navio [9]

Figura 60 – Resultado da aplicação da heurística LNS no berço 2.

#### 4.10.1.4 Resumo do Exemplo

Na Tabela 14 é apresentado um Resumo do exemplo do Modelo na formulação Compacta proposta por Barros (2010), Formulação Compacta Estendida e Formulação Compacta Estendida Relaxada - Refinamento da solução pela heurística proposta e Heurística PAB-HE e na Tabela 15 a seguir apresenta a melhor solução inteira encontrada e detalhamento da variável decisão  $y_{ijl}$ .

Tabela 14 – Resumo do Modelo na formulação Compacta proposta por [Barros \(2010\)](#),  
Formulação Compacta Estendida e Formulação Compacta Estendida Relaxada  
- Refinamento da solução pela heurística proposta e Heurística PAB-HE

Modelo	LB	FO	$GAP_1$	Tempo (sec)
Formulação Compacta <a href="#">Barros (2010)</a>	95,6851	98	2,36	19,2400
Formulação Compacta Estendida	95,7536	98	2,29	18,5200
Formulação Compacta Estendida Relaxada - HE	95,7536	102	6,12	0,3601
Heurística PAB-HE	95,7536	102	6,12	0,0002

Tabela 15 – Resumo da variável de decisão  $y_{ijl}$  sobre custo (Tempo de Serviço) após aplicação dos método heurístico proposto para resolver o PAB

Variável decisão $y_{ijl}$	Valor da variável	$\lceil \frac{j-a_i+1}{h_{il}} \rceil$ e/ou Custo
$y_{ijl} [1][2][1]$	1	1
$y_{ijl} [1][3][1]$	1	1
$y_{ijl} [2][3][2]$	1	1
$y_{ijl} [2][4][2]$	1	1
$y_{ijl} [2][5][2]$	1	1
$y_{ijl} [2][6][2]$	1	1
$y_{ijl} [2][7][2]$	1	1
$y_{ijl} [2][8][2]$	1	1
$y_{ijl} [2][9][2]$	1	1
$y_{ijl} [2][10][2]$	1	1
$y_{ijl} [3][4][1]$	1	1
$y_{ijl} [3][5][1]$	1	1
$y_{ijl} [3][6][1]$	1	1
$y_{ijl} [4][13][2]$	1	2
$y_{ijl} [4][14][2]$	1	2
$y_{ijl} [4][15][2]$	1	2
$y_{ijl} [4][16][2]$	1	2
$y_{ijl} [4][17][2]$	1	3
$y_{ijl} [4][18][2]$	1	3
$y_{ijl} [5][7][1]$	1	1
$y_{ijl} [5][8][1]$	1	1
$y_{ijl} [5][9][1]$	1	1
$y_{ijl} [5][10][1]$	1	1
$y_{ijl} [5][11][1]$	1	1
$y_{ijl} [5][12][1]$	1	2
$y_{ijl} [6][25][2]$	1	3
$y_{ijl} [6][26][2]$	1	3
$y_{ijl} [6][27][2]$	1	3
$y_{ijl} [6][28][2]$	1	3
$y_{ijl} [6][29][2]$	1	3
$y_{ijl} [6][30][2]$	1	3
$y_{ijl} [6][31][2]$	1	4
$y_{ijl} [6][32][2]$	1	4
$y_{ijl} [7][13][1]$	1	3
$y_{ijl} [7][14][1]$	1	4
$y_{ijl} [8][11][2]$	1	2
$y_{ijl} [8][12][2]$	1	2
$y_{ijl} [9][19][2]$	1	2
$y_{ijl} [9][20][2]$	1	2
$y_{ijl} [9][21][2]$	1	2
$y_{ijl} [9][22][2]$	1	3
$y_{ijl} [9][23][2]$	1	3
$y_{ijl} [9][24][2]$	1	3
$y_{ijl} [10][15][1]$	1	1
$y_{ijl} [10][16][1]$	1	1
$y_{ijl} [10][17][1]$	1	1
$y_{ijl} [10][18][1]$	1	1
$y_{ijl} [10][19][1]$	1	1
$y_{ijl} [10][20][1]$	1	1
$y_{ijl} [10][21][1]$	1	1
$y_{ijl} [10][22][1]$	1	1
$y_{ijl} [10][23][1]$	1	2
$y_{ijl} [10][24][1]$	1	2
$y_{ijl} [10][25][1]$	1	2
$y_{ijl} [10][26][1]$	1	2
Função Objetivo		102

# Capítulo 5

## Resultados Computacionais

Neste capítulo serão discutidos os experimentos computacionais realizados utilizando os modelos matemáticos e as abordagens de solução apresentados anteriormente.

### 5.1 Gerador de Instâncias

Na Tabela 16 é apresentada a classificação dos navios graneleiros. A coluna item representa o identificador da classe, a coluna classe representa a denominação da classe da embarcação, a coluna capacidade representa a faixa de carga e a coluna DWT (*metric tons deadweight*) representa a capacidade máxima de carga da classe de acordo com [Motorship \(2020\)](#).

Tabela 16 – Tabela de Classificação de Navios Graneleiros

Item	Classe	Capacidade	DWT
1	Smallsize	0-10.000	10.000
2	Handysize	10.000-35.000	35.000
3	Handymax / Supramax	35.000-55.000	55.000
4	Panamax	55.000-80.000	80.000
5	Capesize	80.000-200.000	200.000
6	Very Large Bulk Carrier-VLBC	200.000-300.000	300.000
7	Very Large Ore Carrier-VLOC	300.000-400.000	400.000

Fonte : *Propulsion trends in bulk carriers* [Motorship \(2020\)](#)

Para validar e realizar testes com os modelos matemáticos propostos foram gerados 2 conjuntos instâncias conforme as Tabelas 17 e 18, com base em dados reais envolvendo a classe de navios graneleiros *Handymax / Supramax*, *Panamax*, *Capesize*, *Very Large Bulk Carrier - VLBC* e *Very Large Ore Carrier - VLOC*, com capacidade de máxima carga de 55.000, 80.000, 200.000, 300.000 e 400.000 DWT respectivamente.

Conforme dados da [Vale \(2020\)](#), um complexo portuário possui uma capacidade (velocidade) de operações de embarque e desembarque de 8.300 toneladas/hora em média de cada

berço e que garantem um rendimento diário de 200.000 toneladas de minério, sendo que os valores foram dividido por 1.000 para facilitar a visualização. Neste estudo reduzimos a capacidade (velocidade) máxima de cada berço a 100.000 toneladas dia com intuito de atender navios graneleiros com capacidade de carga na faixa de 55.000 a 400.000 toneladas e como consequência temos uma maior dificuldade para encontrar uma solução para problema.

As operações portuárias é realizado para um horizonte tempo discretizado em janelas *TTW's*. Para considerar os efeitos da maré, as janelas *TTW's* devem possuir um tempo inferior à 12 horas. Nota-se, com isso, que existe no processo de carregamento uma diferença significativa entre a capacidade real e nominal de cada berço, e que os mesmos não apresentam um comportamento homogêneo em função das características logísticas de cada berço e que não é objeto do nosso estudo. Onde cada berço *i* possui capacidade de movimentação de carga máxima de cerca de 55.000 toneladas por janela *TTW's*. Diante disso, optou-se por fazermos uma pequena penalidade de 25% e 50% na capacidade de carga por janela *TTW* para gerar a velocidade mínima de cada berço. A título de exemplo temos: Um berço com penalidade de 25%, sua velocidade de operações (capacidade carregamento) pode variar na faixa de 41.250 à 55.000 toneladas por janela *TTW*. Os navios *i* e velocidade de cada berço *i* são gerados de forma aleatória, baseado numa implementação de uma versão modificado do algoritmo de gerador de números aleatórios subtrativos de Knuth, Bibby e Makai (1986), correspondendo as instâncias em possíveis cenário reais.

O pseudocódigo apresentado no Algoritmo 8, descreve o método de calculo do *TTW* (*M*), onde *M* representa a quantidade de janela *TTW's* necessária para os navios *i* concluir as operações de carga e/ou descarga no horizonte de planejamento considerado.

Todos os experimentos foram realizados em uma máquina dotada de um processador Intel Core i7-7700 K CPU 4.2 GHZ, *virtual Oracle VM VirtualBox* com sistema operacional secundário Linux - Ubuntu versão de 64 Bits 20.04 LTS e 4GB de memória RAM.

As heurísticas foram implementadas utilizando a linguagem de programação C++ e utilizado o *solver CPLEX®* na versão 12.63. A formulação compacta Barros (2010), formulação compacta estendida proposta, formulação compacta estendida relaxada e método heurístico proposto avaliados foram executado 10 vezes para cada instância das Tabelas 17 e 18 e foi estabelecido um limite de tempo computacional de 2 horas (7.200 segundos).

Antes de iniciar as análises vale mencionar que os algoritmos heurísticos são métodos que não garantem encontrar a solução ótima de um problema, mas são capazes de retornar uma solução de qualidade em um tempo adequado para as necessidades da aplicação.

Nas Tabelas 17 e 18 a seguir é apresentado o conjunto de 20 instâncias. A coluna # representa o campo chave da instância, a coluna Navios(N) representa a quantidade de navios, a coluna *TTW* (M) representa a quantidade de janelas *TTW*, a coluna Berços(L) representa a quantidade de berços, a coluna Matéria-prima(K) representa a cardinalidade do conjunto de matérias-prima e a coluna Velocidade do berço(VL) representa velocidade de operações de carga e descarga de cada berço com seus respectivos de valores.

Tabela 17 – Detalhes do conjunto de instâncias com penalidade de 25%.

#	Navios (N)	TTW (M)	Berços (L)	Matéria-prima (K)	Velocidade do berço (VL)]
1	10	40	2	1	52,51
2	10	30	3	2	47,54,48
3	10	43	5	1	42,48,43,46,52
4	10	40	6	2	47,42,45,48,47,53
5	20	80	2	1	48,51
6	20	80	3	2	45,43,54
7	20	71	5	1	47,52,54,48,50
8	20	94	6	2	45,47,52,43,44,52
9	30	117	2	1	42,52
10	30	113	3	2	42,48,45
11	30	114	5	1	53,49,52,43,42
12	30	102	6	2	51,42,45,46,47,44
13	50	206	2	1	49,47
14	50	157	3	2	47,45,46
15	50	201	5	1	44,43,51,43,45
16	50	158	6	2	48,45,43,53,49,50
17	80	295	2	1	52,45
18	80	316	3	2	43,45,52
19	80	312	5	1	42,44,53,48,42
20	80	323	6	2	44,51,46,44,47,51



Tabela 18 – Detalhes do conjunto de instâncias com penalidade de 50%.

