

MODELAGEM MATEMÁTICA PARA O PROBLEMA MULTIPERÍODO DE PROGRAMAÇÃO DE EMBARQUE E DESEMBARQUE DE TRIPULANTES MARÍTIMOS

Lygia Bronneberg Vélez

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes.

Orientador: Glaydston Mattos Ribeiro

Rio de Janeiro Agosto de 2016

MODELAGEM MATEMÁTICA PARA O PROBLEMA MULTIPERÍODO DE PROGRAMAÇÃO DE EMBARQUE E DESEMBARQUE DE TRIPULANTES MARÍTIMOS

Lygia Bronneberg Vélez

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES.

Examinada por:	
	Prof. Glaydston Mattos Ribeiro, D.Sc.
	Prof. André Bergsten Mendes, D.Sc.
	Prof. Virgilio José Martins Ferreira Filho, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL AGOSTO DE 2016

Vélez, Lygia Bronneberg

Modelagem matemática para o problema multiperíodo de programação de embarque e desembarque de tripulantes marítimos / Lygia Bronneberg Vélez. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2016.

XV, 142 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Glaydston Mattos Ribeiro

Dissertação (mestrado) — UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia de Transportes, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 87-90.

1. Modelagem Matemática. 2. Otimização. 3. Logística de Embarque e Desembarque de Tripulantes. I. Ribeiro, Glaydston Mattos. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Transportes. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Talvez mais difícil do que escrever qualquer capítulo deste trabalho, seja agradecer a todos aqueles que, direta ou indiretamente, permitiram e me apoiaram para que esse momento fosse possível.

Agradeço primeiramente ao meu trio de sustentação, às três mulheres responsáveis por todas as minhas conquistas. À minha mãe, Agnes, minha maior guerreira, que dedica a vida integralmente por nós, que nunca mediu esforços para criar sozinha suas três filhas, que abdicou de tanta coisa pela simples alegria de nos ver felizes e realizadas. Eu dedico tudo o que sou a você e agradeço imensamente todas as suas noites mal dormidas, todas as horas no consultório buscando nosso sustento, todas as orações diárias, todos os abraços acolhedores, todos os sorrisos, todo o amor que você nos deu sem pedir absolutamente nada em troca. Nada nesse mundo explica o respeito e a gratidão que tenho por ser sua filha. À minha irmã, Paula, por ser meu maior exemplo de ser humano. Obrigada por me mostrar diariamente como sou limitada e como, ao mesmo tempo, tenho todas as condições e ferramentas de buscar ser sempre alguém melhor. Obrigada por ter me escolhido e pela honra de poder ter em minha vida alguém tão perfeita como você. À minha irmã Myrian, minha companheira, meu porto seguro, meu símbolo maior de competência e caráter, esse trabalho só foi possível por você, obrigada por todo o seu esforço, pela paciência e por nunca, em nenhum momento da minha vida, ter desistido de mim. Você é uma pessoa preciosa demais, e a melhor parte de crescer ao seu lado é ver que você nem se deu conta da dimensão disso ainda.

Aos meus tios, em especial Aninha, Tante Mia, Ome Peter Wijnhoven, Ome Paul, Ome Peter e Ome Jós, que mesmo com a distância física, nunca deixaram de nos dar oportunidades maravilhosas, de nos ajudar e de nos proteger. À Oma e vovó Julieta pelas incontáveis orações para que pudéssemos trilhar o melhor caminho.

À Ana, pela amizade. Você faz parte da família que eu tive oportunidade de escolher, e por família eu digo que você passou na minha vida e por algum motivo abençoado resolveu ficar. Me acompanhou esse tempo todo alegrando meus dias, me ouvindo, me ensinando e me guiando. Obrigada por todo o carinho.

À Transpetro, motivo pelo qual cheguei até aqui, agradeço os aprendizados proporcionados, aos dados e informações para o trabalho, e acima disso às pessoas que pude conhecer neste meio caminho. Agradeço primeiramente ao meu querido Jorge por ter acreditado em mim e me dado total apoio para correr atrás dos meus sonhos, serei eternamente grata pelo voto de confiança. A todos os amigos e colegas do Pré-sal, Gedit, RH e CNCL que sempre me deram todo o suporte que necessitei, obrigada a todos aqueles que torceram junto comigo para que isso se concretizasse.

Um agradecimento especial à Gisele, amiga querida que me acompanhou nos últimos anos sempre com palavras de muito carinho, cuidado e incentivo. À Luisa Crasto e Luisa Albaine por terem sido tão presentes desde o curso de formação, em todos os meus altos e baixos, nos tropeços e nas conquistas, obrigada pelas lições, pela paciência, pelos sorrisos sinceros e por sempre estarem prontas em todos os momentos que precisei.

À Simiramis, que muitas vezes em seu silêncio me aponta verdades sobre mim que eu desconhecia.

Às queridas Luíza, Bia e Inaê por terem sido tão companheiras nesses anos de mestrado, por todas as conversas, desabafos e risadas, por todas as vezes que vocês cruzaram o Rio de Janeiro para nos vermos, a amizade de vocês tornou essa jornada muito mais especial. A todos os colegas, professores e funcionários do PET.

Ao meu querido mestre e orientador Glaydston. Se dessa caminhada eu aprendi algo, é que não existe ninguém ruim no que faz, existem pessoas que ainda não encontraram seus caminhos. Obrigada por ter me possibilitado encontrar o meu, por ter instigado meu interesse em assuntos novos e por ter me mostrado luz quando tudo parecia obscuro.

Aos professores André Bergsten Mendes e Virgílio José Martins Ferreira Filho por aceitarem participar da minha banca.

E ao mais importante deles, à Deus, por me dar a oportunidade maravilhosa de acordar todos os dias e escrever uma página nova, de experiências únicas, com saúde, coragem e cercada daqueles que mais amo.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos

necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

MODELAGEM MATEMÁTICA PARA O PROBLEMA MULTIPERÍODO DE

PROGRAMAÇÃO DE EMBARQUE E DESEMBARQUE DE TRIPULANTES

MARÍTIMOS

Lygia Bronneberg Vélez

Agosto/2016

Orientador: Glaydston Mattos Ribeiro

Programa: Engenharia de Transportes

O transporte marítimo enfrenta diariamente um mercado que exige competitividade

e qualidade de serviço das empresas de navegação. Desta forma, destaca-se a

importância de utilização de ferramentas que auxiliem no planejamento e gerenciamento

dos navios e das tripulações. Este trabalho aborda o Problema de Programação de

Tripulantes aplicado ao contexto marítimo, que é pouco encontrado na literatura,

embora bastante presente para outros modos de transporte.

De acordo com a legislação brasileira, o tripulante assina conjuntamente com a

empresa um regime de embarque, o qual prevê a quantidade de dias que o mesmo deve

permanecer embarcado e o período de folga correspondente. A embarcação passa a ser o

ambiente de trabalho e de moradia por períodos que podem ser de semanas a meses.

Caso esse período de embarque seja atingido, o tripulante pode receber diariamente um

adicional ao seu salário.

Para que isso seja evitado, as empresas buscam realizar o melhor gerenciamento de

sua equipe. Esta dissertação propõe modelos matemáticos multiperíodo de programação

de embarque e desembarque de tripulantes com o objetivo de apresentar uma ferramenta

de apoio à decisão que auxilie na otimização de recursos (humanos e financeiros). O

vi

trabalho finaliza com um estudo de caso de uma empresa brasileira de navegação proporcionando ao leitor uma ideia da dimensão do problema e de sua aplicabilidade.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the

requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

MULTIPERIOD MATHEMATICAL MODELING FOR THE VESSEL CREW

SCHEDULING PROBLEM

Lygia Bronneberg Vélez

August/2016

Advisor: Glaydston Mattos Ribeiro

Department: Transportation Engineering

In the shipping industry, quality and competitiveness are permanent requirements

demanded from any company that aims to survive in this field. Along with that comes

the need to develop more efficient crew planning and management tools. This paper

addresses the crew scheduling problem applied to shipping, which has been explored

extensively in the literature with respect to several types of applications, but rarely to

the maritime context.

According to Brazilian laws, a crew member must sign along with the work

contract a boarding regimen, agreeing on the amount of days that he/she shall be

boarded and their corresponding days off. The vessel then becomes their workplace and

home, for periods that can vary from weeks to months. In case the agreed boarding

period is exceeded, the crew member shall get an extra daily payment.

In order to prevent additional costs, companies pursue the best crew management

process. This thesis presents multi-period mathematical models for maritime crew

scheduling, in order to provide a decision supporting tool which optimizes human and

financial resources. The paper also addresses a real case study of a Brazilian shipping

company, providing the reader with an idea of this problem's dimension and

applicability.

viii

SUMÁRIO

1.1 CONTEXTO GERAL E JUSTIFICATIVA DO TRABALHO 1.2 OBJETIVOS 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO 2 O PROBLEMA NA LITERATURA	1	INTRODUÇAO	1
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO 2 O PROBLEMA NA LITERATURA			
2 O PROBLEMA NA LITERATURA		1.2 OBJETIVOS	8
2 O PROBLEMA NA LITERATURA			
2.2 PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO DE TRIPULANTES 2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS 3 PARTICULARIDADES DO PROBLEMA MARÍTIMO 3.1 TRABALHO MARÍTIMO 3.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO DE TRIPULANTES MARÍTIMOS 3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS 4 MODELAGEM MATEMÁTICA PROPOSTA 4.1 METODOLOGIA E PREMISSAS 4.2 MODELO 1: UM DIA DE PROGRAMAÇÃO SEM POSSIBILIDADE DE TRANSFERÊNCIA ENTRE NAVIOS 4.3 MODELO 2: UM DIA DE PROGRAMAÇÃO COM POSSIBILIDADE DE TRANSFERÊNCIA ENTRE NAVIOS 4.4 MODELO 3: PERÍODO DE PROGRAMAÇÃO SEM POSSIBILIDADE DE TRANSFERÊNCIA ENTRE NAVIOS 4.5 MODELO 4: PERÍODO DE PROGRAMAÇÃO COM POSSIBILIDADE DE TRANSFERÊNCIA ENTRE NAVIOS 4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS 5 APLICAÇÕES E TESTES COMPUTACIONAIS DO MODELO 5.1 VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS MODELOS. 5.2 ESTUDO DE CASO – EMPRESA DE NAVEGAÇÃO BRASILEIRA 5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS APÊNDICE II – EXERCÍCIO DO MODELO 2	2	O PROBLEMA NA LITERATURA	. 11
2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS 3 PARTICULARIDADES DO PROBLEMA MARÍTIMO		2.1 PROBLEMA DE ALOCAÇÃO	. 12
3 PARTICULARIDADES DO PROBLEMA MARÍTIMO 3.1 TRABALHO MARÍTIMO 3.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO DE TRIPULANTES MARÍTIMOS 3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS 4 MODELAGEM MATEMÁTICA PROPOSTA 4.1 METODOLOGIA E PREMISSAS 4.2 MODELO 1: UM DIA DE PROGRAMAÇÃO SEM POSSIBILIDADE DE TRANSFERÊNCIA ENTRE NAVIOS 4.3 MODELO 2: UM DIA DE PROGRAMAÇÃO COM POSSIBILIDADE DE TRANSFERÊNCIA ENTRE NAVIOS 4.4 MODELO 3: PERÍODO DE PROGRAMAÇÃO SEM POSSIBILIDADE DE TRANSFERÊNCIA ENTRE NAVIOS 4.5 MODELO 4: PERÍODO DE PROGRAMAÇÃO COM POSSIBILIDADE DE TRANSFERÊNCIA ENTRE NAVIOS 4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS 5 APLICAÇÕES E TESTES COMPUTACIONAIS DO MODELO 5.1 VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS MODELOS 5.2 ESTUDO DE CASO – EMPRESA DE NAVEGAÇÃO BRASILEIRA 5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS APÊNDICE I – EXERCÍCIO DO MODELO 2 1		-	
3.1 TRABALHO MARÍTIMO 3.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO DE TRIPULANTES MARÍTIMOS 3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS 4 MODELAGEM MATEMÁTICA PROPOSTA 4.1 METODOLOGIA E PREMISSAS 4.2 MODELO 1: UM DIA DE PROGRAMAÇÃO SEM POSSIBILIDADE DE TRANSFERÊNCIA ENTRE NAVIOS 4.3 MODELO 2: UM DIA DE PROGRAMAÇÃO COM POSSIBILIDADE DE TRANSFERÊNCIA ENTRE NAVIOS 4.4 MODELO 3: PERÍODO DE PROGRAMAÇÃO SEM POSSIBILIDADE DE TRANSFERÊNCIA ENTRE NAVIOS 4.5 MODELO 4: PERÍODO DE PROGRAMAÇÃO COM POSSIBILIDADE DE TRANSFERÊNCIA ENTRE NAVIOS 4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS 5 APLICAÇÕES E TESTES COMPUTACIONAIS DO MODELO 5.1 VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS MODELOS 5.2 ESTUDO DE CASO – EMPRESA DE NAVEGAÇÃO BRASILEIRA 5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS APÊNDICE I – EXERCÍCIO DO MODELO 2		2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	. 20
3.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO DE TRIPULANTES MARÍTIMOS	3		
MARÍTIMOS		3.1 TRABALHO MARÍTIMO	. 21
3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	M		
4.1 METODOLOGIA E PREMISSAS 4.2 MODELO 1: UM DIA DE PROGRAMAÇÃO SEM POSSIBILIDADE DE TRANSFERÊNCIA ENTRE NAVIOS 4.3 MODELO 2: UM DIA DE PROGRAMAÇÃO COM POSSIBILIDADE DE TRANSFERÊNCIA ENTRE NAVIOS 4.4 MODELO 3: PERÍODO DE PROGRAMAÇÃO SEM POSSIBILIDADE DE TRANSFERÊNCIA ENTRE NAVIOS 4.5 MODELO 4: PERÍODO DE PROGRAMAÇÃO COM POSSIBILIDADE DE TRANSFERÊNCIA ENTRE NAVIOS 4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS 5 APLICAÇÕES E TESTES COMPUTACIONAIS DO MODELO 5.1 VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS MODELOS 5.2 ESTUDO DE CASO – EMPRESA DE NAVEGAÇÃO BRASILEIRA 5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS APÊNDICE I – EXERCÍCIO DO MODELO 2		3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	. 31
4.2 MODELO 1: UM DIA DE PROGRAMAÇÃO SEM POSSIBILIDADE DE TRANSFERÊNCIA ENTRE NAVIOS 4.3 MODELO 2: UM DIA DE PROGRAMAÇÃO COM POSSIBILIDADE DE TRANSFERÊNCIA ENTRE NAVIOS 4.4 MODELO 3: PERÍODO DE PROGRAMAÇÃO SEM POSSIBILIDADE DE TRANSFERÊNCIA ENTRE NAVIOS 4.5 MODELO 4: PERÍODO DE PROGRAMAÇÃO COM POSSIBILIDADE DE TRANSFERÊNCIA ENTRE NAVIOS 4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS 5 APLICAÇÕES E TESTES COMPUTACIONAIS DO MODELO 5.1 VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS MODELOS 5.2 ESTUDO DE CASO – EMPRESA DE NAVEGAÇÃO BRASILEIRA 5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS APÊNDICE I – EXERCÍCIO DO MODELO 2 1	4	MODELAGEM MATEMÁTICA PROPOSTA	. 33
TRANSFERÊNCIA ENTRE NAVIOS 4.3 MODELO 2: UM DIA DE PROGRAMAÇÃO COM POSSIBILIDADE DE TRANSFERÊNCIA ENTRE NAVIOS 4.4 MODELO 3: PERÍODO DE PROGRAMAÇÃO SEM POSSIBILIDADE DE TRANSFERÊNCIA ENTRE NAVIOS 4.5 MODELO 4: PERÍODO DE PROGRAMAÇÃO COM POSSIBILIDADE DE TRANSFERÊNCIA ENTRE NAVIOS 4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS 5 APLICAÇÕES E TESTES COMPUTACIONAIS DO MODELO 5.1 VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS MODELOS 5.2 ESTUDO DE CASO – EMPRESA DE NAVEGAÇÃO BRASILEIRA 5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS APÊNDICE I – EXERCÍCIO DO MODELO 2 1		4.1 METODOLOGIA E PREMISSAS	. 33
TRANSFERÊNCIA ENTRE NAVIOS 4.4 MODELO 3: PERÍODO DE PROGRAMAÇÃO SEM POSSIBILIDADE DE TRANSFERÊNCIA ENTRE NAVIOS 4.5 MODELO 4: PERÍODO DE PROGRAMAÇÃO COM POSSIBILIDADE DE TRANSFERÊNCIA ENTRE NAVIOS 4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS 5 APLICAÇÕES E TESTES COMPUTACIONAIS DO MODELO 5.1 VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS MODELOS 5.2 ESTUDO DE CASO – EMPRESA DE NAVEGAÇÃO BRASILEIRA 5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS APÊNDICE I – EXERCÍCIO DO MODELO 1 APÊNDICE II – EXERCÍCIO DO MODELO 2 1	TI	4.2 MODELO 1: UM DIA DE PROGRAMAÇÃO SEM POSSIBILIDADE DE RANSFERÊNCIA ENTRE NAVIOS	. 40
TRANSFERÊNCIA ENTRE NAVIOS 4.5 MODELO 4: PERÍODO DE PROGRAMAÇÃO COM POSSIBILIDADE DE TRANSFERÊNCIA ENTRE NAVIOS 4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS 5 APLICAÇÕES E TESTES COMPUTACIONAIS DO MODELO 5.1 VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS MODELOS 5.2 ESTUDO DE CASO – EMPRESA DE NAVEGAÇÃO BRASILEIRA 5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS APÊNDICE I – EXERCÍCIO DO MODELO 1 APÊNDICE II – EXERCÍCIO DO MODELO 2 1	TI	4.3 MODELO 2: UM DIA DE PROGRAMAÇÃO COM POSSIBILIDADE DE RANSFERÊNCIA ENTRE NAVIOS	. 48
TRANSFERÊNCIA ENTRE NAVIOS 4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS 5 APLICAÇÕES E TESTES COMPUTACIONAIS DO MODELO 5.1 VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS MODELOS 5.2 ESTUDO DE CASO – EMPRESA DE NAVEGAÇÃO BRASILEIRA 5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS APÊNDICE I – EXERCÍCIO DO MODELO 1 APÊNDICE II – EXERCÍCIO DO MODELO 2 1	TI	4.4 MODELO 3: PERÍODO DE PROGRAMAÇÃO SEM POSSIBILIDADE DE RANSFERÊNCIA ENTRE NAVIOS	E . 52
5 APLICAÇÕES E TESTES COMPUTACIONAIS DO MODELO	TI	4.5 MODELO 4: PERÍODO DE PROGRAMAÇÃO COM POSSIBILIDADE DI RANSFERÊNCIA ENTRE NAVIOS	E . 61
5.1 VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS MODELOS		4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	. 67
5.2 ESTUDO DE CASO – EMPRESA DE NAVEGAÇÃO BRASILEIRA 5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	5	APLICAÇÕES E TESTES COMPUTACIONAIS DO MODELO	. 69
5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS		5.1 VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS MODELOS	. 69
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS		5.2 ESTUDO DE CASO – EMPRESA DE NAVEGAÇÃO BRASILEIRA	. 73
FUTUROS		5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	. 83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	6		. 84
APÊNDICE II – EXERCÍCIO DO MODELO 1	R		
APÊNDICE III – EXERCÍCIO DO MODELO 3	\mathbf{A}	PÊNDICE II – EXERCÍCIO DO MODELO 2	100
	\mathbf{A}	PÊNDICE III – EXERCÍCIO DO MODELO 3	105