#	Navios (N)	TTW (M)	Berços (L)	Matéria-prima (K)	Velocidade do berço (VL)]
1	10	40	2	1	36,52
2	10	47	3	2	28,36,49
3	10	48	5	1	48,39,30,29,46
4	10	30	6	2	46,42,28,53,49,39
5	20	79	2	1	45,37
6	20	97	3	2	46,50,29
7	20	86	5	1	42,47,44,53,36
8	20	68	6	2	49,42,40,53,45,43
9	30	135	2	1	37,41
10	30	95	3	2	44,30,39
11	30	115	5	1	37,50,42,33,49
12	30	108	6	2	32,50,38,30,38,42
13	50	206	2	1	31,30
14	50	157	3	2	38,51,29
15	50	178	5	1	48,51,39,35,39
16	50	163	6	2	49,44,48,54,30,37
17	80	275	2	1	45,46
18	80	303	3	2	39,51,29
19	80	363	5	1	35,39,38,50,32
20	80	286	6	2	53,35,29,47,54,30

## 5.2 Resultados Computacionais

Nas Tabelas 19 e 20 são apresentados os resultados alcançados pelo *solver* CPLEX®, para instâncias com velocidade do berço-VL com penalidade de 25% e 50% para a formulação compacta Barros (2010), formulação compacta estendida proposta, formulação compacta estendida relaxada e método heurístico proposto. A coluna # representa a chave da instância conforme as Tabelas 17 e 18.

Para formulação compacta Barros (2010), a coluna  $LB_1$  *Lower Bound* (LB) fornece o limite inferior, a coluna  $F_{OBJ1}$  (função objetivo) indicam os valores das soluções obtidos, a coluna  $GAP_1$  fornece o GAP entre o limite superior e inferior obtidos e coluna  $Tempo_1$  fornece os tempos computacionais decorridos expressos em segundos.

Para formulação compacta estendida proposta, a coluna  $LB_2$  fornece o limite inferior, a coluna  $F_{OBJ2}$  (função objetivo) indicam os valores das soluções obtidos, a coluna  $GAP_2$  fornece o GAP entre o limite superior e inferior obtidos e coluna  $Tempo_2$  fornece os tempos computacionais decorridos, expressos em segundos.

Para formulação compacta estendida relaxada com refinamento da solução pela método heurístico proposto, a coluna  $LB_3$  fornece o limite inferior, a coluna  $F_{OBJ3}$  (função objetivo) indicam os valores das soluções obtidos, a coluna  $GAP_3$  fornece o GAP entre o limite

superior dado por  $GAP_3 = ((Fo_{UB3} - LB_3) / Fo_{UB3}) \times 100$  e inferior obtidos pelo *solver CPLEX®*, a coluna  $LB_4$  fornece o limite inferior alcançados pela formulação compacta estendida, a coluna  $Fo_{UB4}$  (função objetivo) indicam os valores das soluções obtidos pelo refinamento da solução relaxada, a coluna  $GAP_4$  fornece o GAP entre o limite superior e inferior obtidos e coluna  $Tempo_4$  fornece os tempos computacionais decorridos expressos em segundos.

E por fim, para o método heurístico PAB-HE, a coluna Sol.Ini. fornece solução inicial inteira baseada no método FIFO e coluna  $Tempo_5$  fornece os tempos computacionais decorridos, expressos em segundos para gerar a solução inicial. A coluna  $LB_6$  fornece o limite inferior obtido pela formulação compacta estendida proposta encontrado pelo *solver CPLEX®*, coluna  $Fo_{UB6}$  fornece o valor da melhor solução inteira encontrada pela heurística PAB-HE, a coluna  $GAP_6$  fornece o GAP relativo entre o limite inferior da formulação estendida obtido pelo *solver CPLEX®* e heurística proposta PAB-HE dado por  $GAP_6 = ((Fo_{UB6} - LB_6) / Fo_{UB6}) \times 100$  e coluna  $Tempo_6$  fornece os tempos computacionais decorridos expressos em segundos.

Tabela 19 – Resultados obtidos para instâncias com velocidade do berço-VL com penalidade de 25%.

#	Formulação Compacta Barros (2010)				Formulação Compacta Estendida				Formulação Compacta Estendida Relaxada								Heurística					
	$LB_1$	$F_{OU\ B1}$	$GAP_1$	$Tempo_1$	$LB_2$	$F_{OU\ B2}$	$GAP_2$	$Tempo_2$	$LB_3$	$F_{OU\ B3}$	$GAP_3$	$LB_4$	$F_{OU\ B4}$	$GAP_4$	$Tempo_4$	Sol.Ini.	$Tempo_5$	$LB_6$	$F_{OU\ B6}$	$GAP_6$	$Tempo_6$	
1	79,6136	81	1,71	5,6800	79,4000	81	1,98	5,3800	72,1111	72,3803	0,37	79,4000	81	1,98	0,7001	92	0,0001	79,4000	84	5,48	0,0002	
2	45,1374	47	3,96	8,5000	45,9412	47	2,25	6,6100	43,0000	45,0000	4,44	45,9412	48	4,2900	4,1902	51	0,0001	45,9412	51	9,92	0,0002	
3	49,0000	60	17,50	7.200,0000	59,0000	60	1,67	1.044,7500	59,0000	60,0000	1,67	59,0000	60	1,67	258,2136	62	0,0001	59,0000	61	3,28	0,0037	
4	50,0000	51	1,96	3.272,7100	50,0000	51	1,96	1.673,9100	50,0000	51,0000	1,96	50,0000	51	1,96	84,6750	52	0,0001	50,0000	52	3,85	0,0174	
5	250,9609	269	6,71	7.200,0000	256,2254	269	4,75	6.021,6700	246,9727	247,1924	0,09	256,2254	273	6,14	4,3505	370	0,0001	256,2254	276	7,16	0,0008	
6	161,2119	184	12,38	7.200,0000	151,7704	185	17,96	7.200,0000	104,0000	162,0000	35,80	151,7704	189	19,70	7.200,0054	218	0,0001	151,7704	188	19,27	0,0034	
7	31,2545	85	63,24	7.200,0000	34,0000	85	60,00	7.200,0000	84,7874	85,0000	0,25	34,0000	85	60,00	250,8656	86	0,0001	34,0000	85	60,00	0,0165	
8	17,3333	123	85,91	7.200,0000	17,0000	122	86,07	7.200,0000	113,7004	118,0000	3,64	17,0000	109	84,40	7.200,2065	122	0,0001	17,0000	122	86,07	0,0930	
9	395,4806	573	30,98	7.200,0000	487,3526	554	12,03	7.200,0000	259,0000	494,0802	47,58	487,3526	540	9,75	7.200,0040	778	0,0001	487,3526	555	12,19	0,0025	
10	150,9208	344	56,13	7.200,0000	179,5714	348	48,40	7.200,0000	255,7813	283,7980	9,87	179,5714	322	44,23	7.200,0134	427	0,0001	179,5714	329	45,42	0,0099	
11	18,0000	168	89,29	7.200,0000	15,5000	167	90,72	7.200,0000	136,5742	151,0000	9,55	15,5000	156	90,06	7.200,1005	170	0,0001	15,5000	167	90,72	0,0661	
12	24,3636	132	81,54	7.200,0000	13,0000	135	90,37	7.200,0000	-	-	-	13,0000	-	-	-	135	0,0001	13,0000	135	90,37	0,2562	
13	1.172,7737	2.120	44,68	7.200,0000	1.194,4977	2.785	57,11	7.200,0000	146,0000	1.595,0456	90,85	1.194,4977	1.728	30,87	7.200,0048	2.555	0,0001	1.194,4977	1.719	30,51	0,0110	
14	16,8000	513	96,73	7.200,0000	53,0000	561	90,55	7.200,0000	407,0788	428,2812	4,95	53,0000	476	88,87	7.200,0465	676	0,0005	53,0000	502	89,44	0,0692	
15	15,0000	514	97,08	7.200,0000	8,0000	711	98,87	7.200,0000	200,5261	314,3871	36,22	8,0000	336	97,62	7.200,4758	342	0,0002	8,0000	332	97,59	0,5814	
16	6,0000	212	97,17	7.200,0000	3,0000	254	98,82	7.200,0000	-	-	-	3,0000	-	-	-	202	0,0002	3,0000	202	98,51	1,1027	
17	138,6408	3.407	95,93	7.200,0000	-	-	-	-	2.411,1014	2.412,3048	0,05	-	2.594	-	7.200,0363	4.094	0,0002	-	2.646	-	0,0687	
18	-	-	-	-	-	-	-	-	829,2214	1.480,2943	43,98	-	1.631	-	7.200,1346	2.389	0,0003	-	1.659	-	0,2278	
19	9,0000	4.916	99,82	7.200,0000	-	-	-	-	279,7558	524,3551	46,65	-	582	-	7.202,3237	602	0,0005	-	561	-	5,1860	
20	2,0000	3.011	99,93	7.200,0000	6,0000	6.578	99,91	7.200,0000	260,8507	425,0063	38,62	6,0000	423	98,58	7.210,0661	422	0,0005	6,0000	418	98,56	11,1501	

<sup>(\*)</sup> refere-se instâncias em que o solver não conseguiu obter uma solução para o problema integrado por falta de memória.

Tabela 20 – Resultados obtidos para instâncias com velocidade do berço-VL com penalidade de 50%.