APÊNDICE IV – EXERCÍCIO DO MODELO 4	. 118
APÊNDICE V – DADOS DE ENTRADA DO ESTUDO DE CASO	. 127

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Carga transportada pelo comércio marítimo nos últimos anos [MM ton] Fonte: UNCTD (2015)
Figura 1.2: Carga transportada pelo comércio marítimo por continente em 2014 [%] Fonte: UNCTD (2015)
Figura 1.3: Movimentação aquaviária por natureza de carga [MM ton] Fonte: ANTAQ (2014)
Figura 1.4: Moimentação aquaviária por tipo de navegação [MM ton] Fonte: ANTAQ (2014)
Figura 1.5: Movimentação de carga por longo curso [MM ton] Fonte: ANTAQ (2014)
Figura 1.6: Destinos das exportações brasileiras 2013 Fonte: ANTAQ (2014) 5
Figura 2.1: Bibliografia sobre PPT e suas diversas aplicações (ERNST et al., 2003) 11
Figura 2.2: Planejamento Operacional de companhias de transporte aéreo Fonte: Adaptação do texto de (KOHL e KARISCH, 2004)
Figura 2.3: Comparação entre termos no contexto aéreo Fonte: Elaboração Própria 17
Figura 2.4: Dinâmica do Problema de Atribuição de Escala Fonte: Adaptação do texto de KOHL e KARISCH (2004)
Figura 4.1: Busca da Solução do Problema de Programação de Tripulantes Marítimos 33
Figura 5.1: Sistema de tripulação fixa
Figura 5.2: Impacto da quantidade de navios atracados na FO
Figura 5.3: Impacto da permissão de transferência entre navios na FO
Figura 5.4: Diferenças nas alocações de tripulantes entre modelos para 15 navios atracados
Figura 5.5: Impacto da variação de pessoas em terra na FO do Modelo 2 para 15 navios atracados.
Figura 5.6: Impacto do custo da diária dos tripulantes na FO
Figura 5.7: Impacto da variação dos custos de movimentação na FO

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Categorias de Tripulantes	. 23
Tabela 3.2: Regimes de Embarque	. 26
Tabela 3.3: Exemplo de necessidade de desembarque	. 30
Tabela 4.1: Previsão de disponibilidade dos navios para a programação	. 34
Tabela 4.2: Previsão de alocação dos tripulantes embarcados	. 35
Tabela 4.3: Tripulantes disponíveis em terra	. 35
Tabela 5.1: Resultados dos Testes de Verificação e Validação dos Modelos	. 72
Tabela 5.2: Dados de entrada do estudo de caso	. 75
Tabela 5.3: Informações e resultados dos cenários do estudo de caso	. 77

LISTA DE SIGLAS

PPT - Problema de Programação de Tripulantes

PA - Problema de Atribuição/ Alocação

PPTM - Problema de Programação de Tripulantes Marítimos

EUA – Estados Unidos da América

ANTAQ – Agência Nacional de Transporte Aquaviário

EBN - Empresas Brasileiras de Navegação

REB - Registro Especial Brasileiro

TCP - Time Charter Party

VCP - Voyage Charter Party

COA - Contract of Affreightment

ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres

CIR – Carteira de Inscrição e Registro

PDV – Problema de Determinação de Viagens

PAE – Problema de Atribuição de Escalas

CLT – Consolidação das Leis de Trabalho

CTS – Cartão de Tripulação de Segurança

CTO - Cartão de Tripulação Operacional

CL – Cartão de Lotação

ILO – International Labour Organization

ONU – Organização das Nações Unidas

IMO – International Maritime Organization

DPC – Diretoria de Portos e Costas

CLC – Capitão de Longo Curso

CCB – Capitão de Cabotagem

10N – 1º Oficial de Náutica

20N – 2º Oficial de Náutica

MCB – Mestre de Cabotagem

CTR - Contramestre

MNC - Marinheiro de Convés

MOC - Moço de Convés

MAC – Marinheiro Auxiliar de Convés

OSM – Oficial Superior de Máquinas

10M – 1° Oficial de Máquinas

20M – 2º Oficial de Máquinas

CDM – Condutor de Máquinas

ELT – Eletricista

MNM – Marinheiro de Máquinas

MOM – Moço de Máquinas

MAM – Marinheiro Auxiliar de Máquinas

ENF – Enfermeiro

ASA – Auxiliar de Saúde

TAA – Taifeiro

CZA – Cozinheiro

FSO – Floating Storage Offshore

DP – Dynamic Positioning

FO – Função Objetivo

1 INTRODUÇÃO

O transporte marítimo enfrenta diariamente um mercado que exige das empresas de navegação qualidade de serviço com preço competitivo. Anualmente os volumes transportados por este modo crescem, assim como a quantidade de informações, a complexidade dos navios e o tamanho das frotas e das tripulações, exigindo um maior controle e gerenciamento de todo processo. Neste contexto, destaca-se a utilidade das ferramentas de apoio à tomada de decisão na busca da excelência no planejamento (DREWRY MARITIME RESEARCH, 2011).

O Problema de Programação de Tripulantes (PPT) é conhecido na literatura com aplicação em diversos modos de transporte, principalmente no contexto aéreo (GOPALAKRISHNAN; JOHNSOS, 2005). A grande diferença quando se trata de tripulação de marítimos está no fato que o tripulante não é designado a uma sequência de viagens, e sim a um navio e às viagens programadas a ele. A embarcação passa a ser o ambiente de trabalho e de moradia da tripulação, portanto diferentemente de outros modos de transporte não existe uma escala que envolva viagens e repousos em períodos curtos de tempo, o marítimo assume um navio e ficará no mesmo até segunda ordem. O intervalo de tempo entre o embarque e desembarque pode variar de semanas a meses.

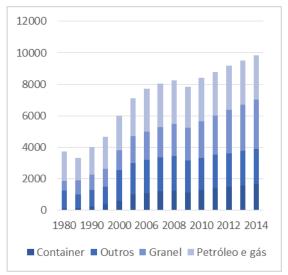
Os tripulantes de um mesmo navio embarcam e desembarcam em momentos diferentes, não sendo aconselhável a movimentação da equipe inteira de um mesmo navio por questões técnicas de segurança da operação. Desta forma, quanto maior o dinamismo da empresa embarcadora, maior o interesse em se aplicar soluções para o PPT aplicado ao contexto marítimo. Ou seja, quanto maior a frequência e os pontos de embarque e desembarque, a quantidade de tripulantes, quantidade de viagens, mais complexa a execução do sistema de forma manual.

Este problema pode ser entendido como um caso particular do clássico Problema de Atribuição ou Alocação (PA) conhecido também como *Assignment Problem*. O objetivo do PA consiste em corresponder elementos entre dois ou mais conjuntos minimizando ou maximizando uma função objetivo que respeita certas restrições (WANG; CHEN; MIAO, 2008).

Este trabalho busca contribuir através da proposta de modelos matemáticos a representação do Problema de Programação de Tripulantes Marítimos (PPTM) dentro de um conjunto de premissas. Estes modelos são parte do desenvolvimento de ferramentas que possam auxiliar departamentos de recursos humanos de empresas embarcadoras, na busca de uma programação de embarque e desembarque mais econômica. Serão discutidos temas como Otimização Combinatória, Programação Linear Inteira e Lógica Booleana.

1.1 CONTEXTO GERAL E JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

De acordo com o boletim de 2015 da *Review of Maritime Transport* (UNCTAD, 2015), o comércio marítimo mundial movimentou em 2014 cerca de 9,8 bilhões de toneladas de carga, sendo elas contêineres, petróleo e derivados, granel (grãos, ferro, carvão, minérios, bauxita, alumínio e rochas fosfáticas) entre outros, como apresentado na Figura 1.1. Esta movimentação é proveniente, principalmente, de importações e exportações asiáticas e de países da América Latina, conforme o indicado pela Figura 1.2.



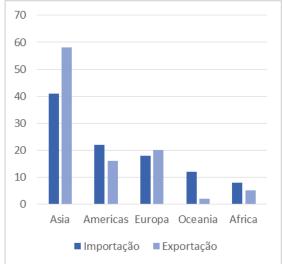


Figura 1.1: Carga transportada pelo comércio marítimo nos últimos anos [MM ton]
Fonte: UNCTD (2015)

Figura 1.2: Carga transportada pelo comércio marítimo por continente em 2014 [%]
Fonte: UNCTD (2015)

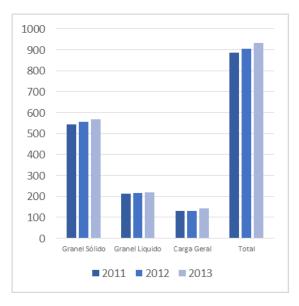
Em resposta a um cenário de crise, no qual o crescimento econômico mundial cresce a índices moderados (2,4% em 2013 e 2,5% em 2014 com relação a 2005), o comércio marítimo também manteve seu crescimento por volta de 3,4% em 2014, mesmo índice

de 2013. A queda do preço do barril de petróleo, a lenta recuperação dos países desenvolvidos, e a diminuição de crescimento dos países em desenvolvimento são os contextos que envolvem a crise. A projeção para o Brasil é uma retração da economia, resultado também das instabilidades políticas do país (UNCTAD, 2015).

A China, por sua vez, manteve a liderança nos volumes de movimentação de carga, tanto com a exportação de *commodities*, como na importação de petróleo e minérios fósseis, porém existem incertezas com relação ao seu crescimento que podem impactar negativamente o comércio mundial. Os EUA que por sua vez eram os maiores importadores de petróleo, diminuíram as importações em 12% de 2013 para 2014 (UNCTAD, 2015) devido às descobertas de *shale gas* no país (DREYER; GERALD, 2013).

De acordo com a UNCTAD (2015), a frota mundial conta com cerca de 89.400 navios dos mais diversos tipos e capacidades. Diferentemente da indústria de navios petroleiros, que está respondendo em queda com a entrada do *shale gas* no mercado, a indústria de porta contêineres continuou crescendo no último ano, mesmo com o crescimento da crise. Este fato está relacionado a uma constante busca por renovação da frota, com navios mais econômicos e que proporcionem maiores ganhos de escala de transporte.

Com relação ao cenário brasileiro, o estudo realizado pela Agência Nacional de Transporte Aquaviário (ANTAQ, 2014) mostrou que a movimentação geral de carga dos portos e terminais brasileiros atingiu 930 milhões de toneladas em 2013, conforme a Figura 1.3 e Figura 1.4, ilustra que 74% desta movimentação foi realizada por navegação de longo curso e 22% por cabotagem.



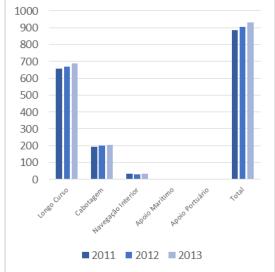


Figura 1.3: Movimentação aquaviária por natureza de carga [MM ton]
Fonte: ANTAQ (2014)

Figura 1.4: Moimentação aquaviária por tipo de navegação [MM ton]
Fonte: ANTAQ (2014)

A navegação de longo curso realiza o transporte de carga entre portos nacionais e internacionais. Estes "cursos" podem variar de pequenas distâncias para a América Latina, quanto a viagens de duração superior a um mês para os portos asiáticos. De acordo com a ANTAQ (2014), a movimentação de cargas no longo curso chegou a 680 milhões de toneladas em 2013, representado por uma curva ascendente desde o ano de 2009, conforme a Figura 1.5, principalmente para viagens que tem a China, Holanda e o Japão como destino, indicado na Figura 1.6.

A navegação de cabotagem, por outro lado, é responsável pela movimentação entre terminais e portos nacionais utilizando via marítima ou vias navegáveis interiores (BRASIL, 1997b). O Brasil, por conta da dimensão de sua área costeira, utiliza esta modalidade para ganhar escala de transporte por meio das embarcações.

O mercado da navegação de cabotagem é considerado estratégico para o país e por esta razão é protegido por políticas de reserva de mercado (CNT, 2013). Isto significa que, para este tipo de transporte, existe uma obrigatoriedade de preferência por contratação de embarcações de empresas brasileiras de navegação (EBN) ou embarcações estrangeiras com registro especial brasileiro (REB) afretadas por EBNs.



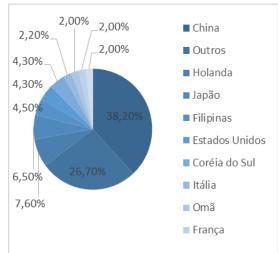


Figura 1.5: Movimentação de carga por longo curso [MM ton]
Fonte: ANTAQ (2014)

Figura 1.6: Destinos das exportações brasileiras 2013 Fonte: ANTAQ (2014)

Um estudo realizado pela Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2013), indicou que a cabotagem no Brasil encontra diversos entraves de desenvolvimento devido a questões como: precária infraestrutura portuária; burocracia; dificuldade de integração com outros modos de transporte; difícil acesso a financiamentos para a renovação da frota de embarcações; e elevados custos de praticagem e tripulação. De acordo com este mesmo estudo, diversos projetos estão em pauta para que este mercado seja melhor explorado, e possa se desenvolver nos próximos anos com esforços voltados para a redução dos custos, condição essencial para o desenvolvimento sustentável da cabotagem.

De acordo com STOPFORD (2009), o custo de um navio em operação pode ser dividido em quatro categorias: custo de capital (se o operador for o proprietário da embarcação) ou custo de *hire* (diária de aluguel do navio); custo de viagem; manutenções periódicas; e custos operacionais.

De acordo com o mesmo autor, o custo de capital ou investimento se refere ao pagamento da embarcação. O cálculo deste custo é feito com base no investimento inicial, no pagamento anual dos agentes financiadores (bancos e/ou investidores privados) e na estimativa de retorno com a revenda do casco.

O proprietário do navio não necessariamente é aquele que fará a sua exploração comercial por meio do transporte de carga. Em muitas situações o proprietário afreta o navio a casco nu para um armador de navios, o qual será responsável por prepará-lo para a operação. Por sua vez, o armador do navio pode celebrar contratos com outros clientes por períodos de tempo (*Time Charter Party* – TCP), viagens (*Voyage Charter Party* - VCP) ou até por tonelagem de carga (*Contract of Affreightment* – COA), como descrito por FONSECA (1960).

Sendo assim, os armadores de navios podem ser os proprietários dos navios ou simplesmente empresas de navegação que realizam transporte de carga própria ou para terceiros. No caso de contratos TCP, VCP ou COA o armador deve deixar o navio tripulado, preparado e disponível ao cliente pelo período ou viagem, acordados em contrato.

O custo de viagem é composto basicamente de combustíveis (bunker e diesel) e taxas portuárias. A parcela referente aos combustíveis está diretamente relacionada ao valor do barril de petróleo e aos avanços tecnológicos. Cabe destacar que os fatores que compõem essa parcela são variáveis, de acordo com questões mercadológicas vigentes.

Já os custos de manutenção periódica são obrigatórios e garantem a validade da classe do navio, condição primordial para que o mesmo seja assegurado. Esta classificação é resultado de um acompanhamento realizado por profissionais de sociedades classificadoras (empresas e entidades reconhecidas pelas autoridades marítimas) que fiscalizam a construção do navio e as manutenções periódicas, garantindo conformidade a um padrão reconhecido de qualidade e segurança para a navegação.

Por fim, os custos operacionais estão diretamente relacionados com as despesas que permitem a operação do navio, ou seja, o pagamento da tripulação, reparos e manutenções corretivas, víveres, água, seguro e custos administrativos

De acordo com STOPFORD (2009) e VELASCO e LIMA (1997), o custo da tripulação pode atingir 50% do custo total operacional, o que representa de 8% a 35% do custo total de um navio em operação. Este custo está diretamente ligado ao tipo, capacidade de carga e bandeira da embarcação, assim como à tecnologia de seus equipamentos (automação).

A bandeira do navio define, entre outros pontos, quais políticas trabalhistas serão aplicadas a seus tripulantes. Visando um maior lucro com o transporte marítimo, em 1970, alguns países europeus e os Estados Unidos passaram a utilizar bandeiras de conveniência e segundos registros (VELASCO e LIMA, 1997; CARLISLE, 2009). Libéria, Panamá e Ilhas Marshall possuem 41,8% em *deadweight* dos navios em suas bandeiras. A Grécia é a maior proprietária de navios até hoje e mais de 80% de sua frota trabalha sobre bandeira de conveniência (UNCTAD, 2015).

Desta forma, os armadores têm maior flexibilidade e passam a cumprir legislações mais brandas na operação de seus navios, seja de regulamentações de segurança, como trabalhista e ambientais. Um estudo feito pelo Departamento de Transporte Marítimo Americano mostra que em 2010 o custo médio de tripulação dos navios americanos foi cinco vezes maior do que a média de custo de uma bandeira estrangeira (U.S DEPARTMENT OF TRANSPORTATION MARITIME ADMINISTRATION, 2011).

Neste contexto, a fim de proteger o mercado brasileiro, foi assinada em 1997, a Lei no 9432 (BRASIL, 1997b), a qual estabelece obrigatoriedade de preferência para bandeira brasileira nos mercados de cabotagem e apoio marítimo, formalizando portanto, o segundo registro brasileiro, denominado Registro Especial Brasileiro (REB).

Nesta mesma Lei, os Artigos 4 e 11 declaram que embarcações de bandeira brasileira devem obrigatoriamente possuir dois terços da tripulação de brasileiros, o que inclui, o comandante da embarcação e o chefe de máquinas. Nas embarcações inscritas no REB, a lei define que apenas o comandante e o chefe de máquinas devem ser obrigatoriamente brasileiros.

Em 2006, a Resolução Normativa Nº 72 do Conselho Nacional de Imigração (MINISTÉRIO DO TRABALHO, 2006) complementa que, para a cabotagem é obrigatório que em um período superior a 90 dias de operação em águas jurisdicionais brasileiras, no mínimo, um quinto dos tripulantes sejam brasileiros e, para período superior a 180 dias, este número aumente para um terço para cada nível (oficiais, graduados e não graduados) e em cada ramo de atividades (convés e máquinas).

A Lei Nº 9537 (BRASIL, 2015a) caracteriza tripulante como a pessoa certificada e qualificada a exercer funções embarcado relativas à operação da embarcação. Existem

basicamente três grupos de tripulação: marítimos, fluviais. e de pesca. Para exercer função nestes grupos é necessário possuir Carteira de Inscrição e Registro (CIR), o que comprova a qualificação para o trabalho.

Existem dois centros formadores de marítimos no Brasil, o CIAGA (Rio de Janeiro) e o CIABA (Pará). Juntos, esses centros formam em torno de 350 marítimos por ano (CNT, 2013) e, de acordo com estudos realizados pela Schlumberger, o Brasil trabalha com déficit de profissionais na área devido, principalmente, à burocracia envolvida no processo de habilitação (SYNDARMA, 2011).

Neste ambiente competitivo e de poucos profissionais qualificados, existe a preocupação das armadoras em buscar o menor custo possível de alocação dos tripulantes aos navios, respeitando a regulamentação. De acordo com a bibliografia encontrada, como CARVALHO (2000) e LEGGATE (2009), o gerenciamento de tripulantes marítimos ainda é tratado de forma empírica. De acordo com pesquisas realizadas com uma armadora brasileira, existem opções de ferramentas no mercado para gerenciamento de tripulações marítimas, mas que em alguns casos, as mesmas não atendem de forma adequada as particularidades e premissas de decisão da empresa.

No caso da cabotagem no Brasil, problemas como obrigatoriedade de uma porcentagem mínima de tripulantes brasileiros nos navios, alto custo das tripulações brasileiras comparado com bandeiras de conveniência e o déficit de profissionais qualificados aumentam a complexidade do problema. Quanto maior o dinamismo da empresa embarcadora, maior o interesse em se aplicar soluções para o PPTM, ou seja, quanto maior a frequência e os pontos de embarques e desembarque, a quantidade de tripulantes, quantidade de viagens, mais complexa a execução do sistema de forma manual, justificando a necessidade de ferramentas que auxiliem para um gerenciamento adequado da tripulação.

1.2 OBJETIVOS

A dissertação tem como objetivo geral o desenvolvimento de modelos matemáticos que representem o PPTM. Este tipo de estudo contribui para um melhor conhecimento dos possíveis benefícios que ferramentas de otimização podem trazer para a área de recursos humanos de empresas armadoras de navios.

Estes modelos são variações multi-dimensionais do Problema clássico de Atribuição (PENTICO, 2007) e propõe a minimização dos custos de alocação, relacionados à permanência adicional de tripulantes nos navios, deslocamentos entre pontos de embarque/desembarque e de transferências entre embarcações.

Dentre os objetivos específicos tem-se: uma revisão bibliográfica sobre o PPT e PPTM, apontando as lacunas existentes na literatura; descrição do problema marítimo referente ao embarque/desembarque de tripulantes sob aspectos legais e financeiros; aplicação de um caso com características semelhantes à da realidade e análise das possíveis limitações dos modelos para a aplicação no contexto marítimo de forma geral.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho está dividido em seis capítulos. No primeiro, apresenta-se esta introdução que discorre sobre o contexto geral que envolve a tripulação marítima, as motivações e justificativas deste estudo, assim como os objetivos.

O Capítulo 2 propõe a análise de estudos já realizados com temas envolvendo Problema de Alocação, Otimização Combinatória, Problema de Programação de Tripulantes, Programação Inteira entre outros, destacando os principais pontos que fundamentam este trabalho e levantando aplicações do mesmo tipo de problema em outros modos de transporte.

O Capítulo 3 analisa de forma mais profunda o problema de programação de tripulantes marítimos, as regulamentações trabalhistas, os regimes de embarque, os tipos de navegação, as competências técnicas de cada categoria de tripulantes e os custos envolvidos. Também é proposto uma exemplificação do PPTM buscando um primeiro contato do leitor sobre o conceito que baseia os modelos matemáticos desenvolvidos.

O Capítulo 4 desenvolve quatro modelagens matemáticas para o problema de programação de tripulantes marítimos, considerando diferentes períodos de programação e permitindo ou não a transferência de tripulantes entre navios. Estes modelos seguem uma mesma metodologia que será apresentada no início do capítulo.

O Capítulo 5 realiza o teste dos modelos em um caso real de programação de tripulantes de uma armadora brasileira. Para respeitar a política de confidencialidade da empresa,

foram consideradas informações baseadas na realidade para verificar a consistência do modelo e de suas potencialidades.

O Capitulo 6 apresenta as conclusões finais e as recomendações evidenciadas. Por último, os apêndices destacam exercícios numéricos para facilitar a compreensão dos modelos matemáticos.

2 O PROBLEMA NA LITERATURA

O Problema de Programação de Tripulantes Marítimos pode ser entendido como uma variação do Problema clássico de Alocação, o qual, na literatura, é considerado um problema combinatorial do tipo NP-difícil (KARP, 1972; SHEN e KWAN, 2001). Durante os últimos anos foram desenvolvidas diversas variações de modelagem do problema para diferentes aplicabilidades. O trabalho de PENTICO (2007) faz uma revisão destas variações em comemoração aos 50 anos do problema, destacando as principais diferenças entre elas.

O Problema de Programação de Tripulantes (conhecido também por *Crew Scheduling Problem*) já foi alvo de estudos com aplicação em diversos modos de transporte. Inclusive o trabalho de ERNST *et al.* (2003) levantou aproximadamente 700 referências sobre aplicações do PPT categorizadas conforme a Figura 2.1.

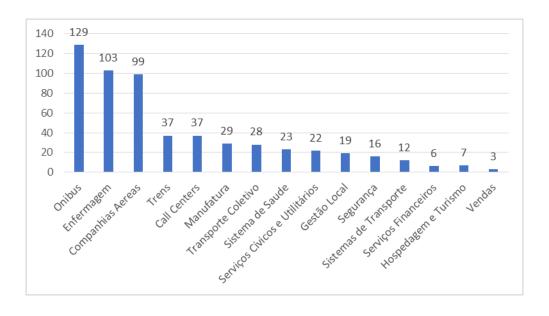


Figura 2.1: Bibliografia sobre PPT e suas diversas aplicações (ERNST et al., 2003)

Os autores salientam que de todos estes trabalhos apenas um foi levantado na área de *shipping*, o qual envolve a programação da equipe de práticos em portos (WERMUS e POPE, 1994). O trabalho propõe a busca de uma solução cuja divisão das cargas de trabalho sejam mais igualitárias, com folgas que agrupem o maior número de dias consecutivos, dentro do permitido pela legislação.

Por conta da complexidade dos problemas, em alguns casos são utilizadas técnicas heurísticas (GOMES e GUALDA, 2015) e/ou metaheurísticas, tais como *Simulated Annealing* (CAMPBELL, DURFEE e HINES, 1997), Algoritmos Genéticos (AICKLEIN, 2004), Busca Tabu (GUILLERMO e JOSÉ, 2009; CAVIQUE, REGO e THEMAIDO, 1999) na busca das soluções.

Desta forma, este capítulo busca apresentar os trabalhos envolvendo PA e PPT, dando base para o desenvolvimento dos modelos de PPTM.

2.1 PROBLEMA DE ALOCAÇÃO

Os primeiros métodos de solução para o PA foram propostos por (KUHN, 1955) por meio do método húngaro, o qual aborda uma solução específica para designar pessoas a postos de trabalho. O problema clássico é descrito como uma busca pela combinação um a um entre tarefas e agentes, cujo objetivo é minimizar o custo total de alocações. Sendo assim, seja I o conjunto de agentes, J o conjunto de tarefas e a variável de decisão $x_{ij} \in \{0,1\}, i \in I, j \in J$. Se $x_{ij} = 1$, o agente i deve ser associado a tarefa j, caso contrário, $x_{ij} = 0$. Para cada alocação possível entre um agente $i \in I$ e uma tarefa $j \in J$, existe um custo c_{ij} relacionado. As restrições básicas são que cada tarefa deve receber apenas um agente para efetivá-la e todo agente deve ser alocado a apenas uma tarefa. O problema é de programação linear e inteira, cuja modelagem está descrita abaixo.