#	Formulação Compacta Barros (2010)				Formulação Compacta Estendida				Formulação Compacta Estendida Relaxada								Heurística				
	$LB_1$	$FoUB_1$	$GAP_1$	$Tempo_1$	$LB_2$	$FoUB_2$	$GAP_2$	$Tempo_2$	$LB_3$	$FoUB_3$	$GAP_3$	$LB_4$	$FoUB_4$	$GAP_4$	$Tempo_4$	Sol.Ini.	$Tempo_5$	$LB_6$	$FoUB_6$	$GAP_6$	$Tempo_6$
1	95,6851	98	2,36	19,2400	95,7536	98	2,29	20,9900	85,9568	88,0000	2,32	95,7536	102	6,12	0,3601	109	0,0001	95,7536	102	6,12	0,0002
2	98,9004	101	2,08	127,5300	99,4000	101	1,58	84,6400	95,0000	95,0000	0,00	99,4000	103	3,50	8,2702	111	0,0001	99,4000	107	7,10	0,0003
3	76,5000	78	1,92	3.520,8600	55,0000	78	29,49	7.200,0000	77,2000	78,0000	1,03	55,0000	78	29,49	51,8540	82	0,0001	55,0000	82	32,93	0,0031
4	37,5899	41	8,32	14,4900	41,0000	41	0,00	17,9100	40,2500	41,0000	1,83	41,0000	41	0,00	262,8838	42	0,0001	41,0000	42	2,38	0,0143
5	293,7141	321	8,50	7.200,0000	300,1957	322	6,77	7.200,0000	291,1847	292,0000	0,28	300,1957	322	6,77	575,0811	407	0,0001	300,1957	325	7,63	0,0007
6	134,6135	287	53,10	7.200,0000	197,3752	280	29,51	7.200,0000	252,6427	253,0556	0,16	197,3752	241	18,10	1.660,0862	315	0,0001	197,3752	291	32,17	0,0025
7	20,0000	152	86,84	7.200,0000	28,0000	159	82,39	7.200,0000	102,6468	130,1821	21,15	28,0000	138	79,71	7.200,0000	152	0,0001	28,0000	142	80,28	0,0856
8	18,5000	88	78,90	7.200,0000	39,0000	88	55,68	7.200,0000	87,9776	88,0000	0,03	39,0000	88	55,68	1.153,3674	90	0,0001	39,0000	90	56,67	0,1229
9	787,3819	1.020	22,81	7.200,0000	786,8123	1.019	22,78	7.200,0000	390,1253	833,2368	53,18	786,8123	901	12,67	7.200,0043	1.273	0,0001	786,8123	923	14,75	0,0018
10	138,6449	306	54,69	7.200,0000	190,3677	363	47,56	7.200,0000	220,9862	263,2912	16,07	190,3677	293	35,03	7.200,0136	380	0,0001	190,3677	314	39,37	0,0069
11	16,0000	216	92,59	7.200,0000	14,0000	249	94,38	7.200,0000	154,6485	179,1481	13,80	14,0000	195	92,82	7.200,0760	211	0,0001	14,0000	197	92,89	0,1100
12	14,0000	167	91,62	7.200,0000	11,0000	164	93,29	7.200,0000	-	-	-	11,0000	-	-	-	171	0,0001	11,0000	170	93,53	0,3918
13	2170,2842	3.633	40,26	7.200,0000	-	-	-	-	215,0000	2.374,0833	90,94	-	2.566	-	7.200,0145	4.091	0,0001	-	2.551	-	0,0153
14	114,7258	695	83,49	7.200,0000	190,2876	814	76,62	7.200,0000	368,3868	524,1037	29,71	190,2876	583	67,36	7.200,0247	937	0,0001	190,2876	610	68,81	0,0535
15	4,0000	639	99,37	7.200,0000	17,0000	417	95,92	7.200,0000	-	-	-	17,0000	-	-	-	322	0,0001	17,0000	310	94,52	0,8821
16	7,8000	258	96,98	7.200,0000	4,0000	291	98,63	7.200,0000	-	-	-	4,0000	-	-	-	256	0,0002	4,0000	244	98,36	2,2672
17	445,1709	4.705	90,54	7.200,0000	-	-	-	-	2.475,0000	2.585,0000	4,26	-	2.701	-	835,2970	4.464	0,0002	-	2.703	-	0,0945
18	-	-	-	-	-	-	-	-	1.316,7595	1.844,0559	28,59	-	1.986	-	7.200,1380	3.238	0,0003	-	2.049	-	0,3617
19	12,0000	5.779	99,79	7.200,0000	6,0000	9.184	99,93	7.200,0000	32,4968	1.267,2128	71,39	6,0000	1.337	99,55	7.205,3592	1.687	0,0005	6,0000	1.327	99,55	8,2972
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	460	0,0005	-	432	-	19,4321

<sup>(c)</sup> refere-se instâncias em que o solver não conseguiu obter uma solução para o problema integrado por falta de memória.

As colunas  $Gap_1$ ,  $Gap_2$  e  $Gap_4$  nas Tabelas 19 e 20, apresentam valores que validam o comportamento da formulação compacta (BARROS, 2010), formulação compacta estendida proposta, formulação compacta estendida relaxada. Onde nota-se que o *solver CPLEX®* só consegue resolver instâncias de até 10 navios dentro do limite de 2 horas. Percebe-se também o comportamento muito satisfatório para método heurístico proposto (PAB-HE) para todas as instâncias.

Os resultados apresentados nas Tabelas 19 e 20 na coluna  $F_{OUB1}$  mostram que o *solver CPLEX®* pode produzir resultados para apenas certas instâncias de pequeno porte. Para a Tabela 19 temos apenas 15% das instâncias (1, 2 e 4) da Tabela 17 e na Tabela 20 temos apenas 20% das instâncias (1 à 4) da Tabela 18 para formulação compacta Barros (2010).

Na Tabela 19 na coluna  $F_{OUB2}$  mostram que a formulação compacta estendida proposta pode produzir resultados para apenas 25% das instâncias (1 à 5) da Tabela 17 e na Tabela 20 na coluna  $F_{OUB2}$  mostram que a formulação compacta estendida proposta pode produzir resultados para apenas 15% das instâncias (1 à 2 e 4) da Tabela 18. E ainda na Tabela 19 na coluna  $F_{OUB4}$  mostram que a formulação compacta estendida relaxada pode produzir resultados apenas 30% das instâncias (1 à 5 e 7) da Tabela 17 e na Tabela 20 para 40% das instâncias (1 à 6, 8 e 17) da Tabela 18. Esses resultados foram alcançados dentro do limite de tempo computacional estabelecido de 7.200 segundos. Sendo que, nenhuma dessas instâncias foram solucionadas otimamente. Nas demais instâncias das Tabelas 19 e 20, o *solver CPLEX®* não conseguiu produzir nenhum resultado significativo.

Em relação aos tempos computacionais, o aumento na quantidade de navios manipulados, janelas  $TTW$ 's para alocar os navios e número de berços, tornam o problema integrado ainda mais complexo e consequentemente requerem mais tempo e memória para obter as soluções. Uma explicação para este comportamento está relacionada à necessidade de alocar mais janelas  $TTW$ 's para alocar os navios e dentre outras mais explicações. No ponto de vista da formulação matemática, o número de restrições e variáveis aumentam da mesma proporção que crescem os parâmetros, tornando assim a solução do PMLR mais difícil.

A coluna  $F_{OUB6}$  das Tabelas 19 e 20 mostram que o método heurístico PAB-HE conseguiu obter limites superiores para todas as instâncias das Tabelas 17 e 18. O *solver CPLEX®* conseguiu encontrar resultados (limite inferior) dentro do limite de tempo estabelecido de 7.200 segundos para formulação estendida proposta em 25% das instâncias (1 à 5) da Tabela 17 conforme mostram a coluna  $Tempo_2$  na Tabela 19 e em 15% das instâncias (1 à 2, 4) da Tabela 18 conforme mostram a coluna  $Tempo_2$  na Tabela 20. Por outro lado, não podemos afirmar que a baixa qualidade das soluções geradas pela heurística PAB-HE para as demais instâncias das 17 e 18 Tabelas conforme mostram as Tabelas 19 e 20, pois o *solver CPLEX®* não conseguiu encontrar resultados (limite inferior) dentro do limite de

tempo estabelecido de 7.200 segundos para formulação estendida proposta.

Os resultados das Tabelas 19 e 20 na coluna  $Tempo_5$  mostram que o heurística PAB-HE conseguiu produzir tempo inferior 0,0005 segundos para 100% das instâncias das Tabelas 17 e 18 para gerar a solução inicial inteira.

A Tabela 19 mostram que a heurística PAB-HE conseguiu produzir função objetivo coluna ( $F_{OUB6}$ ) melhor em relação solução inicial inteira coluna (Sol.Ini) em 75% das instâncias (1, 3, 5 à 7, 9 à 11, 13 à 15 e 17 à 20) da Tabela 17 e o GAP mais expressivo é 54,72% para a instância 17. E para a Tabela 20 mostram que a heurística PAB-HE conseguiu produzir  $F_{OUB6}$  (função objetivo) melhor em relação solução inicial inteira (coluna Sol.Ini) em 85% das instâncias (1 à 2, 5 à 7 e 9 à 20) da Tabela 18 e o GAP mais expressivo é 65,14% para a instância 17 em relação a solução inicial.

Ainda na Tabela 19 nas colunas  $F_{OUB4}$  e  $F_{OUB6}$  mostram que em 60% das instâncias (1 à 5, 8 à 11, 14, 17 à 18) da Tabela 17, a heurística PAB-HE não foi capaz de obter limites superiores de qualidade e nos casos em que foram encontrada soluções, os resultados foram superiores aos apresentados pela formulação compacta estendida relaxada com destaque para a instância 8 que apresentam um GAP de 10,66%. E para 25% das instâncias (6, 13, 15, 19 à 20) da Tabela 17, a heurística PAB-HE foi capaz de obter limites superiores de qualidade destaque para a instância 19 que apresentam um GAP de 3,74%. Já para 5% das instâncias ( 7 ) da Tabela 17 foi encontrado o mesmo limite superior. E por fim, em 10% das instâncias (12 e 16) da Tabela 17, na formulação estendida relaxada o *solver CPLEX®* não conseguiu produzir nenhum resultado significativo devido à memória insuficiente.