Função Objetivo:

$$Minimizar \sum_{i \in I} \sum_{j \in I} c_{ij} x_{ij}$$
 (2.1)

Sujeito a:

$$\sum_{i \in I} x_{ij} = 1 \qquad \forall j \in J \tag{2.2}$$

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = 1 \qquad \forall i \in I \tag{2.3}$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \qquad \forall j \in I, i \in I \qquad (2.4)$$

A Função Objetivo (2.1) minimiza o custo total de alocação. As Restrições (2.2) indicam que cada tarefa será realizada por um único agente e as Restrições (2.3) garantem que cada agente será alocado a uma única tarefa. Por último, as Restrições (2.4) definem o domínio das variáveis de decisão.

Uma das variações citadas no estudo de PENTICO (2007) é a de problemas de alocação multidimensionais. Este tipo de problema busca a combinação de três ou mais conjuntos, ou seja, além de envolver os agentes e as tarefas, é possível associar dimensões como tempo, espaço, entre outros (PIERSKALLA, 1968).

O problema de alocação tridimensional é o mais encontrado, e é abordado no trabalho de GILBERT e HOFSTRA (1988), BURKARD e ÇELA (1999), ÇELA (2002) e SPIEKSMA (2000) de duas maneiras: problemas de alocação tridimensional planares e axiais.

Para exemplificação, considere o seguinte problema: uma empresa marcou diversos horários para atender um conjunto de clientes. Considere $r \in R$ o conjunto de vendedores, $c \in C$ o conjunto de clientes e $t \in T$ o conjunto de horários de atendimento, Seja também a quantidade de integrantes de cada grupo dada por $|R| \ge |C| \ge |T|$. Portanto, considere $x_{qpr} \in \{0,1\}$ a variável de decisão tal que, se $x_{qpr} = 1$, o vendedor r vai se encontrar com o cliente c no horário t. Cada variável de decisão x_{qpr} possui um custo relacionado. O modelo matemático para o PA tridimensional planar para este problema são dadas em sequência.

Função Objetivo:

$$Minimizar \sum_{r \in R} \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} c_{rct} x_{rct}$$
 (2.5)

Sujeito a:

$$\sum_{r \in \mathbb{R}} x_{rct} = 1 \qquad \forall c \in C, t \in T \qquad (2.6)$$

$$\sum_{c \in C} x_{rct} \leq 1 \qquad \forall \ r \in R, \ t \in T \qquad (2.7)$$

$$\sum_{t \in T} x_{rct} \leq 1 \qquad \forall \ r \in R, c \in C \qquad (2.8)$$

$$x_{rct} \in \{0,1\}$$
 $\forall r \in R, c \in C, t \in T$ (2.9)

A Função Objetivo (2.5) minimiza o custo total de atendimentos dos clientes por vendedores. As Restrições (2.6) indicam que a cada horário de atendimento, cada cliente será tendido por um único vendedor, as Restrições (2.7) garantem que a cada horário de atendimento, cada vendedor poderá atender no máximo um cliente e as Restrições (2.8) garantem que cada cliente poderá ser atendido por cada vendedor do grupo em no máximo um horário disponível. Por último, as Restrições (2.9) definem o domínio das variáveis de decisão.

Na abordagem axial, a função objetivo tem o mesmo significado, porém as restrições são diferentes. O modelo matemático para deste tipo de PA tridimensional seria dado por:

Função Objetivo:

$$Minimizar \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R} c_{rct} x_{rct}$$
 (2.10)

Sujeito a (2.9) e:

$$\sum_{c \in C} \sum_{t \in T} x_{rct} \le 1 \qquad \forall \ r \in R$$
 (2.11)

$$\sum_{t \in T} \sum_{r \in R} x_{rct} \le 1 \qquad \forall c \in C$$
 (2.12)

$$\sum_{c \in C} \sum_{r \in R} x_{rct} = 1 \qquad \forall t \in T$$
 (2.13)

Nesta caso a função objetivo (2.10) continua sendo a minimização de custos com a alocação do atendimento dos clientes. As Restrições (2.11) garantem que um vendedor pode atender no máximo um cliente em todo o período de tempo. As Restrições (2.12) garantem que cada cliente será atendido no máximo por um vendedor em todo período de tempo. As Restrições (2.13) indicam que existe cada cliente será atendido por um único vendedor a cada período de tempo.

Estas duas abordagens tratam de problemas tridimensionais e de forma bastante semelhante podem ser realizadas modelagens para problemas multidimensionais. O contexto do problema que dita quais os tipos de restrições (axiais e/ou planares) que devem ser expressas para a garantia de representação da realidade. O algoritmo de *branch and bound* é o mais clássico para solução do PA, sendo o trabalho de PIERSKALLA (1968) o pioneiro no desenvolvimento de uma solução deste tipo (BURKARD e ÇELA, 1999).

2.2 PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO DE TRIPULANTES

O PPT já foi estudado para alocação de jornadas de trabalho para motoristas de ônibus (SENNE, MÉLLO e LORENA, 2006), caminhão (CAMPBELL, DURFEE e HINES, 1997), trens (FRELING, LENTINK e ODIJK, 2001), metrô (SHODI, e NORRIS, 2004) e para companhias aéreas. De acordo com KOHL e KARISCH (2004) e GOPALAKRISHNAN e JOHNSOS (2005), depois do custo do combustível, o custo com tripulação no transporte aéreo, é o segundo maior impactante no total operacional. Uma redução mínima no custo com a tripulação pode garantir uma economia anual na casa dos milhões para companhias aéreas de grande porte (GERSHKOFF, 1989). No caso da navegação marítima, este custo também está entre os mais altos, principalmente quando a embarcação respeita às legislações trabalhistas de países da Europa, EUA e Brasil (VELASCO e LIMA, 1997).

Os trabalhos de GOPALAKRISHNAN e JOHNSOS (2005) e GOMES (2009) explicam detalhadamente os passos utilizados para o planejamento operacional de companhias aéreas, como ilustrado na Figura 2.2. O primeiro passo é realizar a programação de viagens ou *Schedule Generation Problem*, que atenda à demanda do mercado, buscando a maximização da receita gerada para a empresa.

O segundo passo envolve a definição da frota e dos veículos que vão realizar as viagens definidas pelo passo anterior. Isso depende no caso de companhias aéreas de restrições aeroportuárias, capacidade das aeronaves, autonomia de voo e da necessidade de manutenções nos períodos de parada. No caso de empresas de navegação, restrições de calado, por exemplo, definem quais embarcações podem, ou não, fazer determinadas rotas e entrar em determinados terminais e portos.



Figura 2.2: Planejamento Operacional de companhias de transporte aéreo Fonte: Adaptação do texto de (KOHL e KARISCH, 2004)

O terceiro passo, por fim, é a programação da tripulação de acordo com as viagens e veículos determinados anteriormente, conhecido também como Problema de Programação de Tripulação, ou o *Crew Scheduling Problem*.

No contexto aéreo, o PPT é composto de dois subproblemas, os quais podem ser resolvidos sequencialmente ou de forma integrada (GOMES, 2009). O primeiro é chamado de Problema de Determinação de Viagens (PDV ou *Crew Pairing*), no qual definem-se os sequenciamentos de jornadas viáveis de acordo com restrições de tempo, espaço e de normas trabalhistas. No contexto aéreo, define-se como jornada um conjunto de voos subsequentes, e uma viagem como uma composição de jornadas das quais o tripulante sai de sua base e retorna à mesma cumprindo as jornadas de trabalho e os descansos devidos entre elas, representados na Figura 2.3.

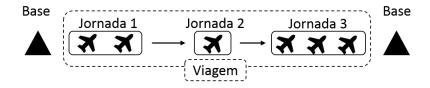


Figura 2.3: Comparação entre termos no contexto aéreo Fonte: Elaboração Própria

Em sequência, o segundo subproblema a ser resolvido é o Problema de Atribuição de Escalas (PAE ou *Crew Rostering/Assignment*), que também é dividido em duas parcelas: a primeira é a definição das escalas possíveis para depois realizar a designação das mesmas aos tripulantes, com base nas viagens/embarques determinadas no PDV conjuntamente com outras atividades que devem ser feitas como treinamentos, procedimentos de saúde, folgas, férias, entre outros. Esta atribuição pode ser aleatória, de acordo com a solução mais econômica, ou ser feita de forma personalizada.

A Figura 2.4 resume a dinâmica do PAE que possui objetivos que podem considerar, por exemplo, os custos, distribuição do trabalho e satisfação dos tripulantes e um conjunto de restrições relativas à regulamentação vigente, histórico da tripulação e tarefas a serem cumpridas.



Figura 2.4: Dinâmica do Problema de Atribuição de Escala Fonte: Adaptação do texto de KOHL e KARISCH (2004)

Em paralelo com o caso marítimo, cada tripulante possui uma rotina de trabalho diária correspondente à sua categoria, no qual permanece um período de horas trabalhando, e depois tem o direito de repousar nos aposentos e nas áreas comuns do navio. Este tipo de trabalho exige confinamento em alto mar, e seu desembarque está diretamente atrelado ao regime daquele navio. No caso de motoristas de ônibus ou tripulantes de avião, depois de cumprir a sua escala de trabalho, o tripulante volta para sua base, significando o seu "desembarque" do veículo de transporte, o que não ocorre da mesma maneira e com a mesma frequência com tripulantes de embarcações. Neste sentido, o termo escala não é aplicável da mesma forma, o PPTM descrito na Figura 2.4 se resume a um PA.

Devido ao confinamento gerado no contexto aéreo, empresas europeias já aplicam conceitos de escala personalizada (*personalized rostering*), no qual é dada maior importância à satisfação do tripulante com suas condições de trabalho e envolvimento com a equipe, considerando na otimização variáveis de preferência da tripulação (KOHL; KARISCH, 2004).

Portanto verifica-se que em diversos modos de transporte o PPT e as ferramentas de apoio à decisão já são aplicadas, enquanto que, de acordo com CARVALHO (2000) e com as entrevistas realizadas durante o desenvolvimento desta pesquisa, na indústria

naval isso ainda não é uma realidade. Da mesma forma, poucos são os trabalhos acadêmicos encontrados sobre o assunto, percepção salientada pelos trabalhos de CARVALHO (2000), GIANCHETTI *et al.* (2013), JOHN, BÖTTCHER e JAHN (2013) e LEGGATE (2009).

Da mesma forma como existem similaridades entre os dois modos, tais como: restrições sobre qualificações, quantidade mínima de tripulantes, trabalho em confinamento, entre outros; existem diferenças que provavelmente tem impedido a aplicação de técnicas de otimização no contexto marítimo como, por exemplo, o tamanho das viagens (JOHN, BÖTTCHER e JAHN, 2013), dificuldade de previsão adequada das datas e dos locais de chegada e saída de tripulantes, e uma possível resistência natural daqueles que não conhecem o sistema (KUMAR, BIERLAIRE e GALLAY, 2010).

O trabalho de GIANCHETTI *et al.* (2013) foi o que mais se aproximou dos objetivos deste estudo, e trata de um modelo criado para a programação de tripulantes de cruzeiros. Um navio desse tipo possui em média entre 1000 e 1500 membros, que normalmente são contratados em vários pontos do mundo. Neste caso, um dos custos mais expressivos da companhia é a movimentação de pessoal entre o navio e o ponto de referência (moradia).

GIANCHETTI *et al.* (2013) aponta também dois pontos interessantes: novamente a falta de estudos acadêmicos encontrados e o fato de que nenhuma empresa de cruzeiros da Flórida utiliza métodos de otimização. O trabalho envolve tanto o planejamento de contratação de pessoas como uma programação de embarque/desembarque do *staff* considerando para isso incertezas como *no-shows*, saídas/entradas antecipadas/atrasadas, entre outros.

Outro trabalho interessante é o de JOHN, BÖTTCHER e JAHN (2013) que busca um planejamento para a tripulação que atenda a demanda considerando fixar um mínimo período de tempo entre a saída de dois tripulantes de categorias de grande responsabilidade a fim de garantir menores riscos de falhas de operação por erro humano.

Verifica-se que de uma maneira geral, a qualidade do gerenciamento dos tripulantes interfere diretamente na qualidade do trabalho das pessoas, assim como na operação do

navio. Desta forma, quanto melhor for feita a programação destas pessoas, dentro das expectativas de cada um, é esperado uma maior fidelidade e comprometimento com relação ao seu trabalho. Os tripulantes marítimos permanecem longos períodos confinados a um mesmo ambiente e a um mesmo grupo de pessoas. Por essa razão, existem estudos como o de BERG, STORGÅRD e LAPPALAINEN (2013) que apontam que cerca de 80% dos acidentes em alto mar são devidos a fatores humanos como: diferenças entre culturas, comunicação e língua, cansaço, entre outros. Neste mesmo estudo é ressaltada a importância de um treinamento envolvendo a compreensão frente às outras culturas, assim como o desenvolvimento do Inglês como língua comum (caso a tripulação seja multinacional).

Outro trabalho publicado por JOHN e GAILUS (2014) contribui com um sistema de decisão para planejamento do recrutamento de tripulação para médio e longo prazo. Os autores expõem no trabalho como que o gerenciamento de tripulação encara condições bastante voláteis, com grandes volumes de informação. A grande dificuldade de sistemas que busquem um melhor planejamento da quantidade de tripulantes disponíveis é ajustar a capacidade de pessoas para um longo prazo cumprindo a demanda do curto prazo.

2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentadas diversas referências bibliográficas que deram base para o entendimento do PPTM, e das suas semelhanças e diferenças com o PA e o PPT aplicados a outros modos de transporte. O PPTM é uma variação multidimensional do *Assignment Problem* que pode buscar a correspondência de informações como pessoas, categorias de trabalho, tempo, espaço, navios, entre outros.

Verificou-se que a indústria naval quase não utiliza ferramentas de otimização voltadas para recursos humanos. Foram levantados alguns possíveis fatores que possam levar a este fato: longos períodos de viagem, resistência dos gestores, falta de previsibilidade da chegada e saída dos navios dos portos, entre outros. E é bastante citada na literatura de temas sobre gerenciamento de tripulação, a dificuldade de se encontrarem trabalhos acadêmicos específicos sobre otimização de embarque e desembarque.

3 PARTICULARIDADES DO PROBLEMA MARÍTIMO

Este capítulo tem como principal objetivo apresentar o PPTM, detalhando melhor as suas características, a regulamentação e divisão trabalhista e como é realizado o gerenciamento da tripulação nos dias atuais. Com essa finalidade, divide-se o capítulo em três seções: a primeira apresenta características gerais do trabalho marítimo; a segunda as principais características que envolvem o problema de programação destes tripulantes; e por último, as considerações finais do capítulo.

3.1 TRABALHO MARÍTIMO

O tripulante marítimo é aquele que está habilitado e certificado pelas Autoridades Marítimas a realizar atividades a bordo de embarcações (BRASIL, 1997a). Ao embarcarem, os tripulantes ficam subordinados ao Comandante, figura de autoridade máxima do navio, que possui responsabilidade tanto sob a embarcação, como sob as pessoas em seu comando, garantindo condições de trabalho adequadas conforme os artigos 248 a 252 da Consolidação das Leis do Trabalho (CLT).

Os tripulantes responsáveis pela operação do navio devem estar referenciados na lista de tripulação do mesmo, documento oficial entregue às autoridades competentes para a entrada, permanência e saída do navio dos portos (BRASIL, 1977c).

O navio possui uma quantidade mínima de tripulantes embarcados para cada função, definida pela Capitania dos Portos por meio do cartão de tripulação de segurança (CTS). Esta definição busca a garantia de segurança das pessoas, do navio e do meio ambiente, contidos na resolução A-890 (INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION, 1999). Caso a empresa perceba a necessidade de uma equipe maior, pode ser emitido o cartão de tripulação operacional (CTO), que garante uma quantidade entre o mínimo de tripulantes do CTS e o máximo permitido pelo cartão de lotação do navio (CL). O navio não pode operar com uma quantidade de tripulantes inferior ao limitado pela CTS, nem ultrapassar a lotação máxima do mesmo.

A Organização Internacional do Trabalho (ILO) foi a primeira agência da Organização das Nações Unidas (ONU) a estabelecer uma convenção voltada à regulamentação do trabalho marítimo. Em sequência criou-se uma agência específica, a Organização Marítima Internacional (IMO), que passou a assumir as regulamentações trabalhistas,

ambientais e de segurança à navegação. O resultado disso culminou em 1978 na convenção sobre Normas de Formação, de Certificação e de Serviço de Quartos para os Marítimos (STCW, 1978), que define os requisitos mínimos de formação e os critérios de certificação para o trabalho embarcado.

Esta convenção define as regras e normas de certificação dos trabalhadores marítimos não mais pelo tipo de navegação realizado, mas sim pelo porte do navio e pela potência das máquinas propulsoras. Esta convenção foi ratificada pelo Brasil apenas em 1985 devido ao tempo de adequação dos profissionais às novas regras.

Em 1998 foi promulgada uma coletânea de portarias normativas pela Diretoria de Portos e Costas (DPC), denominadas NORMAN. De acordo com a NORMAN 13 (MARINHA DO BRASIL, 2013), os tripulantes podem ser classificados, de acordo com suas certificações, conforme a estrutura da Tabela 3.1, as quais são definidas mais detalhadamente a seguir.

Tabela 3.1: Categorias de Tripulantes

Seção	Categoria	Sigla
	Capitão de Longo Curso	CLC
	Capitão de Cabotagem	ССВ
	Primeiro Oficial de Náutica	1ON
	Segundo Oficial de Náutica	2ON
CONVÉS	Mestre de Cabotagem	MCB
	Contramestre	CTR
	Marinheiro de Convés	MNC
	Moço de Convés	MOC
	Marinheiro Auxiliar de Convés	MAC
	Oficial Superior de Maquinas	OSM
	Primeiro Oficial de Maquinas	1OM
	Segundo Oficial de Maquinas	2OM
MÁOUINAC	Condutor de Maquinas	CDM
MÁQUINAS —	Eletricista	ELT
	Marinheiro de Maquinas	MNM
	Moço de Maquinas	MOM
	Marinheiro Auxiliar de Maquinas	MAM
SAÚDE —	Enfermeiro	ENF
SAUDE	Auxiliar de Saúde	ASA
CÂMARA	Taifeiro	TAA
CAMAKA	Cozinheiro	CZA

Fonte: (MARINHA DO BRASIL, 2013)

As categorias de tripulantes são definidas pelas certificações de cada um, o que autoriza que estas assumam algumas funções dos navios, as quais são descritas abaixo:

- Comandante: oficial náutico de máxima autoridade do navio, responsável pelo gerenciamento e segurança do navio, da carga e das pessoas a bordo (BRASIL, 2015a). Esta função só pode ser assumida por profissionais da categoria de capitão de longo curso;
- Imediato: oficial de carreira náutica responsável por chefiar as atividades do convés, a gestão da carga e a coordenação de segurança do navio. Em casos extremos de incapacidade, impedimento ou morte do comandante, o imediato é

- quem assume o comando da embarcação. Esta função pode ser assumida por profissionais das categorias de capitão de longo curso e capitão de cabotagem;
- Oficial de Náutica: oficial responsável pela navegação. Além desta função principal, podem ser designadas outras tarefas específicas como controle de higiene, serviços básicos de saúde, tarefas administrativas, entre outros. Esta função pode ser assumida por profissionais das categorias de capitão de longo curso, capitão de cabotagem, 1º oficial de náutica e 2º oficial de náutica;
- Chefe de Máquinas: é o oficial da carreira de máquinas, responsável por chefias a seção de máquinas do navio, supervisionando a condução e manutenção dos sistemas de propulsão e de produção de energia da embarcação. Esta função pode ser assumida por profissionais da categoria de oficial superior de máquinas;
- Oficial de Máquinas: oficial que realiza os serviços de máquinas do navio, podendo receber funções específicas de manutenção especializada. Esta função pode ser assumida por profissionais das categorias de oficial superior de máquinas, 1º oficial de máquinas e 2º oficial de máquinas;
- Subalternos (convés/máquinas): são os outros tripulantes de mestragem e marinhagem, que seguiram carreiras de náutica ou de máquinas e que realizam o apoio específico aos trabalhos de suas respectivas áreas. São subalternos de convés os tripulantes das categorias de mestre de cabotagem, contramestre, marinheiro de convés, moço de convés e marinheiro auxiliar de convés, e de máquinas os tripulantes das categorias de condutor de máquinas, eletricista, marinheiro de máquinas, moço de máquinas e marinheiro auxiliar de máquinas; e
- Saúde e Câmara: são profissionais que cuidam da saúde e do bem-estar dos tripulantes, com tarefas de enfermagem, cozinha, limpeza e organização do navio.

Cada navio respeita a legislação referente ao país da sua bandeira. Os prazos dos contratos de trabalho podem ser por tempo determinado ou indeterminado de acordo com a bandeira e filosofia da empresa.

Grande parte dos países utilizam bandeiras de conveniência para diminuírem custos, dado que as legislações trabalhistas das bandeiras mais encontradas (Panamá, Bahamas,

entre outros) normalmente são mais amenas. Contratos são realizados sem considerarem necessariamente períodos de folga, ou seja, é acordado que o tripulante vai embarcar por um período continuo de dias, e ao término de seu embarque não existem mais obrigações trabalhistas entre as duas partes. Nesta modalidade contratual o tripulante é contratado para permanecer embarcado por um período de tempo sem direitos a folgas durante o período acordado. Ao final deste período cabe ao tripulante decidir aceitar outro contrato de embarque logo em sequência ou gozar de um período de folgas.

No exemplo brasileiro, o contrato de trabalho marítimo é regido pela consolidação das Leis de Trabalho (CLT). O Art. 442 da CLT conceitua contrato de trabalho como um vínculo regido, entre outros, pelo princípio da continuidade das relações trabalhistas. Desta forma, no contexto brasileiro os contratos são realizados com prazos indeterminados, a menos de casos específicos e não menos comuns de contratos de viagens fechadas.

Desta forma o armador deve prever no seu vínculo empregatício férias e folgas, as quais são devidamente formalizadas juntamente aos sindicatos responsáveis, por meio dos acordos coletivos. Estes acordos são complementares às leis trabalhistas.

O regime de embarque é dado pela proporção de dias que o tripulante deve ficar embarcado pela quantidade de dias que o mesmo tem direito de folgar. O regime é definido pela armadora em comunhão com os órgãos sindicais, considerando o tipo de navio e a intensidade de trabalho a bordo demandado. A embarcação passa a ser o ambiente de trabalho e de moradia da tripulação. O intervalo de tempo entre o embarque e desembarque pode variar de período de acordo com o tipo da embarcação. A Tabela 3.2 mostra exemplos de regimes de embarque praticados pelo mercado.

Tabela 3.2: Regimes de Embarque

Tipo de Navio	Regime
Navio cisterna, FSO ou rebocador	35/35
Navio DP e oleeiro	60/30
Navio de longo curso	120/60
Navio de longo curso (America Latina) e outros (cabotagem)	90/45

Fonte: TRANSPETRO (2013)

Os navios da Tabela 3.2 são listados a seguir com suas principais funções (TRANSPETRO, 2013):

- Navio cisterna e FSO: são utilizados para armazenamento de líquidos, como água e combustíveis;
- Navio rebocador: são embarcações menores de grande manobrabilidade, dotadas de sistemas propulsores potentes. São embarcações utilizadas para auxiliar em manobras de atracação, desatracação de navios maiores e barcaças;
- Navio DP: são navios com posicionamento dinâmico, que garantem aproximações mais seguras de plataformas de petróleo. São bastante utilizados no alivio de plataformas;
- Navio oleeiro: s\u00e3o embarca\u00f3\u00f3es de transporte de combust\u00edvel para consumo de outros navios maiores; e
- Navio de cabotagem e longo curso (EUA/Asia/Europa e América Latina): navios de transferência de produtos, que permanecem boa parte do tempo navegando.

Portanto, com relação à Tabela 3.2, navios que permanecem longos tempos em navegação, que possuem uma carga de trabalho mais bem distribuída entre os tripulantes e que realizam menos operações, possuem períodos mais extensos de embarque, como é o caso dos petroleiros de cabotagem, cujo regime é dado por 90 dias embarcados para 45 dias em terra. Do outro lado, navios como rebocadores, cujo trabalho leva a um esgotamento físico e mental mais rápido das pessoas, possuem períodos menores de embarque para períodos maiores de folga. O objetivo do regime é garantir que acidentes não ocorram por conta da fadiga humana.

O tempo de embarque é contabilizado normalmente a partir da volta do tripulante de seu período de folga, iniciando em zero e somando 1 a cada dia que o mesmo permanece embarcado. Caso o navio seja embarcado em outro navio, dentro do mesmo período de embarque, a contabilização é feita sequencial ao navio anterior. É desejável pela armadora que o mesmo permaneça embarcado o máximo de tempo possível, sem que ultrapasse o período acordado pelo regime, para não gerar custos com adicional de embarque.

Normalmente, tripulantes que são desembarcados muito próximos de cumprirem ou que já cumpriram seu regime embarcados são direcionados diretamente para repouso. Aqueles que são desembarcados, mas ainda apresentam um período considerável de dias para atingirem o regime, podem ser embarcados em outros navios, aproveitando viagens menores. O tempo de folga que o tripulante tem direito é cumulativo, ou seja, é o tempo remanescente de outras viagens anteriores (caso tenham sobrado folgas) somado ao tempo referente à proporção do regime da viagem atual. Cada dia em casa desconta um dia de tempo de folga, até que o período da proporção seja atendido e o tripulante fique disponível para embarcar novamente.

O cálculo salarial dos tripulantes também varia de acordo com a empresa, sendo definidos nos acordos coletivos. Em sua maioria é contabilizada de uma soldada básica (salário básico) somada a diversas gratificações e benefícios, como pode ser visto no acordo da TRANSPETRO (2013). As gratificações e adicionais não são previstos pela lei, e são resultados de acordos coletivos. Dentre elas: horas-extras, remuneração em período de repouso, adicional noturno, insalubridade, periculosidade, despesas de viagem, participação nos lucros, auxílios educativos, bônus por tempo de empresa, entre outros. A maior parte destes adicionais acabam sendo "fixos" por serem adicionais relacionados ao trabalho em si (embarcado, confinado e em área de risco). Os custos "variáveis" são os principais alvos de programas de contenção de custos.

A hora-extra no trabalho embarcado é encontrada de duas formas nos acordos coletivos: como as horas que excedem a jornada de trabalho diária do tripulante; ou como adicionais de embarque, referentes a dias que os tripulantes permanecem embarcados a mais do seu regime.

Algumas empresas pagam mensalmente uma quantidade de horas-extras fixas, inclusive em meses que o tripulante não registra o trabalho à mais (períodos de férias e folgas como exemplo) como forma de "compensação" pelas vezes que é necessária a permanência do mesmo por mais dias embarcados, ou por jornadas mais extensas. Outras empresas, fazem o registro dos dias embarcados a mais e realizam o pagamento de uma gratificação referente ao tempo a mais trabalhado.

Este custo de adicional de embarque pode: ser resultado de uma falha de planejamento de contratação de tripulantes, fazendo com que a empresa trabalhe com menos funcionários e tenha que mantê-los embarcados por períodos mais longos; ou também pode ser resultado de uma má programação.

De acordo com LEGGATE (2009) e CARVALHO (2000) e de entrevistas realizadas durante o desenvolvimento desta pesquisa com a empresa de navegação, a programação de tripulantes marítimos ainda é realizada de forma bastante empírica pelas empresas, muitas vezes não considerando a utilização de ferramentas de otimização para a busca do menor custo. Os motivos que levam a isso podem ser diversos: falta de ferramentas que auxiliem de forma personalizada a programação de cada empresa, falta de registros e controles efetivos dos dados de entrada, a imprevisibilidade de alguns eventos (atrasos para atracação nos portos, embarque e desembarques emergenciais, questões pessoais dos tripulantes, filosofia da empresa), entre outros.

Existem aplicativos computacionais comerciais que implementam métodos de solução para este tipo de problema (CrewInspector, ShipManager Crewing, entre outros), permitindo uma melhor gestão dos tripulantes, inclusive para gerenciamento marítimo e, de acordo com BUSSÖW e JOHN (2013), uma maior automatização gerada por sistemas integrados de planejamento e programação de tripulação vão ser chaves para os desafios logísticos competitivos da indústria marítima. Entretanto, de acordo com as entrevistas realizadas durante o desenvolvimento desta pesquisa, muitos destes aplicativos computacionais pré-montados não atendem às demandas por não serem flexíveis o suficiente para incorporar todas as restrições.

3.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO DE TRIPULANTES MARÍTIMOS

O PPTM trata de um Problema de Alocação, no qual, dado um conjunto de navios, um conjunto de tripulantes de cada categoria e um conjunto de pontos de referência de cada tripulante, o objetivo consiste em designar para onde cada tripulante deve seguir no período de programação, de acordo com o tempo de embarque e de folga de cada um, de tal maneira que uma função seja minimizada.

O objetivo desse problema pode ser explorado de diversas formas: buscando o menor custo para a empresa (como descrito na Seção 1.2), a maior satisfação dos tripulantes com a carga horária ou uma combinação de ambos, por exemplo.

Diferentemente da programação de outros modos de transporte, os tripulantes marítimos não são programados com muita antecedência, normalmente uma semana ou quinze dias antes. Isso ocorre primeiramente por permanecerem longos períodos de tempo na embarcação, segundo pela probabilidade de ocorrerem atrasos ou adiantamentos na chegada dos navios aos portos. Outro motivo é que, a menos dos *liners* (embarcações com rotas bem definidas), muitos navios, por exemplo petroleiros, podem não ter uma previsão das rotas em prazos maiores, por dependerem dos diversos pontos de demanda de produto pelo mercado.

Em condições regulares os tripulantes realizam embarque e desembarque quando o navio está atracado, em algumas situações específicas (por exemplo, atraso na liberação dos berços) isso também pode ocorrer quando o navio está fundeado na região portuária por meio de embarcações menores de apoio.

Os tripulantes com necessidade de desembarque são aqueles que, se permanecerem no mesmo navio por mais uma viagem, vão acabar ultrapassando o seu período de regime. Em muitas empresas, isso significa que a pessoa tem direito a receber a cada dia a mais embarcado, o adicional de embarque. Para evitar isso, avalia-se a possibilidade de desembarcar o tripulante para sua casa (ou ponto de referência) ou a sua transferência para outro navio que vá executar uma viagem menor.