E na Tabela 20 nas colunas  $F_{OUB4}$  e  $F_{OUB6}$  mostram que em 65% das instâncias (2 à 11, 14, 17 à 18) da Tabela 18, a heurística PAB-HE não foi capaz de obter limites superiores de qualidade e nos casos em que foram encontrada soluções, os resultados foram superiores aos apresentados pela formulação compacta estendida relaxada com destaque para a instância ( 6 ) da Tabela 18 que apresentam um GAP de 17,18%. E em 10% das instâncias (13 e 19) da Tabela 18, a heurística PAB-HE foi capaz de obter limites superiores de qualidade destaque para a instância 19 que apresentam um GAP de 0,75%. Já para 5% das instâncias ( 1 ) da Tabela 18 foi encontrado o mesmo limite superior. E por fim, em 20% das instâncias (12, 15 à 16 e 20) da Tabela 18, na formulação estendida relaxada o *solver CPLEX®* o *solver CPLEX®* não conseguiu produzir nenhum resultado significativo devido à memória insuficiente.

As Tabelas 21 e 22 apresentam os resultados comparativos da função objetivo da formulação compacta Barros (2010), formulação estendida proposta, formulação estendida relaxada e a heurística PAB-HE para instâncias com variação de velocidade do berço-VL com penalidade de 25% e 50%. A coluna # representa o campo chave da instância conforme as Tabelas 17

e 18. A coluna  $F_{O_{FC}}$  representa a função objetivo que o *solver* CPLEX® conseguiu obter para formulação compacta Barros (2010), a coluna  $F_{O_{FE}}$  representa a função objetivo que o *solver* CPLEX® conseguiu obter para formulação estendida proposta, a coluna  $F_{O_{RE}}$  representa a função objetivo que o *solver* CPLEX® conseguiu obter para formulação estendida relaxada e a coluna  $F_{O_{HE}}$  representa a função objetivo que a heurística PAB-HE conseguiu obter. A coluna  $GAP_1$  fornece o GAP entre a formulação estendida proposta e função objetivo da formulação compacta Barros (2010) dado por  $GAP : GAP_1 = ((F_{O_{FE}} - F_{O_{FC}}) / F_{O_{FE}}) \times 100$ . A coluna  $GAP_2$  fornece o GAP entre a formulação estendida relaxada e função objetivo da formulação compacta Barros (2010) dado por  $GAP : GAP_2 = ((F_{O_{RE}} - F_{O_{FC}}) / F_{O_{RE}}) \times 100$ . A coluna  $GAP_3$  fornece o GAP entre a formulação estendida relaxada e função objetivo da formulação estendida proposta dado por  $GAP : GAP_3 = ((F_{O_{RE}} - F_{O_{FE}}) / F_{O_{RE}}) \times 100$ . A coluna  $GAP_4$  fornece o GAP entre a heurística PAB-HE e função objetivo da formulação compacta Barros (2010) dado por  $GAP : GAP_4 = ((F_{O_{HE}} - F_{O_{FC}}) / F_{O_{HE}}) \times 100$ . A coluna  $GAP_5$  fornece o GAP entre a heurística PAB-HE e função objetivo da formulação estendida proposta dado por  $GAP : GAP_5 = ((F_{O_{HE}} - F_{O_{FE}}) / F_{O_{HE}}) \times 100$ . A coluna  $GAP_6$  fornece o GAP entre a heurística PAB-HE e função objetivo da formulação estendida relaxada dado por  $GAP : GAP_6 = ((F_{O_{HE}} - F_{O_{RE}}) / F_{O_{HE}}) \times 100$ .

Os resultados obtidos pela formulação estendida proposta em relação a formulação compacta Barros (2010) encontrados pelo *solver* CPLEX® apresentado na Tabela 21 na coluna  $GAP_1$ , mostram se mais eficiente em obter limites superiores de qualidade para 15% das instâncias (8, 9 e 11) da Tabela 17, com destaque para a instância 9 que apresentam um GAP de 3,43%. E ainda na coluna  $GAP_1$  pode-se notar que em 30% das instâncias (1 à 5 e 7) da Tabela 17 foram encontrada os mesmos limites superiores. Por outro lado, em 40% das instâncias (6, 10, 12 à 16 e 20) da Tabela 17 a formulação estendida proposta não foi capaz de obter limites superiores de qualidade dentro do limite de tempo computacional de 7.200 segundos, e nos casos em que foram encontrada soluções, os resultados foram superiores aos apresentados pela formulação compacta Barros (2010), com destaque para a instância 20 que apresentam um GAP de 54,23%. E por fim, em 15% das instâncias (17 à 19) da Tabela 17, o *solver* CPLEX® não conseguiu produzir nenhum resultado significativo devido à memória insuficiente.

E para os resultados obtidos pela formulação estendida relaxada com refinamento da solução pelo método heurístico proposto em relação a formulação compacta Barros (2010) encontrado pelo *solver* CPLEX® apresentado na Tabela 21 na coluna  $GAP_2$ , mostram se mais eficiente em obter limites superiores de qualidade para 50% das instâncias (8 à 11, 13 à 15, 17, 19 à 20) da Tabela 17, com destaque para a instância 19 que apresentam um GAP de 744,67%. E ainda na coluna  $GAP_2$  pode-se notar que em 20% das instâncias (1, 3 à 4 e 7) da Tabela 17 foram encontrada os mesmos limites superiores. Por outro lado, em 15% das instâncias (2, 5 à 6) da Tabela 17 a formulação estendida relaxada proposta não

foi capaz de obter limites superiores de qualidade dentro do limite de tempo computacional de 7.200 segundos, e nos casos em que foram encontrada soluções, os resultados foram superiores aos apresentados pela formulação compacta [Barros \(2010\)](#), com destaque para a instância 20 que apresentam um GAP de 2,65%. E por fim, em 15% das instâncias (12, 16 e 18) da Tabela 17, o *solver* CPLEX® não conseguiu produzir nenhum resultado significativo devido à memória insuficiente.

Os resultados obtidos pela formulação estendida relaxada com refinamento da solução pelo método heurístico em relação a formulação estendida proposta encontrado pelo *solver* CPLEX® apresentado na Tabela 21 na coluna  $GAP_3$ , mostram se mais eficiente em obter limites superiores de qualidade para 40% das instâncias (8 à 11, 13 à 15 e 20 ) da Tabela 17, com destaque para a instância 20 que apresentam um GAP de 1.455,08 %. E ainda na coluna  $GAP_3$  pode-se notar que em 20% das instâncias (1, 3 à 4 e 7) da Tabela 17 foram encontrada os mesmos limites superiores. Por outro lado, em 15% das instâncias (2, 5 e 6) da Tabela 17 a formulação estendida relaxada proposta não foi capaz de obter limites superiores de qualidade dentro do limite de tempo computacional de 7.200 segundos, e nos casos em que foram encontrada soluções, os resultados foram superiores aos apresentados pela formulação compacta [Barros \(2010\)](#), com destaque para a instância 6 que apresentam um GAP de 2,12%. E por fim, em 25% das instâncias (12, 16 à 19) da Tabela 17, o *solver* CPLEX® não conseguiu produzir nenhum resultado significativo devido à memória insuficiente.

Para os resultados pela heurística PAB-HE em relação a formulação compacta [Barros \(2010\)](#) encontrado pelo *solver* CPLEX® apresentado na Tabela 21 na coluna  $GAP_4$ , mostram se mais eficiente em obter limites superiores de qualidade para 55% das instâncias (8 à 11, 13 à 17, 19 e 20) da Tabela 17, com destaque para a instância 19 que apresentam um GAP de 776,29%. E ainda na coluna  $GAP_4$  pode-se notar que em 5% das instâncias (7) da Tabela 17 foram encontrada o mesmo limite superior. Por outro lado, em 35% das instâncias (1 à 6 e 12) da Tabela 17 a heurística PAB-HE não foi capaz de obter limites superiores de qualidade e nos casos em que foram encontrada soluções, os resultados foram superiores aos apresentados pela formulação compacta [Barros \(2010\)](#), com destaque para a instância (2) que apresentam um GAP de 7,84%. E por fim, em 5% das instâncias (18) da Tabela 17, o *solver* CPLEX® não conseguiu produzir nenhum resultado significativo devido à memória insuficiente.

Os resultados obtidos do método heurístico PAB-HE em relação a formulação compacta estendida proposta encontrado pelo *solver* CPLEX® apresentado na Tabela 21 na coluna  $GAP_5$ , mostram se mais eficiente em obter limites superiores de qualidade para 30% das instâncias (10, 13 à 16 e 20) da Tabela 17, com destaque para a instância 20 que



apresentam um GAP de 1.473,68%. E ainda na coluna  $GAP_5$  pode-se notar que em 20% das instâncias (7 à 8, 11 à 12) da Tabela 17 foram encontrada os mesmos limites superiores. Por outro lado, em 35% das instâncias (1 à 6 e 9) da Tabela 17 a heurística PAB-HE não foi capaz de obter limites superiores de qualidade e nos casos em que foram encontrada soluções, os resultados foram superiores aos apresentados pela formulação compacta estendida proposta com destaque para a instância 2 que apresentam um GAP de 7,84%. E por fim, em 15% das instâncias (17 à 19) da Tabela 17, o *solver* CPLEX® não conseguiu produzir nenhum resultado significativo devido à memória insuficiente.

E por fim, os resultados obtidos pelo método heurístico PAB-HE em relação a formulação compacta estendida relaxado com refinamento da solução pelo método heurístico proposto encontrado pelo *solver* CPLEX® apresentado na Tabela 21 na coluna  $GAP_6$ , mostram se mais eficiente em obter limites superiores de qualidade para 25% das instâncias (6, 13, 15, 19 à 20) da Tabela 17, com destaque para a instância 19 que apresentam um GAP de 3,74%. E ainda na coluna  $GAP_6$  pode-se notar que em 5% das instâncias (7) da Tabela 17 foram encontrada os mesmos limites superiores. Por outro lado, em 60% das instâncias (1 à 5, 8 à 11, 14, 17 à 18) da Tabela 17 a heurística PAB-HE não foi capaz de obter limites superiores de qualidade e nos casos em que foram encontrada soluções, os resultados foram superiores aos apresentados pela formulação compacta estendida relaxada com destaque para a instância 8 que apresentam um GAP de 10,66%. E por fim, em 10% das instâncias (12 e 16) da Tabela 17, na formulação estendida relaxada o *solver* CPLEX® o *solver* CPLEX® não conseguiu produzir nenhum resultado significativo devido à memória insuficiente.