Os pontos de referência são locais combinados entre o armador e o tripulante com o qual a empresa se responsabiliza com todas as movimentações necessárias do tripulante para chegar ao ponto de referência ou aos navios.

Quando se programa a saída de um tripulante, deve-se garantir que outro da mesma categoria esteja planejado para assumir a sua posição, não permitindo que o navio fique com menos tripulantes que o indicado na CTS. A passagem de serviço de um tripulante a outro é o momento de troca de informações entre aquele que está desembarcando e o que deve embarcar para assumir a continuidade do trabalho. Este tempo pode variar de acordo com o tempo de experiência dos tripulantes, com o grau de afinidade dos mesmos com os navios, com as ocorrências apresentadas recentemente, entre outros.

Os tripulantes de um mesmo navio embarcam e desembarcam em momentos diferentes, não sendo aconselhável a movimentação da equipe inteira de um mesmo navio por questões técnicas de segurança da operação, principalmente quando são de grande responsabilidade e com trabalhos afins (por exemplo, comandante e imediato).

A Tabela 3.3 mostra um exemplo resumido do problema de programação de tripulantes marítimos. São quatro navios, os quais tem previsão de ficarem atracados nos dias referenciados pelas células cinzas. Cada navio apresenta a necessidade de desembarque ilustrada pelas pessoas da categoria preta, cinza e azul. Os mesmos tripulantes são ilustrados com necessidade de desembarque em todo período do navio atracado, mostrando que, permanecendo naquela embarcação, será pago aos mesmos adicionais na próxima viagem. Se existir o desembarque de um tripulante, automaticamente deverá ser programado um embarque para que o navio não fique desassistido.

Tabela 3.3: Exemplo de necessidade de desembarque

Navio\Dia	0	1	2	3	4	5
0	* *	* *	* *	* *		
1		*	*	*		
2						
3				*	*	*
Tripulantes em casa	*	^	.	•		**

Em uma situação que considere a possibilidade de: manter tripulantes nos navios, trazer tripulantes novos de casa, desembarcar tripulantes para seus pontos de referência e transferir pessoas entre navios, pode-se verificar as seguintes conclusões iniciais:

- Não existe outro tripulante da categoria cinza que possa substituir o que necessita desembarcar do Navio 0, portanto certamente o mesmo será mantido na embarcação para mais uma viagem, independente do seu custo;
- Existe um tripulante da categoria azul em casa em todo o período de programação, portanto deve-se avaliar para o Navio 1 o que é mais econômico: manter o tripulante que já está embarcado ou desembarca-lo, trazendo o que está em casa para a embarcação no mesmo dia;
- O Navio 2 não está atracado no período de programação definido, portanto não participa da otimização;
- Não existe nenhum tripulante da categoria preta disponível em casa para embarcar no Navio 0, porém no dia 3 verifica-se que o Navio 3 atraca e precisa desembarcar um tripulante desta mesma categoria. Portanto, para o Navio 0 é avaliada a possibilidade de manter o tripulante da categoria preta em seu navio ou receber a transferência do tripulante do Navio 3; e
- O Navio 3 pode decidir manter o tripulante da categoria preta no navio, ou receber o tripulante que está disponível em casa nos dias 4 e 5 e desembarcar o seu para casa (ou para o Navio 0 no dia 3), ou receber em qualquer um dos dias que está atracado, a transferência do tripulante da categoria preta vindo do Navio 0.

O exemplo da Tabela 3.3 já traz algumas abordagens interessantes e demonstra de uma forma simplificada o que deve ser esperado como solução da programação de embarque e desembarque. Sendo assim, os modelos apresentados no Capítulo 4 buscam minimizar o custo total relativo a estas movimentações exemplificadas.

3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentadas diversas características do trabalho embarcado, da sua organização, da legislação trabalhista, e algumas definições importantes para o desenvolvimento do presente estudo como: regime de embarque, pontos de referência, adicional de embarque, entre outros. Ao final foi dado um exemplo para ilustrar uma

percepção inicial do problema de programação de tripulantes marítimos, que por diversos motivos, é diferente da programação de tripulantes de outros problemas associados a outros modos de transporte.

Verificou-se que existem aplicativos computacionais no mercado que buscam o gerenciamento e a otimização de embarque e desembarque, mas algumas empresas encontram dificuldades de incorporar todas as restrições necessárias para que um algoritmo possa indicar a melhor solução. É importante que os mesmos incorporem não somente a busca pelo menor custo (alvo deste estudo) mas também questões de comportamento humano dado a especificidade deste tipo de trabalho.

4 MODELAGEM MATEMÁTICA PROPOSTA

Com base na revisão de literatura e nas particularidades do problema de programação de embarque e desembarque de tripulantes marítimos, este capítulo apresenta a modelagem matemática proposta. Para tanto, este capítulo se inicia com uma introdução sobre a metodologia utilizada, assim como as principais premissas, seguidas de quatro modelos matemáticos que foram desenvolvidos de maneira gradativa: (1) um dia de programação sem a possibilidade de transferência de tripulantes; (2) um dia de programação com a possibilidade de transferência de tripulantes; (3) período de programação com a possibilidade de transferência de tripulantes; e (4) período de programação com a possibilidade de transferência de tripulantes. Nos Apêndices I, II, III, IV são encontrados pequenos exemplos didáticos que ilustram o desenvolvimento destes modelos.

4.1 METODOLOGIA E PREMISSAS

A busca pela programação de embarque e desembarque de tripulantes marítimos com o menor custo segue uma mesma metodologia para os quatro modelos estudados. Esta metodologia, ilustrada na Figura 4.1, é composta por três módulos: definição dos dados de entrada (Passos de 1 a 5), modelagem matemática (Passo 6) e busca da solução (Passo 7).

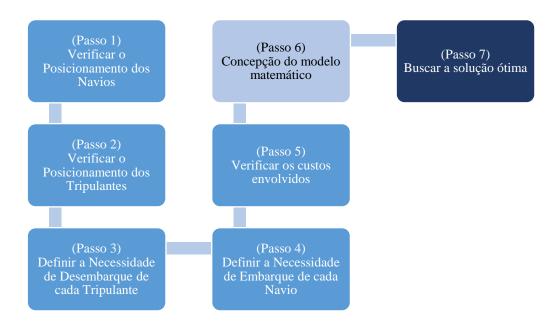


Figura 4.1: Busca da Solução do Problema de Programação de Tripulantes Marítimos

O Passo 1 da metodologia consiste em obter os dados de entrada e o posicionamento dos navios. A programação de embarque e desembarque de tripulantes marítimos é planejada apenas quando os navios se encontram atracados ou em área de fundeio, ficando claro que situações de emergência não são incorporadas nos modelos matemáticos propostos. Portanto para cada dia a ser programado é necessário definir para toda a frota ativa, se a previsão é que o navio esteja atracado ou não.

A Tabela 4.1 mostra um exemplo de uma frota de quatro navios e um período de programação de seis dias. As células sombreadas indicam os dias dentro do período de programação que os navios estão atracados em algum porto/terminal. Neste exemplo apenas o Navio 2 não esteve atracado neste período.

Tabela 4.1: Previsão de disponibilidade dos navios para a programação

Navio\Dia	0	1	2	3	4	5
0						
1						
2						
3						

O Passo 2 da metodologia busca o posicionamento dos tripulantes. Estão disponíveis para a programação apenas aqueles que estão embarcados e os que estão aguardando embarque. Marítimos em treinamento, férias, folga ou licença, somente serão considerados a partir do momento que estiverem aptos ao trabalho novamente. Verificase também em qual navio cada tripulante está embarcado (Tabela 4.2), assim como a disponibilidade de tripulantes em terra (Tabela 4.3) no período de programação.

No exemplo da Tabela 4.2, são consideradas apenas duas categorias de tripulantes, 0 e 1 que representam, por exemplo, as categorias de comandantes e moços de convés. Na categoria 0 existem 4 tripulantes, dos quais o tripulante 0 está embarcado no navio 0, conforme indicado pela célula sombreada. O Navio 2 possui dois tripulantes da categoria 1 embarcados, o 1 e o 5.

Tabela 4.2: Previsão de alocação dos tripulantes embarcados

Categoria	0					1	1					
Navio\ Tripulante	0	1	2	3	0	1	2	3	4	5	6	7
0												
1												
2												
3												

A Tabela 4.3 segue o mesmo conceito e indica quais tripulantes estão disponíveis em terra a cada dia da programação. Estes tripulantes estão em seus respectivos pontos de referência, aguardando apenas a chamada da empresa com as informações do seu próximo embarque. Por exemplo, no dia 4 estão disponíveis em terra para embarque o tripulante 6, 7, 8 e 9 da categoria 0 e os tripulantes 9 e 10 da categoria 1.

Verifica-se que diariamente tripulantes ficam disponíveis (no caso do tripulante 8 do dia 1 para o dia 2) e indisponíveis (no caso do tripulante 4 do dia 0 para o dia 1). Para efeito de programação de embarque e desembarque, o *status* disponível indica que o tripulante pode ser selecionado para embarque, considerando os seus respectivos tempos de embarque e custos envolvidos, e o *status* indisponível representa que o mesmo entra em seu período de folga. Tripulantes que devem ficar indisponíveis naquele período por outros motivos (médicos e de treinamentos) não são considerados durante o processo de programação.

Tabela 4.3: Tripulantes disponíveis em terra

Dia\ Categoria	0			1			
0	4	5	6		8		
1	5	6	7		8		
2	5	6	7	8	8	9	
3	6	7	8	9	8	9	10
4	6	7	8	9	9	10	
5	7	8	9		9	10	11

O Passo 3 define a necessidade de desembarque de cada navio atracado, ou seja, quais tripulantes embarcados necessitam desembarcar dentro do período de programação, evitando custos com adicionais de embarque e uma carga de trabalho excessiva.

O Passo 4 define, por navio atracado, a necessidade de embarque de tripulantes. Esta análise é resultado da comparação entre o exigido pela CTS e a quantidade de tripulantes que necessitam de desembarque naquele período de programação. Navios operacionais normalmente tem necessidade de embarcar a mesma quantidade de tripulantes que necessitam de desembarque, enquanto que navios novos necessitam embarcar toda a tripulação do CTS.

Embora não seja desejável manter o tripulante por um período maior que o regime, as vezes esta é a única opção (ou a opção mais econômica) encontrada pelo armador para continuar a operação do navio normalmente. Portanto, o Passo 5 levanta todos os custos envolvidos no processo de programação de embarque e desembarque de tripulantes. Dentre eles estão: adicionais de embarque, custos com movimentações físicas de tripulantes (meios de transporte) e outros custos com hotéis, alimentação, entre outros. Este é o último passo para a definição de todas as informações de entrada necessárias para a construção do modelo matemático (Passo 6). Este modelo é estruturado por meio de uma função objetivo que busca a minimização dos custos de programação, sujeita a diversas restrições.

O Passo 7 consiste no módulo de implementação do modelo matemático desenvolvido em ferramentas de otimização que busca, por fim, a solução para o problema de programação de embarque e desembarque de tripulantes.

Sendo assim, como apresentado inicialmente, quatro modelos matemáticos foram propostos para realizar a programação de embarque e desembarque de tripulantes marítimos de uma frota, buscando minimizar o custo para o armador. Esses modelos são apresentados a seguir:

• Modelo 1: Um dia de programação sem possibilidade de transferência de tripulantes entre navios.

Este primeiro modelo busca a programação de um dia específico considerando como opções: manter os tripulantes embarcados e/ou desembarcá-los e

movimentá-los para casa, garantindo que novos tripulantes disponíveis em terra possam assumir o trabalho para a continuidade da operação.

Modelo 2: Um dia de programação podendo haver transferência de tripulantes entre navios.

Neste segundo modelo busca-se a programação de apenas um dia considerando as mesmas opções do Modelo 1 complementada pela opção de transferência de tripulantes entre embarcações.

Modelo 3: Período de programação sem transferência de tripulantes entre navios.

O terceiro modelo busca a programação de um certo período de dias considerando como opções: manter os tripulantes embarcados e/ou desembarcálos e movimentá-los para seus pontos de referência, garantindo que novos tripulantes disponíveis, e em terra, possam assumir o trabalho para a continuidade da operação. Estas operações podem ser programadas dentro de todo o período de programação estipulado.

Modelo 4: Período de programação com possibilidade de transferência de tripulantes entre navios.

Este quarto e último modelo apresenta as mesmas características do Modelo 3, mas permite a possibilidade de transferência de tripulantes entre navios.

Os quatro modelos são resultados de uma busca gradual por uma modelagem mais próxima da realidade. Entretanto, para que eles pudessem ser obtidos, as seguintes premissas foram adotadas:

Apenas navios atracados ou em área de fundeio podem ser programados para embarque ou desembarque de passageiros.

Esta condição exclui qualquer navio em viagem ou fora da área portuária. O mais comum é que esta troca seja realizada com o navio atracado no porto ou no terminal, dada a facilidade de acesso ao mesmo. Algumas situações específicas exigem a necessidade de troca de tripulação com o navio em área de fundeio, ou seja, o navio se encontra dentro da área portuária, porém não atracado. Nestes

casos os tripulantes são transferidos para os navios por meio de embarcações menores com acesso ao navio por escada, como citado na Seção 3.2. Para a modelagem matemática, o navio estar atracado, ou em área de fundeio, representa a sua disponibilidade para programação.

A programação não incorpora situações de desembarque e embarque emergenciais.

Os modelos matemáticos estudados não comportam situações de saída/entrada de tripulantes de forma imediata e emergencial, seja por motivos de saúde, de falecimento de parentes ou quaisquer outros problemas pessoais. A programação destes casos deve ser tratada de forma isolada, sendo os dados de entrada atualizados posteriormente para as futuras programações.

Os tripulantes disponíveis para transferência entre navios são apenas aqueles com necessidade de desembarque.

A definição de necessidade de desembarque será melhor detalhada no desenvolvimento dos modelos, mas de forma geral pode ser vista como a necessidade de saída dos tripulantes na eminência do término do seu regime de embarque. Apenas estes tripulantes podem ser transferidos para outros navios. Tripulantes que não estão próximos de atingirem o limite do regime, não são considerados para transferências, mesmo que estejam com seus navios atracados no mesmo porto ou terminal.

• Considera-se possível a passagem de serviço e a movimentação de tripulantes entre cidades em um mesmo dia.

Esta premissa difere um pouco a realidade considerando um país de grandes dimensões como o Brasil, e a dificuldade de acesso a alguns portos e terminais. É comum não existirem voos diretos entre cidades, ou mesmo que existam, são limitados a alguns horários. De qualquer forma, assume-se para este estudo que, independente dos meios de transporte (mesmo que isso represente viagens particulares) e das distâncias entre cidades, seja possível a passagem de serviço entre tripulantes e a sua chegada e saída nos navios no mesmo dia.

O período de programação pode ser tão longo quanto o menor intervalo entre programações do mesmo navio.

O período de programação não é um período constante, ou seja, pode variar conforme a necessidade ou padrão de programação da armadora. Porém este período não pode envolver duas programações para o mesmo navio, devido a forma como este modelo foi concebido. Portanto o limite máximo do período de programação é determinado pelo intervalo de tempo que não incorra em mais de uma programação para o mesmo navio.