Tabela 21 – Resultados comparativos da função objetivo da Formulação Compacta Barros (2010), Formulação Compacta Estendida, Formulação Compacta Estendida Relaxada - HE, Heurística PAB-HE para instâncias com variação de velocidade do berço-VL com penalidade de 25%.

#	Função Objetivo FO				Resultados Comparativos - GAP					
	$F_{oFC}$	$F_{oFE}$	$F_{oRE}$	$F_{oHE}$	$GAP_1$	$GAP_2$	$GAP_3$	$GAP_4$	$GAP_5$	$GAP_6$
1	81	81	81	84	0,00	0,00	0,00	3,57	3,57	3,57
2	47	47	48	51	0,00	2,08	2,08	7,84	7,84	5,88
3	60	60	60	61	0,00	0,00	0,00	1,64	1,64	1,64
4	51	51	51	52	0,00	0,00	0,00	1,92	1,92	1,92
5	269	269	273	276	0,00	1,47	1,47	2,54	2,54	1,09
6	184	185	189	188	0,54	2,65	2,12	2,13	1,60	-0,53
7	85	85	85	85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	123	122	109	122	-0,82	-12,84	-11,93	-0,82	0,00	10,66
9	573	554	540	555	-3,43	-6,11	-2,59	-3,24	0,18	2,70
10	344	348	322	329	1,15	-6,83	-8,07	-4,56	-5,78	2,13
11	168	167	156	167	-0,60	-7,69	-7,05	-0,60	0,00	6,59
12	132	135	0	135	2,22	-	-	2,22	0,00	-
13	2.120	2.785	1.728	1.719	23,88	-22,69	-61,17	-23,33	-62,01	-0,52
14	513	561	476	502	8,56	-7,77	-17,86	-2,19	-11,75	5,18
15	514	711	336	332	27,71	-52,98	-111,61	-54,82	-114,16	-1,20
16	212	254	0	202	16,54	-	-	-4,95	-25,74	-
17	3.407	-	2.594	2.646	-	-31,34	-	-28,76	-	1,97
18	-	-	1.631	1.659	-	-	-	-	-	1,69
19	4.916	-	582	561	-	-744,67	-	-776,29	-	-3,74
20	3.011	6.578	423	418	54,23	-611,82	-1.455,08	-620,33	-1.473,68	-1,20

(-) refere-se a instâncias em que o solver não conseguiu obter uma solução para o problema integrado por falta de memória.

Os resultados obtidos pela formulação estendida proposta em relação a formulação compacta Barros (2010) encontrados pelo solver CPLEX® apresentado na Tabela 22 na coluna  $GAP_1$ , mostram se mais eficiente em obter limites superiores de qualidade para 20% das instâncias (6, 9, 12 e 15) da Tabela 18, com destaque para a instância 15 que apresentam um GAP de 53,14%. E ainda na coluna  $GAP_1$  pode-se notar que em 25% das instâncias (1 à 4 e 8) da Tabela 18 foram encontrada os mesmos limites superiores. Por outro lado, em 30% das instâncias (5, 7, 10 à 11, 14 e 16) da Tabela 18 a formulação estendida proposta não foi capaz de obter limites superiores de qualidade dentro do limite de tempo computacional de 7.200 segundos, e nos casos em que foram encontrada soluções, os resultados foram superiores aos apresentados pela formulação compacta Barros (2010), com destaque para a instância 10 que apresentam um GAP de 15,70%. E por fim, em 25% das instâncias (13, 17 à 20) da Tabela 18, o solver CPLEX® não conseguiu produzir nenhum resultado significativo devido à memória insuficiente.

E para os resultados obtidos pela formulação estendida relaxada com refinamento da solução pelo método heurístico proposto em relação a formulação compacta Barros (2010) encontrado pelo solver CPLEX® apresentado na Tabela 22 na coluna  $GAP_2$ , mostram se mais eficiente em obter limites superiores de qualidade para 45% das instâncias (6 à 7, 9 à 11, 13 à 14, 17 e 19) da Tabela 18, com destaque para a instância 19 que apresentam um

GAP de 332,24%. E ainda na coluna  $GAP_2$  pode-se notar que em 15% das instâncias (3 à 4 e 8) da Tabela 18 foram encontrada os mesmos limites superiores. Por outro lado, em 15% das instâncias (1 à 2 e 5) da Tabela 18 a formulação estendida proposta não foi capaz de obter limites superiores de qualidade dentro do limite de tempo computacional de 7.200 segundos, e nos casos em que foram encontrada soluções, os resultados foram superiores aos apresentados pela formulação compacta Barros (2010), com destaque para a instância 1 que apresentam um GAP de 3,92%. E por fim, em 25% das instâncias (12, 15, 16, 18 e 19) da Tabela 18, o *solver* CPLEX® não conseguiu produzir nenhum resultado significativo devido à memória insuficiente.

Os resultados obtidos pela formulação estendida relaxada com refinamento da solução pelo método heurístico em relação a formulação estendida proposta encontrado pelo *solver* CPLEX® apresentado na Tabela 22 na coluna  $GAP_3$ , mostram se mais eficiente em obter limites superiores de qualidade para 30% das instâncias (6 à 7, 9 à 11 e 14) da Tabela 18, com destaque para a instância 14 que apresentam um GAP de 39,62%. E ainda na coluna  $GAP_3$  pode-se notar que em 20% das instâncias (3 à 5 e 8) da Tabela 18 foram encontrada os mesmos limites superiores. Por outro lado, em 10% das instâncias (1 à 2) da Tabela 18 a formulação estendida relaxada proposta não foi capaz de obter limites superiores de qualidade dentro do limite de tempo computacional de 7.200 segundos, e nos casos em que foram encontrada soluções, os resultados foram superiores aos apresentados pela formulação compacta Barros (2010), com destaque para a instância 1 que apresentam um GAP de 3,92%. E por fim, em 40% das instâncias (12 à 13, 15 à 20) da Tabela 18, o *solver* CPLEX® não conseguiu produzir nenhum resultado significativo devido à memória insuficiente.

Para os resultados pela heurística PAB-HE em relação a formulação compacta Barros (2010) encontrado pelo *solver* CPLEX® apresentado na Tabela 22 na coluna  $GAP_4$ , mostram se mais eficiente em obter limites superiores de qualidade para 45% das instâncias (7, 9, 11, 13 à 17 e 19) da Tabela 18, com destaque para a instância 19 que apresentam um GAP de 335,49%. Por outro lado, em 45% das instâncias (1 à 6, 8, 10 e 12) da Tabela 18 a heurística PAB-HE não foi capaz de obter limites superiores de qualidade e nos casos em que foram encontrada soluções, os resultados foram superiores aos apresentados pela formulação compacta Barros (2010), com destaque para a instância (2) que apresentam um GAP de 5,61%. E por fim, em 10% das instâncias (18 e 20) da Tabela 18, o *solver* CPLEX® não conseguiu produzir nenhum resultado significativo devido à memória insuficiente.

Os resultados obtidos do método heurística PAB-HE em relação a formulação compacta estendida proposta encontrado pelo *solver* CPLEX® apresentado na Tabela 22 na coluna  $GAP_5$ , mostram se mais eficiente em obter limites superiores de qualidade para 35% das instâncias (7, 9 à 11 e 14 à 16) da Tabela 18, com destaque para a instância 15 que

apresentam um GAP de 34,52%. Por outro lado, em 40% das instâncias (1 à 6, 8 e 12) da Tabela 18 a heurística PAB-HE não foi capaz de obter limites superiores de qualidade e nos casos em que foram encontrada soluções, os resultados foram superiores aos apresentados pela formulação compacta estendida proposta com destaque para a instância (2) que apresentam um GAP de 5,61%. E por fim, em 25% das instâncias (13, 17 à 20) da Tabela 18, o *solver* CPLEX® não conseguiu produzir nenhum resultado significativo devido à memória insuficiente.

E por fim, os resultados obtidos pelo método heurístico PAB-HE em relação a formulação compacta estendida relaxada com refinamento da solução pelo método heurístico proposto encontrado pelo *solver* CPLEX® apresentado na Tabela 22 na coluna  $GAP_6$ , mostram se mais eficiente em obter limites superiores de qualidade para 10% das instâncias (13 e 19) da Tabela 18, com destaque para a instância 19 que apresentam um GAP de 0,75%. E ainda na coluna  $GAP_6$  pode-se notar que em 5% das instâncias (1) da Tabela 18 foram encontrada os mesmos limites superiores. Por outro lado, em 65% das instâncias (2 à 11, 14, 17 à 18) da Tabela 18 a heurística PAB-HE não foi capaz de obter limites superiores de qualidade e nos casos em que foram encontrada soluções, os resultados foram superiores aos apresentados pela formulação compacta estendida relaxada com destaque para a instância 6 que apresentam um GAP de 17,18%. E por fim, em 20% das instâncias (12, 15 à 16 e 20) da Tabela 18, na formulação estendida relaxada o *solver* CPLEX® o *solver* CPLEX® não conseguiu produzir nenhum resultado significativo devido à memória insuficiente.

Tabela 22 – Resultados comparativos da função objetivo da Formulação Compacta Barros (2010), Formulação Compacta Estendida, Formulação Compacta Estendida Relaxada - HE, Heurística PAB-HE para instâncias com variação de velocidade do berço-VL com penalidade de 50%.

#	Função Objetivo FO				Resultados Comparativos - GAP					
	$F_{OFC}$	$F_{OFE}$	$F_{ORE}$	$F_{OHE}$	$GAP_1$	$GAP_2$	$GAP_3$	$GAP_4$	$GAP_5$	$GAP_6$
1	98	98	102	102	0,00	3,92	3,92	3,92	3,92	0,00
2	101	101	103	107	0,00	1,94	1,94	5,61	5,61	3,74
3	78	78	78	82	0,00	0,00	0,00	4,88	4,88	4,88
4	41	41	41	42	0,00	0,00	0,00	2,38	2,38	2,38
5	321	322	322	325	0,31	0,31	0,00	1,23	0,92	0,92
6	287	280	241	291	-2,50	-19,09	-16,18	1,37	3,78	17,18
7	152	159	138	142	4,40	-10,14	-15,22	-7,04	-11,97	2,82
8	88	88	88	90	0,00	0,00	0,00	2,22	2,22	2,22
9	1.020	1.019	901	923	-0,10	-13,21	-13,10	-10,51	-10,40	2,38
10	306	363	293	314	15,70	-4,44	-23,89	2,55	-15,61	6,69
11	216	249	195	197	13,25	-10,77	-27,69	-9,64	-26,40	1,02
12	167	164	0	170	-1,83	-	-	1,76	3,53	-
13	3.633	-	2.566	2.551	-	-41,58	-	-42,41	-	-0,59
14	695	814	583	610	14,62	-19,21	-39,62	-13,93	-33,44	4,43
15	639	417	-	310	-53,24	-	-	-106,13	-34,52	-
16	258	291	-	244	11,34	-	-	-5,74	-19,26	-
17	4.705	-	2.701	2.703	-	-74,19	-	-74,07	-	0,07
18	-	-	1.986	2.049	-	-	-	-	-	3,07
19	5.779	9.184	1.337	1.327	-	-332,24	-	-335,49	-	-0,75
20	-	-	-	432	-	-	-	-	-	-

<sup>(-)</sup> refere-se instâncias em que o solver não conseguiu obter uma solução para o problema integrado por falta de memória.

Nas Figuras 61 e 62, analisando o comportamento das barras dos gráficos para as instâncias (1 à 12 e 14 à 16) das Tabelas 17 e 18, percebe-se que os valores apontam para boa qualidade dos limites superiores encontrados pela heurística PAB-HE dada a complexidade do problema PAB. Por outro lado, a partir das instâncias (13, e 17 à 20), em razão aumento do número de navios e janela de atracação *TTW's*, houve um crescimento da complexidade do problema. Onde fica evidente que *solver CPLEX®* não conseguir produzir limites superiores de qualidade.

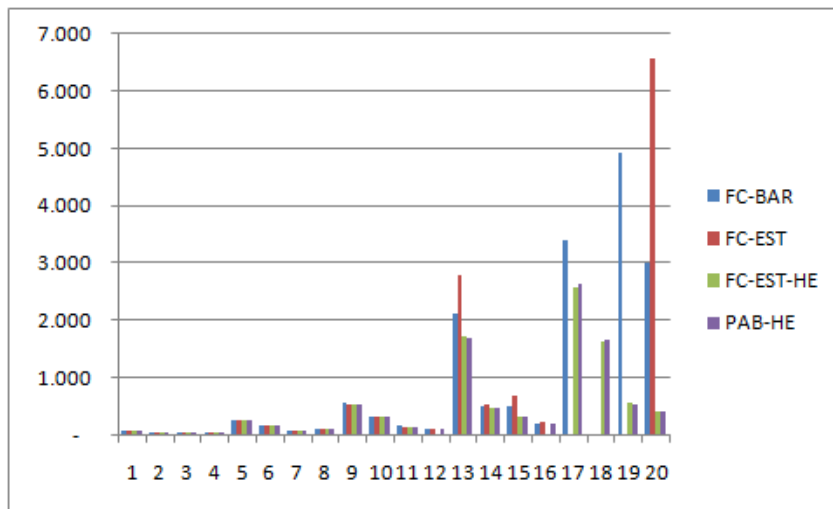


Figura 61 – Comparação da função objetivo Formulação Compacta [Barros \(2010\)](#), Formulação Compacta Estendida, Formulação Compacta Estendida Relaxada - HE, Heurística PAB-HE para instâncias com variação de velocidade do berço-VL com penalidade de 25%.

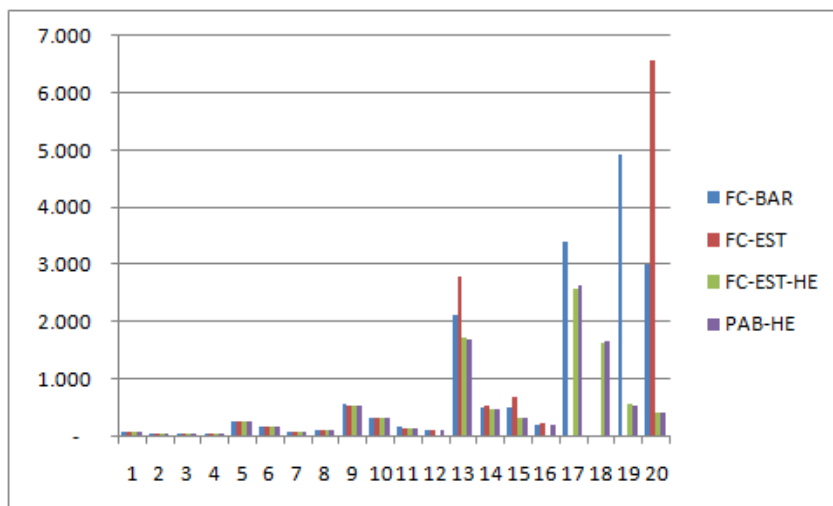


Figura 62 – Comparação da função objetivo Formulação Compacta [Barros \(2010\)](#), Formulação Compacta Estendida, Formulação Compacta Estendida Relaxada - HE, Heurística PAB-HE para instâncias com variação de velocidade do berço-VL com penalidade de 50%.

## Capítulo 6

### Conclusões e Trabalhos futuros

A conclusão da pesquisa e os trabalhos futuros são apresentados neste capítulo. A Seção 6.1 apresenta um sumário do trabalho realizado. A Seção 6.2 discute possíveis linhas de pesquisa para continuar este estudo.

#### 6.1 Conclusão

Nesta dissertação, foi estudado um Problema Alocação de Berços (PAB) para um terminal portuário graneleiro de minério. O PAB representa vários aspectos das operações num terminal portuário: desde a chegada dos navios até a sequência de atracação nos berço. Neste contexto, o estudo busca contribuir com o método para alocar os navios que chegam ao porto de modo a minimizar o tempo espera das embarcações.

A modelagem utilizada para resolver o PAB é um de modelo compacto estendido formulado considerando a formulação proposta por [Barros \(2010\)](#) para resolver PAB em Portos Graneleiro com restrições de estoque e condições de maré.

Para validar e testar a desempenho do modelo e os algoritmos, foram conduzidos diversos experimentos computacionais com diversas instâncias do problema variando: navios, berços, matéria-prima e velocidade dos berços. Como esperado, solucionar ambas formulações matemáticas via solver CPLEX é totalmente inviável, logo justificando o desenvolvimento de abordagens heurística da solução. Vale destacar que para a formulação estendida e estendida relaxada com refinamento da solução relaxada por heurística, o *solver CPLEX®* encontrou dificuldades para resolver até mesmo para as instâncias de menor porte.

As abordagem da solução propostas são ricas em detalhes realistas, mas também é flexível, podendo ser adaptada para diversos terminais portuários exportadores de granéis sólidos (carvão, minério de ferro e grãos) e líquidos (óleo de soja, álcool, petróleo e derivados).

Foram utilizadas os conjuntos de instâncias das Tabelas [17](#) e [18](#), onde cada tabela possui um

conjunto de 20 instâncias cada, adaptada em dados reais. Os resultados apresentados nas Tabelas 19 e 20 demonstram o potencial da abordagem apresentada, na qual soluções de alta qualidade são obtidas para instâncias relativamente grandes e em tempos de execução muito satisfatórios. Portanto, boas soluções propiciam reduções de custos operacionais de carga e/ou descarga, uma vez que há redução do tempo espera em que os navios permanecem no terminal portuário.

## 6.2 Trabalhos Futuros

Os trabalhos futuros podem se concentrar em aprimorar os algoritmos propostos durante o desenvolvimento deste trabalho, foi utilizada a heurística de refinamento LNS para encontrar a sequência dos navios dentro berços e a permutação simples para movimentação entre os berços. Com isso, para pesquisas futuras poderiam investir em outros métodos para gerar a movimentação dos navios entre os berços e métodos para avaliar a melhor sequência atracação dos navios dentro do berço. E ainda, investigar a heurística otimização de colônia de formigas, onde o algoritmo poderá direcionar suas colônias para investigar soluções específicas, ou manter colonias em paralelo investigando todo o espaço objetivo.

## 6.3 Considerações Finais

O presente trabalho abre caminho para que possamos dar continuação nas pesquisas para introdução de melhoria na técnica de refinamento em outras variações do PAB presente na literatura.



# Referências

- AEB, A. C. E. B. **Previsão da Balança Comercial para 2021**. 2021. [Http://aeb.org.br/previsao-da-balanca-comercial-2021/](http://aeb.org.br/previsao-da-balanca-comercial-2021/). Acesso em: 03 de Março de 2021. Citado na página 14.
- ALFREDINI, P.; ARASAKI, E. **Engenharia Portuária**. [S.l.]: Editora Edgard Blücher Ltda, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 14.
- ANTAQ, A. N. T. A. **Setor portuário movimentou 1,151 bilhão de toneladas em 2020**. 2021. <https://www.gov.br/pt-br/noticias/transito-e-transportes/2021/03/setor-portuario-movimentou-1-151-bilhao-de-toneladas-em-2020>. Acesso em: 18 de Março de 2021. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 14.
- BANOS, R. et al. Modelo matemático e meta-heurística simulated annealing para o problema de alocação de berços com múltiplas cargas. **TRANSPORTES**, v. 24, p. 51, 04 2016. Citado 4 vezes nas páginas 7, 8, 9 e 10.
- BARBOSA, F. **O problema de Alocação de Berços: Aspectos Téóricos e Computacionais**. 1 p. Dissertação (Mestrado), 2014. Matemática Aplicada. Disponível em: <[http://repositorio.unicamp.br/jspui/bitstream/REPOSIP/306275/1/Barbosa\\_Flavia\\_M.pdf](http://repositorio.unicamp.br/jspui/bitstream/REPOSIP/306275/1/Barbosa_Flavia_M.pdf)>. Citado na página 1.
- BARROS, V. H. **Problema de Alocação de Berços em Portos Graneleiros com Restrições de Estoque e Condições Favoráveis de Maré**. Dissertação (Mestrado), 2010. Engenharia. Disponível em: <<http://tedebc.ufma.br:8080/jspui/handle/tede/434>>. Citado 25 vezes nas páginas 2, 3, 16, 17, 18, 19, 20, 22, 46, 47, 79, 80, 83, 85, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 94, 95, 97, 98 e 99.
- BIERWIRTH, C.; MEISEL, F. A survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals. **European Journal of Operational Research**, v. 202, n. 3, p. 615–627, 2010. ISSN 0377-2217. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221709003579>>. Citado 3 vezes nas páginas 5, 6 e 9.
- BRASIL, A. **Agência Brasil explica: o que são commodities**. 2021. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2021-05/agencia-brasil-explica-o-que-sao-commodities>>. Acesso em: 14 de Julho 2021. Citado na página 13.
- BRITTO, P. A. P. de et al. Promoção da concorrência no setor portuário: uma análise a partir dos modelos mundiais e aplicação ao caso brasileiro. **SciELO Brasil**, 2014. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rap/a/xRFkFhbFhPwbs7yk6XGqfLH/?lang=pt>>. Citado na página 1.
- BROWN, G.; LAWPHONGPANICH, S.; THURMAN, K. P. Optimizing ship berthing. **Naval Research Logistics**, v. 41, p. 1–15, 1994. Citado na página 10.
- BROWN, G. G. et al. **Optimizing Submarine Berthing with a Persistence Incentive**. Calhoun, 1997. Disponível em: <<https://calhoun.nps.edu/handle/10945/38120>>. Citado na página 10.