O planejamento de embarque e desembarque é realizado apenas para o período durante a programação.

Esta premissa define que, dado o período de programação, nenhuma decisão pode ser tomada com relação ao período anterior ou posterior a ele, mesmo que os navios já estivessem atracados ou que os mesmos se mantenham atracados por um tempo maior que o período de programação estabelecido.

Todos os tripulantes possuem as devidas competências e certificações necessárias para assumirem o trabalho da sua categoria a bordo.

Os tripulantes disponíveis para a programação são considerados devidamente capacitados e com todas as certificações válidas para assumirem suas posições nos navios. Aqueles que necessitam de treinamento ou validação das certificações não aparecem como opções para embarque.

O tripulante que desembarca para terra, cujo tempo de embarque for superior ao regime, é automaticamente colocado em repouso depois de finalizado o período de programação.

Os tripulantes que já ultrapassaram seu período de regime na programação anterior são automaticamente liberados para gozarem o período de folga e não aparecem como disponíveis para a programação em curso.

Os tripulantes assumem apenas a função relativa à sua categoria.

Algumas categorias exigem que os tripulantes já tenham comprovado certificações e experiência em categorias hierarquicamente abaixo. Como

exemplo, para chegar à função de Comandante é necessário que o tripulante já tenha exercido a função de Imediato. Portanto, em uma situação atípica, seria possível que um comandante assumisse a função de imediato temporariamente. Esta prática não será considerada por ser pouco utilizada. Este tipo de ação não é vantajoso para a empresa (por ter que pagar um salário de uma categoria superior para uma função inferior), nem para o tripulante que pode ficar em uma situação pouco confortável.

Como citado no início do capítulo, os Apêndices I, II, III e IV deste trabalho contêm exercícios numéricos para complementar e auxiliar o entendimento dos modelos desenvolvidos a seguir. Estes exercícios também serão utilizados para posterior verificação, validação e análise dos resultados dos modelos matemáticos implementados (Capítulo 5).

No Capítulo 1 enfatizou-se a motivação deste trabalho com aplicação na cabotagem, pelo fato de gerar mais viagens com períodos menores de tempo. Porém os modelos foram desenvolvidos de forma não restritiva podendo ser utilizado para a programação de quaisquer tipos de navios e composição de viagens.

4.2 MODELO 1: UM DIA DE PROGRAMAÇÃO SEM POSSIBILIDADE DE TRANSFERÊNCIA ENTRE NAVIOS

Considere um dia *d* qualquer para o qual será realizada a programação de todos os navios atracados que necessitam de desembarque e embarque. No Modelo 1, não será considerada a possibilidade de transferência de tripulantes entre navios, ou seja, um tripulante que necessita de desembarque pode ser solicitado a permanecer no navio por mais uma viagem ou desembarcar para seu ponto de referência desde que um novo tripulante venha de terra para assumir seu trabalho.

Assim, considere um conjunto de categorias de tripulantes marítimos G, sendo |G| a quantidade total destas categorias. Cada categoria $g \in G$ identifica um novo conjunto C_g relativo aos tripulantes que exercem a respectiva função embarcada. Cada conjunto de tripulantes da classe $g \in G$ possui $|C_g|$ elementos. Considere ainda um conjunto S de navios, sendo |S| a quantidade de elementos do mesmo.

Seja então o conjunto $Cb_g \subseteq C_g$ que reúne, da categoria $g \in G$, os tripulantes $p \in C_g$ embarcados nos navios e o conjunto complementar \overline{Cb}_g dado por $\overline{Cb}_g = C_g - Cb_g$, que representa os tripulantes que estão em terra no dia desta programação, aguardando a solicitação de embarque.

De acordo com o primeiro passo da metodologia descrita na Figura 4.1, o posicionamento de cada navio $s \in S$ pode ser representado pelo parâmetro $SP_s \in \{0,1\}$. Se $SP_s = 1$, a previsão é que o navio $s \in S$ esteja atracado no dia d a ser programado, caso contrário $SP_s = 0$.

Considerando que a programação de desembarque e embarque de tripulantes é realizada apenas para navios atracados, define-se o conjunto $Sh \subseteq S$ de navios $s \in S$ atracados no dia d a ser programado, ou seja, $Sh = \{s \in S/SP_s = 1\}$.

Com relação ao segundo passo da Figura 4.1 relativo ao posicionamento dos tripulantes, o parâmetro $CP_{pgs} \in \{0,1\}$ define em qual navio está cada tripulante embarcado. Se $CP_{pgs} = 1$, implica que da categoria $g \in G$, o tripulante $p \in Cb_g$ está embarcado no navio $s \in S$, caso contrário, $CP_{pgs} = 0$.

Seguindo a metodologia, o terceiro passo verifica a necessidade de desembarque dos tripulantes. Esta necessidade é verificada caso o seu período embarcado somado ao da próxima viagem de seu navio, exceda o que foi acordado no regime de embarque. Este regime é dado pela proporção $\frac{Sea}{Land}$, sendo Sea a quantidade de dias que o tripulante deve ficar embarcado, e Land a quantidade de dias que o tripulante tem o direito de folgar.

O parâmetro tempo de embarque, B_{pg} , define quantos dias embarcados possui da categoria $g \in G$, o tripulante $p \in C_g$. Este tempo se inicia em zero, quando o tripulante acaba de terminar o período de Land dias de repouso, e é acrescido de um a cada dia embarcado.

A obrigação do tripulante é permanecer embarcado pelo período definido no regime de embarque, portanto, a partir do dia Sea + 1, o tripulante recebe um adicional de embarque diário até o dia do seu desembarque. Este custo extra gerado à empresa

depende diretamente da categoria do tripulante e da sua hierarquia na empresa (salário e tempo de empresa), entre outros.

As empresas buscam evitar o pagamento de adicionais de embarque a seus tripulantes, o que resulta na necessidade de desembarque até o final do período do regime acordado. A necessidade de desembarque indica apenas que o tripulante, caso mantido no navio, gera adicional de embarque, não significando que o mesmo deva desembarcar. A situação de falta de tripulante disponível da mesma categoria pode ser um exemplo da necessidade de manter da categoria $g \in G$, o tripulante $p \in Cb_g$, pelo período de K_s dias até a próxima atracação do navio $s \in Sh$ em que esteja embarcado.

Portanto, considere o parâmetro $\overline{D}_{pgs} \in \{0,1\}$. Se $\overline{D}_{pgs} = 1$, da categoria $g \in G$, o tripulante $p \in Cb_g$ necessita de desembarque do navio $s \in Sh$ no qual se encontra embarcado, caso contrário $\overline{D}_{pgs} = 0$.

A identificação da necessidade de desembarque, $\overline{D}_{pgs}=1$, apontada na categoria $g\in G$, pelo tripulante $p\in Cb_g$ embarcado no navio $s\in Sh$, é constatada caso seu saldo de embarque, B_{pg} , acrescido do período K_s até a próxima atracação do navio $s\in Sh$ no qual esteja embarcado, seja superior a Sea, caso contrário não existe a necessidade de desembarque no dia d, sendo $\overline{D}_{pgs}=0$.

Considera-se o conjunto $Cbd_g \subseteq Cb_g$, o qual reúne da categoria $g \in G$, os tripulantes $p \in Cb_g$ embarcados nos navios que necessitam de desembarque, ou seja, $Cbd_g = \{p \in Cb_g/\overline{D}_{pgs} = 1\}$, sendo $|Cbd_g|$ a quantidade total de tripulantes destes conjuntos. Considere ainda o conjunto $Shd \subseteq Sh$, dos navios $s \in Sh$ que necessitam de desembarque de tripulantes, ou seja, $Shd = \{s \in Sh/\overline{D}_{pgs} = 1\}$, e |Shd| a quantidade total de embarcações deste conjunto.

Os navios possuem o cartão de tripulação de segurança (CTS), o qual define o mínimo de tripulação que deve estar embarcada para que o navio possa operar. Portanto, considerando que alguns tripulantes permanecem no navio, e que outros desembarcam, cada navio $s \in Shd$ possui a necessidade de embarque, para cada categoria $g \in G$ de $E_{gs} = CTS_{gs} - (\sum_{p \in Cbd_g} CP_{pgs} - \sum_{p \in Cbd_g/CP_{pgs}=1} \overline{D}_{pgs})$ tripulantes. Considera-se então, o conjunto $She \subseteq Sh$, dos navios $s \in Sh$ que necessitam de embarque da

categoria $g \in G$, ou seja, $She = \{s \in Sh/E_{gs} > 0\}$, sendo |She| a quantidade total de embarcações deste conjunto.

A necessidade de desembarque é específica de cada tripulante embarcado no navio por um período maior que o regime, enquanto que a necessidade de embarque é relativa a uma quantidade de profissionais da categoria $g \in G$ capazes de exercer determinada função embarcada.

O problema de programação de tripulantes marítimos busca minimizar o custo total de alocação de tripulantes a navios, o qual é composto por quatro parcelas descritas a seguir:

• Custo diário de adicional de embarque

Seja α_{pg} o custo diário de adicional de embarque da categoria $g \in G$, do tripulante $p \in C_g$. A obrigação do tripulante é permanecer embarcado pelo período definido no regime de embarque, portanto, a partir do dia Sea + 1, o tripulante recebe diariamente este adicional;

Custo de adicional de embarque relativos a uma próxima viagem

Seja β_{pgs} o custo de manter da categoria $g \in G$, o tripulante $p \in C_g$ no navio $s \in Sh$ em que esteja embarcado ou que vai embarcar, pelo período que for superior ao estabelecido no regime de embarque, calculado por $\beta_{pgs} = \text{Max}(0; \alpha_{pg}(B_{pg} + K_s - \text{Max}(B_{pg}; Sea)))$. A primeira função Max garante que o cálculo resulte em zero quando o $B_{pg} + K_s < Sea$. A segunda função Max garante que se o $B_{pg} > Sea$ anteriormente à viagem de K_s dias, apenas o período da viagem seja contabilizado para cálculo do custo;

Custo de deslocamento entre navio e ponto de referência

Seja ω_{pgs} o custo de desembarcar da categoria $g \in G$, o tripulante $p \in Cbd_g$ do navio $s \in Shd$ em que esteja embarcado e movimentá-lo até seu ponto de referência. Assim, se um tripulante for desembarcado, o seu custo de deslocamento deve ser considerado;

• Custo de deslocamento entre ponto de referência e navio

Seja γ_{pgs} o custo de movimentar da categoria $g \in G$ um novo tripulante $p \in \overline{Cb}_g$ do seu ponto de referência até o navio $s \in She$ que necessita de embarque. Assim, no caso de embarque, este custo de deslocamento deve ser considerado.

Considere então a variável $X_{pgs} \in \{0,1\}$, que indica se $X_{pgs} = 1$, da categoria $g \in G$, o tripulante $p \in Cbd_g$ sai do navio $s \in Shd$ em que está embarcado, caso contrário, $X_{pgs} = 0$. Considere ainda a variável $Y_{pgs} \in \{0,1\}$, que indica se $Y_{pgs} = 1$, da categoria $g \in G$ um novo tripulante $p \in \overline{Cb}_g$ que estava disponível, deve ser embarcado no navio $s \in She$, caso contrário $Y_{pgs} = 0$.

Desta forma a função objetivo do Modelo 1 é definida abaixo:

$$\begin{split} & \textit{Minimizar} \sum_{g \in G} \sum_{p \in \textit{Cbd}_g} \sum_{s \in \textit{Shd}/\textit{CP}_{pgs} = 1} [\beta_{pgs} (1 - X_{pgs}) + \omega_{pgs} X_{pgs}] \\ & + \sum_{g \in G} \sum_{p \in \overline{\textit{Cb}}_g} \sum_{s \in \textit{She}/\textit{E}_{gs} > 0} [(\gamma_{pgs} + \beta_{pgs}) Y_{pgs}] \; . \end{split}$$

O Modelo 1 ainda apresenta dois conjuntos de restrições além daqueles que se referem ao domínio das variáveis. O primeiro está relacionado à garantia de que a quantidade mínima de tripulantes necessária para a operação da embarcação será cumprida. Essa necessidade pode ser suprida mantendo da categoria $g \in G$, o tripulante $p \in Cbd_g$ no navio $s \in Shd$ no qual esteja embarcado e/ou por novos tripulantes $p \in \overline{Cb}_g$ a bordo do navio $s \in She$. Sendo assim, essas restrições podem ser assim definidas:

$$\sum_{p \in Cbd_g/CP_{pgs}=1} (1-X_{pgs}) + \sum_{p \in \overline{Cb}_g} Y_{pgs} = E_{gs} \qquad \qquad \forall \ g \in G, \\ s \in She/E_{gs} > 0.$$

O segundo conjunto de restrições está associado aos tripulantes $p \in \overline{Cb}_g$ não embarcados aptos ao embarque que só podem ser alocados em apenas um navio. Essas restrições são representadas por:

$$\sum_{s \in She/E_{gs} > 0} Y_{pgs} \leq 1 \qquad \qquad \forall \ g \in G, \\ p \in \overline{Cb}_g.$$

Devido ao grande número de conjuntos, parâmetros e variáveis de decisão, apresenta-se na sequência um resumo para facilitar a compreensão.

Conjuntos

G	Conjunto de categorias de tripulantes (group)
S	Conjunto de navios da frota (ship)
C_g	Conjunto de tripulantes ($crew$) da categoria $g \in G$
Cb_g	Conjunto de tripulantes embarcados da categoria $g \in G(crew\ onboard)$
$\overline{\it Cb}_g$	Conjunto de tripulantes desembarcados/em terra da categoria $g \in G$ (crew not onboard)
$Sh \subseteq S$	Conjunto de navios atracados (harbor)
$She \subseteq Sh$	Conjunto de navios atracados que necessitam de embarque de tripulantes (ship/harbor/embarkation)
$\mathit{Cbd}_g \subseteq \mathit{Cb}_g$	Conjunto de tripulantes embarcados da categoria $g \in G$ que necessitam de desembarque ($crew/onboard/debarkation$)
Shd ⊆ Sh	Conjunto de navios atracados que necessitam de desembarque de tripulantes (ship/harbor/debarkation)

Parâmetros

SP _s	Posicionamento do navio $s \in S$: atracado ou não atracado (<i>ship position</i>)
CP_{pgs}	Posicionamento da categoria $g \in G$ do tripulante $p \in Cb_g$ embarcado no navio $s \in S$ (crew position)
Sea/ _{Land}	Proporção do regime de embarque (quantidade de dias que o tripulante deve ficar embarcado por quantidade de dias que o tripulante pode desembarcar)
B_{pg}	Tempo de embarque da categoria $g \in G$ do tripulante $p \in \mathcal{C}_g$ (balance)
$ar{m{D}}_{pgs}$	Necessidade de desembarque da categoria $g \in G$ do tripulante $p \in Cb_g$ embarcado no navio $s \in S$ (debarkation)
K _s	Período de dias até a próxima atracação do navio $s \in S$ contabilizado a partir do dia em que está sendo realizada a programação
E_{gs}	Necessidade de embarque de tripulantes da categoria $g \in G$ embarcado no navio $s \in S$ (<i>embarkation</i>)
CTS_{gs}	Quantidade mínima necessária da categoria $g \in G$ do tripulante $p \in \mathcal{C}_g$ para operação dos navios
$lpha_{pg}$	Custo diário de adicional de embarque da categoria $g \in G$ do tripulante $p \in \mathcal{C}_g$
$oldsymbol{eta}_{pgs}$	Custo de manter da categoria $g \in G$ o tripulante $p \in C_g$, no navio $s \in S$ em que esteja embarcado ou que vai embarcar, pelo período que for superior ao estabelecido no regime de embarque
ω_{pgs}	Custo de desembarcar da categoria $g \in G$ o tripulante $p \in Cb_g$, do navio $s \in Sh$ em que esteja embarcado e movimentá-lo até seu ponto de referência
γ_{pgs}	Custo de movimentar da categoria $g \in G$ o tripulante $p \in \overline{\it Cb}_g$, para o navio $s \in \it She$ que necessita de embarque

Variáveis de decisão

X_{pgs}	Variável que indica se, da categoria $g \in G$, o tripulante $p \in C_g$ sai do navio $s \in Sh$
	em que está embarcado
Y_{pgs}	Variável que indica da categoria $g \in G$ um tripulante $p \in \overline{Cb}_g$ disponível em terra,
	deve ser embarcado para o navio $s \in She$ que necessita de embarque

Sendo assim, o modelo matemático completo do problema da programação de embarques e desembarques de tripulantes marítimos para um dia de programação sem transferência entre navios (Modelo 1) é apresentado a seguir.