BUTIKOV, E. I. A dynamical picture of the oceanic tides. *American Journal of Physics - AMER J PHYS*, v. 70, p. 1001–1011, 2002. Citado na página 18.

CHAVES, A. A. et al. Metaheurísticas híbridas para resolução do problema do caixeiro viajante com coleta de prêmios. **Production**, scielo, v. 17, p. 263 – 272, 08 2007. ISSN 0103-6513. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-65132007000200004&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-65132007000200004&nrm=iso)>. Citado na página 41.

CHEN, C. Y.; HSIEH, T. A time-space network model for the berth allocation problem. **Conference on System Modelling and Optimization**, p. 12–16, 1999. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 12.

CHEONG, C. Y. C. et al. A multi-objective evolutionary algorithm for berth allocation in a container port. In: **2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation**. [S.l.: s.n.], 2007. p. 927–934. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 12.

CHM, C. d. H. d. M. d. B. **Dados Maregráficos e Fluviométricos**. 2021. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/chm/tabuas-de-mare>>. Acesso em: 03 de Março de 2021. Citado na página 17.

CORDEAU, J. F. et al. Models and tabu search heuristics for the berth allocation problem. **Transportation Science**, v. 39, n. 4, p. 525–538, 2005. Citado 7 vezes nas páginas 5, 6, 7, 8, 9, 11 e 12.

CORRECHER, J. F. et al. The berth allocation problem in terminals with irregular layouts. **European Journal of Operational Research**, v. 272, p. 1096–1108, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 9.

CUNHA, A. G.; TAKAHASHI, R.; ANTUNES, C. H. **Manual de Computação Evolutiva e Metaheurística**. [S.l.]: Editora UFMG, 2013. 8 p. ISBN 9788542300468. Citado na página 23.

DAI, J. et al. Berth allocation planning optimization in container terminals. *International Series In Operations Research & Mana*, v. 119, p. 483–504, 2008. Disponível em: <[https://doi.org/10.1007/978-0-387-75240-2\\_4](https://doi.org/10.1007/978-0-387-75240-2_4)>. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 12.

DICIO. **Dicionário Online de Português**. 2021. Disponível em: <<https://www.dicio.com.br/mare/>>. Acesso em: 14 de Julho 2021. Citado na página 16.

DIREITO, D. **Dicionário**. 2021. Disponível em: <<https://dicionariodireito.com.br/demurrage>>. Acesso em: 14 de Julho 2021. Citado na página 16.

FARIA, E. Logística de abastecimento de carvão mineral importado para sistema usiminas. **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, v. 3, p. 12–15, 01 2007. Citado na página 16.

FAZCOMEX. **Calado do Navio: o que é?** 2021. Disponível em: <<https://www.fazcomex.com.br/blog/calado-do-navio-o-que-e/>>. Acesso em: 10 de Julho de 2021. Citado na página 6.

FIORONI, M. M. **Simulação em Ciclo Fechado de Malhas Ferroviárias e suas Aplicações no Brasil: Avaliação de Alternativas para o Direcionamento de Composições**. 14 p. Dissertação (Mestrado), 2008. Politécnica. Disponível em: <[https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3135/tde-03062008-180002/publico/01\\_Texto\\_Principal.PDF](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3135/tde-03062008-180002/publico/01_Texto_Principal.PDF)>. Citado na página 1.

GAO, C. et al. A proactive and reactive framework for berth allocation with uncertainties. 2010. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 10.

GAREY, M. R.; JOHNSON, D. S. **A Guide to the Theory of NP-Completeness**. [S.l.]: San Francisco : W.H. Freeman, 1979. v. 1993. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 10.

GIALLOMBARDO, G. et al. Modeling and solving the tactical berth allocation problem. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 44, n. 2, p. 232–245, 2010. ISSN 0191-2615. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0191261509000824>>. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 12.

GLOVER, F.; KOCHENBERGER, G. **Handbook of Metaheuristics**. Springer US, 2003. 219–249 p. (International Series in Operations Research & Management Science). ISBN 9781402072635. Disponível em: <[https://books.google.com.br/books?id=O\\\_10T\\\_KeqOgC](https://books.google.com.br/books?id=O\_10T\_KeqOgC)>. Citado na página 30.

GOH, K. S.; LIM, A. Combining various algorithms to solve the ship berthing problem. In: . [S.l.: s.n.], 2000. p. 370–373. Citado na página 9.

GUAN, Y.; CHEUNG, R. K. The berth allocation problem: models and solution methods. In: \_\_\_\_\_. **Container Terminals and Automated Transport Systems: Logistics Control Issues and Quantitative Decision Support**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005. p. 141–158. ISBN 978-3-540-26686-0. Disponível em: <[https://doi.org/10.1007/3-540-26686-0\\_6](https://doi.org/10.1007/3-540-26686-0_6)>. Citado na página 10.

GUAN, Y. et al. A multiprocessor task scheduling model for berth allocation: heuristic and worst-case analysis. **Operations Research Letters**, v. 30, n. 5, p. 343–350, 2002. ISSN 0167-6377. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167637702001475>>. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 10.

HADDAD, E. A.; HEWINGS, G. J. D. Transportation costs and regional development: An interregional cge analysis. **European Congress of the Regional Science Association**, p. 38, 1998. Disponível em: <<http://www-sre.wu-wien.ac.at/ersa/ersaconfs/ersa98/papers/426.pdf>>. Citado na página 14.

HANSEN, P.; MLADENOVIC, N. **An Introduction to Variable Neighborhood Search**. [S.l.]: Meta-Heuristics, 1999. v. 1999. 433–458 p. Citado na página 30.

HANSEN, P.; OGUZ, C. A note on formulations of static and dynamic berth allocation problems. **Les Cahiers du GERAD**, v. 30, p. 1–17, 01 2003. Citado na página 8.

HANSEN, P.; OGUZ, C.; MLADENOVIC, N. Variable neighborhood search for minimum cost berth allocation. **European Journal of Operational Research**, v. 191, n. 3, p. 636–649, 2008. ISSN 0377-2217. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221707001221>>. Citado na página 8.

HATTERAS. **COMO AUMENTAR A EFICIÊNCIA DE SUA OPERAÇÃO PORTUÁRIA?** 2021. <https://www.hatteras.com.br/insight/como-aumentar-a-eficiencia-de-sua-operacao-portuaria>. Acesso em: 10 de Julho de 2021. Citado na página 17.

HENDRIKS, M. P. M. et al. Strategic allocation of cyclically calling vessels for multi-terminal container operators. **Flexible Services and Manufacturing Journal**, p. 248–273, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 12.

HOFFARTH, L.; VOSS, S. Berth allocation in a container terminal: development of a decision support system. In: **Operations research proceedings**. [S.l.: s.n.], 1993. p. 89–95. Citado na página 11.

IMAI, A.; NAGAIWA, K.; TAT, C. W. Efficient planning of berth allocation for container terminals in asia. **Journal of Advanced Transportation**, v. 31, n. 1, p. 75–94, 1997. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/atr.5670310107>>. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 9.

IMAI, A. et al. Berth allocation at indented berths for mega-containerships. **European Journal of Operational Research**, v. 179, n. 2, p. 579–593, 2007. ISSN 0377-2217. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221706001913>>. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 12.

IMAI, A.; NISHIMURA, E.; PAPADIMITRIOU, S. The dynamic berth allocation problem for container port. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 35, p. 401–417, 05 2001. Citado 5 vezes nas páginas 1, 5, 6, 7 e 9.

IMAI, A. et al. Berth allocation in a container port: using a continuous location space approach. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 39, n. 3, p. 199–221, 2005. ISSN 0191-2615. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0191261504000505>>. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 10.

INMETRO. **Sistema Internacional de Medidas**. 2012. Disponível em: <[http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/si\\_versao\\_final.pdf](http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/si_versao_final.pdf)>. Acesso em: 10 de Julho de 2021. Citado na página 5.

KNUTH, D.; BIBBY, D.; MAKAI, I. **The textbook**. [S.l.]: Addison-Wesley, 1986. v. 1993. 515–519 p. Citado na página 83.

LAI, K. K.; SHIH, K. A study of container berth allocation. **Journal of Advanced Transportation**, v. 26, n. 1, p. 45–60, 1992. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/atr.5670260105>>. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 10.

LALLA-RUIZ, E.; BATISTA, B. M.; VEGA, J. M. M. Artificial intelligence hybrid heuristic based on tabu search for the dynamic berth allocation problem. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 25, n. 6, p. 1132–1141, 2012. ISSN 0952-1976. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0952197612001443>>. Citado na página 8.

LEE, Y.; CHEN, C.-Y. An optimization heuristic for the berth scheduling problem. **European Journal of Operational Research**, v. 196, p. 500–508, 07 2009. Citado na página 10.

LI, C.-L.; CAI, X.; LEE, C.-Y. Scheduling with multiple-job-on-one-processor pattern. **IIE Transactions**, Taylor & Francis, v. 30, n. 5, p. 433–445, 1998. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/07408179808966484>>. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 10.

LIGTERINGEN, H.; VELINK, H. **Ports and Terminals**. VSSD, 2012. ISBN 9789065623041. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=G0OLngEACAAJ>>. Citado na página 4.

LIM, A. The berth planning problem 11 this research is part of a project the author has with the port of singapore authority. **Operations Research Letters**, v. 22, n. 2, p. 105–110, 1998. ISSN 0167-6377. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167637798000108>>. Citado na página 9.

LIM, A. An effective ship berthing algorithm. In: **Proceedings of the 16th International Joint Conference on Artificial Intelligence - Volume 1**. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1999. (IJCAI'99), p. 594–597. Citado na página 9.

MATTOZO, J. G. O. **A GESTÃO DO ARMAZENAMENTO DE GRANÉIS SÓLIDOS NO PORTO DE PARANAGUÁ**. vi p. Dissertação (Mestrado), 2006. Disponível em: <[https://www.marinha.mil.br/dpc/sites/www.marinha.mil.br/dpc/files/monografias/Gestao\\_Armazenamento\\_Graneis.pdf](https://www.marinha.mil.br/dpc/sites/www.marinha.mil.br/dpc/files/monografias/Gestao_Armazenamento_Graneis.pdf)>. Citado na página 16.

MAURI, G. R.; OLIVEIRA, A. C. M. de; LORENA, L. A. N. Resolução do problema de alocação de berços através de uma técnica de geração de colunas. **Pesquisa Operacional**, scielo, v. 30, p. 547 – 562, 12 2010. ISSN 0101-7438. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0101-74382010000300003&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-74382010000300003&nrm=iso)>. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 9.

MEISEL, F.; BIERWIRTH, C. Heuristics for the integration of crane productivity in the berth allocation problem. **Transportation Research Part**, v. 45, n. 1, p. 196–209, 2009. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1366554508000768>>. Citado na página 10.

MENEGAZZO, L.; PETTERINI, F. Maiores navios no mundo, mais um desafio no brasil: uma análise do programa nacional de dragagem. **Estudos Econômicos (São Paulo)**, v. 48, p. 175–209, 03 2018. Citado na página 17.

MENEZES, G. C. **MODELO E ALGORITMOS PARA UM PROBLEMA INTEGRADO DE PLANEJAMENTO, SEQUENCIAMENTO E ALOCAÇÃO DE PÁTIOS**. Tese (Doutorado), 2016. Computação. Citado na página 14.

MLADENOVIC, N.; HANSEN, P. A tutorial on variable neighborhood search. **Computers and Operations Research**, v. 24, p. 1097 – 1100, 01 1995. Citado na página 30.

MONACO, M. F.; SAMMARRA, M. The berth allocation problem: A strong formulation solved by a lagrangean approach. **Transportation Science**, INFORMS, v. 41, n. 2, p. 265–280, 2007. ISSN 00411655, 15265447. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/25769351>>. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 9.

MOORTHY, R.; TEO CHUNG-PIAW KIM, K. H.; GUNTHER, H.-O. Berth management in container terminal: The template design problem. In: \_\_\_\_\_. **Container Terminals and Cargo Systems: Design, Operations Management, and Logistics Control Issues**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007. p. 63–86. ISBN 978-3-540-49550-5. Disponível em: <[https://doi.org/10.1007/978-3-540-49550-5\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-540-49550-5_4)>. Citado 3 vezes nas páginas 10, 11 e 12.

MORAES, V. J. d.; SILVA, G. P. Um estudo da heurística neighborhood search para o problema de coleta e entrega com janela de tempo. **Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, 2013. Citado na página 31.



MOTORSHIP, I. f. M. T. p. **Propulsion trends in bulk carriers**. 2020. Disponível em: <<https://www.motorship.com/news101/engines-and-propulsion/propulsion-trends-in-bulk-carriers>>. Acesso em: 05 de Maio 2020. Citado na página 82.

NISHIMURA, E.; IMAI, A.; PAPADIMITRIOU, S. Berth allocation planning in the public berth system by genetic algorithms. **European Journal of Operational Research**, v. 131, n. 2, p. 282–292, 2001. ISSN 0377-2217. Artificial Intelligence on Transportation Systems and Science. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221700001284>>. Citado 5 vezes nas páginas 7, 8, 9, 11 e 12.

PARK, K. T.; KIM, K. H. Berth scheduling for container terminals by using a sub-gradient optimization technique. **Journal of the Operational Research Society**, Taylor & Francis, v. 53, n. 9, p. 1054–1062, 2002. Disponível em: <<https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601412>>. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 10.

PHSOFT. **Matérias**. 2021. Disponível em: <<https://www.phsoft.com.br/controle-de-estoque/>>. Acesso em: 14 de Julho 2021. Citado na página 16.

PORTOGENTE. **Produtos manufaturados**. 2018. Disponível em: <<https://portogente.com.br/portopedia/76387-produtos-manufaturados>>. Acesso em: 14 de Julho 2021. Citado na página 14.

RAFAEL et al. Aplicação do método de redução do espaço de busca em problemas de otimização via simulação em um modelo de simulação clássico. 09 2015. Citado na página 41.

RETORNO, M. **O que é tradeoff?** 2021. Disponível em: <<https://maisretorno.com/porta/termos/t/tradeoff>>. Acesso em: 14 de Julho 2021. Citado na página 11.

RODRIGUES, I. B. G. et al. Modelo matemático para o problema de alocação de berços em portos com limitações de operação de carga ao longo do cais. **Gestão & Produção**, scielo, v. 23, p. 771–786, 12 2016. ISSN 0104-530X. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0104-530X2016000400771&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-530X2016000400771&nrm=iso)>. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 10.

ROPKE, S.; PISINGER, D. An adaptive large neighborhood search heuristic for the pickup and delivery problem with time windows. **Transportation Science**, v. 40, p. 455–472, 11 2006. Citado na página 30.

RUIZ, R.; STUTZLE, T. A simple and effective iterated greedy algorithm for the permutation flowshop scheduling problem. **European Journal of Operational Research**, v. 44, p. 2033–2049, 03 2007. Citado na página 30.

SCHINAZI, G. Caracterização de sinter de minério de ferro por microscopia optica digital. **European Congress of the Regional Science Association**, p. 1, 2008. Disponível em: <[https://www.puc-rio.br/ensinopesq/ccpg/pibic/relatorio\\_resumo2008/relatorios/ctc/dcm/dcm%205.pdf](https://www.puc-rio.br/ensinopesq/ccpg/pibic/relatorio_resumo2008/relatorios/ctc/dcm/dcm%205.pdf)>. Citado na página 15.

SCHRIMPF, G. et al. Record breaking optimization results using the ruin and recreate principle. **Journal of Computational Physics**, v. 159, p. 139–171, 04 2000. Citado na página 30.

SHAW, P. A new local search algorithm providing high quality solutions to vehicle routing problems. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, p. 417–431, 1997. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 31.

SOUZA, M. C. de. **Matérias**. 2022. Disponível em: <<https://gist.github.com/marcoscastro/60f8f82298212e267021>>. Acesso em: 16 de Fevereiro 2022. Citado na página 40.

STAHLBOCK, R.; VOSS, S. Operations research at container terminals: A literature update. **Operations Research-Spektrum**, v. 30, p. 1–52, 04 2008. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 6.

TING, C.-J.; WU, K.-C.; CHOU, H. Particle swarm optimization algorithm for the berth allocation problem. **Expert Systems with Applications**, v. 41, n. 4, Part 1, p. 1543–1550, 2014. ISSN 0957-4174. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417413006726>>. Citado na página 8.

TONG, C. J.; LAU, H. C.; LIM, A. Ant colony optimization for the ship berthing problem. In: THIAGARAJAN, P. S.; YAP, R. (Ed.). **Advances in Computing Science — ASIAN'99**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1999. p. 359–370. ISBN 978-3-540-46674-1. Citado na página 9.

UMANG, N.; BIERLAIRE, M.; VACCA, I. Exact and heuristic methods to solve the berth allocation problem in bulk ports. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 54, p. 14 – 31, 2013. ISSN 1366-5545. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1366554513000537>>. Citado 4 vezes nas páginas 5, 7, 11 e 12.

UNSAL, O.; OGUZ, C. An exact algorithm for integrated planning of operations in dry bulk terminals. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 126, p. 103–121, 06 2019. Citado na página 5.

VALE. **Companhia Vale de Rio Doce**. 2020. Disponível em: <<http://www.vale.com/pt-br/o-que-fazemos/logistica/portos-eterminais/paginas/default.aspx>>. Acesso em: 05 de Maio 2020. Citado na página 82.

VERVLOET, H. L. L.; ROSA, R. A. Modelo matemático para planejamento da atracação de navios sob o contrato de charter party. **TRANSPORTES**, v. 24, n. 1, p. 84–94, 2016. Disponível em: <<https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/976>>. Citado 3 vezes nas páginas 5, 6 e 7.

VIEIRA, J.; FIALHO, G. Modernização da gestão portuária e planejamento operacional integrado. **Revista Eletrônica de Estratégia e Negócios**, v. 13, p. 196, 06 2020. Citado na página 13.

VIEIRA, J. H. **Modernização da Gestão Portuária e Planejamento Operacional Integrado por meio de Indicadores de Desempenho**. Dissertação (Mestrado), 2018. Engenharia. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 15.

XU, D.; LI, C. L.; LEUNG, J. Y. Berth allocation with time-dependent physical limitations on vessels. **European Journal of Operational Research**, v. 216, n. 1, p. 45–56, 2012. Citado na página 7.

ZHEN, L.; CHEW, E. P.; LEE, L. H. An integrated model for berth template and yard template planning in transshipment hubs. **Transportation Science**, INFORMS, v. 45, n. 4, p. 483–504, 2011. ISSN 00411655, 15265447. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/41432816>>. Citado na página 11.