Função Objetivo:

$$\begin{aligned} & Minimizar \sum_{g \in G} \sum_{p \in Cbd_g} \sum_{s \in Shd/CP_{pgs} = 1} [\beta_{pgs}(1 - X_{pgs}) + \omega_{pgs} X_{pgs}] \\ & + \sum_{g \in G} \sum_{p \in \overline{Cb}_g} \sum_{s \in She/E_{gs} > 0} [(\gamma_{pgs} + \beta_{pgs}) Y_{pgs}] \end{aligned} \tag{4.1}$$

Sujeito a:

$$\sum_{p \in Cbd_g/CP_{pgs}=1} (1-X_{pgs}) + \sum_{p \in \overline{Cb}_g} Y_{pgs} = E_{gs} \qquad \forall g \in G, \\ s \in She/E_{gs} > 0 \qquad (4.2)$$

$$\sum_{s \in She/E_{gs} > 0} Y_{pgs} \le 1 \qquad \qquad \forall g \in G, \\ p \in \overline{Cb}_g \qquad \qquad (4.3)$$

$$X_{pgs} \in \{0,1\} \qquad \qquad \forall \ g \in G, \ p \in Cbd_g, \\ s \in Shd/CP_{pgs} = 1 \qquad (4.4)$$

As Restrições (4.4) e (4.5) estão associadas ao domínio das variáveis de decisão. Para facilitar a compreensão do Modelo 1, o Apêndice I apresenta um exemplo numérico no qual as relações lógicas estabelecidas são descritas explicitamente.

4.3 MODELO 2: UM DIA DE PROGRAMAÇÃO COM POSSIBILIDADE DE TRANSFERÊNCIA ENTRE NAVIOS

O Modelo 2 utiliza todas as notações empregadas no Modelo 1 e as que estão descritas abaixo.

Conjuntos

$Shdt_{pg} \subseteq She$	Conjunto de navios para os quais da categoria $g \in G$, o tripulante $p \in Cb_g$, pode se
	transferir (ship/harbor/debarkation/transference)

Parâmetros

δ_{pgs}	Custo de movimentar da categoria $g \in G$, o tripulante $p \in Cbd_g$, para outro navio
	$s \in Shdt_{pg}$ que necessita de embarque

Variáveis de decisão

Z_{pgs}	Variável que indica se da categoria $g \in G$ o tripulante $p \in Cb_g$ sai do navio $s \in Sh$ em que está embarcado e é enviado para seu ponto de referência
W_{pgs}	Variável que indica se da categoria $g \in G$ o tripulante $p \in Cb_g$ sai do navio em que
	está embarcado e se transfere para outro navio $s \in She$ que necessita de embarque de
	tripulantes daquela categoria

Considere um dia *d* qualquer para o qual será realizada a programação de todos os navios atracados que necessitam de desembarque e embarque. Neste Modelo 2 o tripulante que está embarcado e necessita de desembarque pode: continuar embarcado com o recebimento de adicional, desembarcar do navio com outro colega sendo embarcado para substituí-lo ou ser transferido para outro navio com viagem de igual ou menor duração, com outro colega substituindo-o no navio em que se encontrava.

Utilizando para tanto os conjuntos e parâmetros definidos no Modelo 1 complementados pelo o conjunto de navios $Shdt_{pq} \subseteq She$, nos quais da categoria

 $g \in G$, o tripulante $p \in Cbd_g$ não esteja embarcado, mas que necessitem de embarque de tripulantes desta mesma categoria, ou seja, $Shdt_{pg} = \{s \in She/CP_{pgs} = 0 \land E_{gs} > 0\}$. Esse conjunto verifica todos os navios para os quais da categoria $g \in G$, o tripulante $p \in Cbd_g$ poderia se transferir.

Os custos envolvidos neste processo são os relacionados no Modelo 1 e o custo de transferência entre navios definido a seguir:

• Custo de transferência entre navios:

Seja δ_{pgs} o custo de movimentar da categoria $g \in G$, o tripulante $p \in Cbd_g$ do navio em que esteja para o navio $s \in Shdt_{pg}$. Deve-se então considerar individualmente este custo durante a programação.

Considere além das variáveis de decisão do Modelo 1, a variável $Z_{pgs} \in \{0,1\}$, que indica que, se $Z_{pgs} = 1$, da categoria $g \in G$, o tripulante $p \in Cbd_g$ sai do navio $s \in Shd$ em que está embarcado e é enviado para seu ponto de referência, caso contrário, $Z_{pgs} = 0$.

Seja ainda a variável $W_{pgs} \in \{0,1\}$ que indica que, se $W_{pgs} = 1$, da categoria $g \in G$, o tripulante $p \in Cbd_g$ sai do navio em que está embarcado e é transferido para outro navio $s \in Shdt_{pg}$ que necessita de embarque de tripulantes da mesma categoria, caso contrário, $W_{pgs} = 0$.

No Modelo 1 a própria variável X_{pgs} referente à saída do tripulante do navio já indicava a ida do mesmo para seu ponto de referência, por não existir outra opção. No Modelo 2, foram introduzidas as variáveis Z_{pgs} e W_{pgs} , para especificar o destino do tripulante depois do seu desembarque.

Desta forma a função objetivo do problema busca minimizar o custo total de alocação, composto pelo: custo de manter o tripulante no navio por mais uma viagem, custo de enviá-lo para seu ponto de referência, custo do embarque de tripulantes que estejam em terra, considerando que os mesmos também possam gerar adicionais de embarque, e por fim custos de transferência de tripulantes para outros navios, verificando também se

com esta decisão o mesmo poderá receber adicional de embarque. A função objetivo é definida abaixo:

$$\begin{split} &Minimizar \sum_{g \in G} \sum_{p \in Cbd_g} \sum_{s \in Shd/CP_{pgs} = 1} [\beta_{pgs}(1 - X_{pgs}) + \omega_{pgs} Z_{pgs}] \\ &+ \sum_{g \in G} \sum_{p \in Cb_g} \sum_{s \in She/E_{gs} > 0} (\gamma_{pgs} + \beta_{pgs}) Y_{pgs} \\ &+ \sum_{g \in G} \sum_{p \in Cbd_g} \sum_{s \in Shdt_{pg}} (\delta_{pgs} + \beta_{pgs}) W_{pgs} \,. \end{split}$$

Com relação às restrições, o primeiro conjunto está relacionado à necessidade de embarque que deve ser atendida mantendo da categoria $g \in G$, o tripulante $p \in Cbd_g$ no navio $s \in Shd$ no qual esteja embarcado, e/ou trazendo novos tripulantes $p \in \overline{Cb}_g$ a bordo do navio $s \in She$ e/ou transferindo da mesma categoria $g \in G$, tripulantes $p \in Cbd_g$ que estejam embarcados em outros navios atracados e que necessitam de desembarque, mas que ainda podem assumir uma outra viagem no navio $s \in She$, conforme descrito abaixo:

$$\sum_{p \in Cbd_g/CP_{pgs}=1} (1-X_{pgs}) + \sum_{p \in \overline{Cb}_g} Y_{pgs} + \sum_{p \in Cbd_g/CP_{pgs}=0} W_{pgs} = E_{gs} \quad \forall \ g \in G, \\ s \in She/E_{gs} > 0.$$

O segundo conjunto de restrições está associado ao fato de que, da categoria $g \in G$, o tripulante $p \in Cbd_g$ caso saia do navio $s \in Shd$ em que está embarcado, só poderá desembarcar e ir para casa ou ser transferido para algum outro navio $s \in Shdt_{pg}$ que também necessita de embarque. Assim sendo, tais restrições podem ser representadas por:

$$X_{pgs} = Z_{pgs} + \sum_{s' \in Shdt_{pg}} W_{pgs'} \qquad \qquad \forall g \in G, p \in \\ Cbd_g, s \in \\ Shd/CP_{pgs} = 1.$$

O terceiro conjunto de restrições está associado ao fato de que da categoria $g \in G$, caso o tripulante $p \in Cbd_g$ saia do navio em que esteja embarcado, só poderá ser transferido para no máximo um único navio $s \in Shdt_{pg}$ que também necessita de embarque. Desta forma, tal consideração é dada por:

$$\sum_{s \in Shdt_{pg}} W_{pgs} \le 1 \qquad \forall g \in G, p \in Cbd_g.$$

O quarto conjunto de restrições equivale à expressão (4.3) e está associado, da categoria $g \in G$, aos tripulantes $p \in \overline{Cb}_g$ em terra que só podem ser alocados em apenas um navio que necessite de embarque, conforme descrito em sequência. E as restrições referentes ao domínio das variáveis dadas por (4.4) e (4.5).

Assim, o modelo matemático completo do problema da programação de embarques e desembarques de tripulantes marítimos para um dia de programação com possibilidade de transferência entre navios (Modelo 2) é apresentado a seguir.

Função Objetivo:

$$\begin{aligned} & \textit{Minimizar} \sum_{g \in G} \sum_{p \in Cbd_g} \sum_{s \in Shd/CP_{pgs} = 1} [\beta_{pgs}(1 - X_{pgs}) + \omega_{pgs} Z_{pgs}] \\ & + \sum_{g \in G} \sum_{p \in \overline{Cb}_g} \sum_{s \in She/E_{gs} > 0} (\gamma_{pgs} + \beta_{pgs}) Y_{pgs} \\ & + \sum_{g \in G} \sum_{p \in Cbd_g} \sum_{s \in Shdt_{ng}} (\delta_{pgs} + \beta_{pgs}) W_{pgs} \end{aligned} \tag{4.6}$$

Sujeito a (4.6), (4.7), (4.8) e:

$$\sum_{p \in Cbd_g/CP_{pgs}=1} (1 - X_{pgs}) + \sum_{p \in \overline{Cb}_g} Y_{pgs}$$

$$+ \sum_{p \in Cbd_g/CP_{pgs}=0} W_{pgs} = E_{gs}$$

$$\forall g \in G,$$

$$s \in She/E_{gs} > 0$$

$$(4.7)$$

$$X_{pgs} = Z_{pgs} + \sum_{s \in Shdt_{pg}} W_{pgs} \qquad \begin{array}{c} \forall g \in G, p \\ \in Cbd_g, s \\ \in Shd/CP_{pgs} = 1 \end{array} \tag{4.8}$$

$$\sum_{s \in Shdt_{ng}} W_{pgs} \le 1 \qquad \forall g \in G, p \in Cbd_g \qquad (4.9)$$

$$Z_{pgs} \in \{0,1\} \qquad \begin{array}{c} \forall g \in G, \\ p \in Cbd_g, \\ s \in Shd/CP_{pgs} = 1 \end{array} \tag{4.10}$$

$$\begin{aligned} \forall g \in G, \\ p \in Cbd_g, \\ s \in Shdt_{pg} \end{aligned} \tag{4.11}$$

As Restrições (4.10) e (4.11) estão associadas ao domínio das variáveis de decisão que são específicas para este modelo. Assim como realizado para o Modelo 1, para melhor compreensão desse Modelo 2, o Apêndice II apresenta um exercício numérico aplicado.

4.4 MODELO 3: PERÍODO DE PROGRAMAÇÃO SEM POSSIBILIDADE DE TRANSFERÊNCIA ENTRE NAVIOS

Toda a notação utilizada para este modelo está apresentada abaixo para uma consulta rápida, sendo todos os conjuntos, parâmetros e variáveis de decisão detalhados ao longo

da seção. Alguns já foram expostos nos Modelos 1 e 2 e são utilizados com os mesmos conceitos para os Modelos 3 e 4 com pequenas modificações para contemplar os as características de cada um deles.

Conjuntos

D	Conjunto de dias cujos embarques/desembarques de tripulantes serão programados (day)
\mathcal{C}_g^d	Conjunto de tripulantes ($crew$) da categoria $g \in G$ disponíveis no dia $d \in D$
$\overline{\mathcal{C}} b_g^d$	Conjunto de tripulantes da categoria $g \in G$ desembarcados/em terra no dia $d \in D$ (crew not onboard)
$\overline{\mathit{Cbu}}_g \subseteq \mathit{Cb}_g$	Conjunto união de tripulantes embarcados da categoria $g \in G$ disponíveis no período de programação ($crew\ not\ onboard/union$)
$Sh^d \subseteq S$	Conjunto de navios atracados no dia $d \in D$ (harbor)
$\mathit{Cbd}_g \subseteq \mathit{Cb}_g$	Conjunto de tripulantes da categoria $g \in G$ embarcados que necessitam de desembarque ($crew/onboard/debarkation$)
$Shd^d \subseteq Sh^d$	Conjunto de navios atracados que necessitam de desembarque de tripulantes no dia $d \in D$ ($ship/harbor/debarkation$)
Shdu ⊆ Shu	Conjunto união dos navios atracados que precisam de desembarque no período de programação (ship/harbor/debarkation/union)
$She^d \subseteq Sh^d$	Conjunto de navios atracados que necessitam de embarque de tripulantes no dia $d \in D$ (<i>ship/harbor/embarkation</i>)
Sheu ⊆ Shu	Conjunto união de navios atracados que necessitam de embarque de tripulantes no período de programação (ship/harbor/embarkation/union)

Parâmetros

Df	Último dia do período de programação
di_s	Primeiro dia atracado do navio $s \in Sh$
df_s	Último dia atracado do navio $s \in Sh$
SP ^d _s	Posicionamento do navio $s \in S$ no dia $d \in D$: atracado ou não atracado (<i>ship position</i>)
B_{pg}^d	Tempo de embarque da categoria $g \in G$ do tripulante $p \in C_g$ no dia $d \in D$ (balance)
μ_{pgs}^d	Custo de manter em adicional de embarque da categoria $g \in G$ o tripulante $p \in C_g$ no navio $s \in Sh$, até o dia $d \in D$ de seu desembarque dentro do período de programação
$ ho_{pgs}$	Custo de manter em adicional de embarque da categoria $g \in G$ o tripulante $p \in C_g$ no navio $s \in Sh$, pelo período todo de programação, no caso do tripulante permanecer no navio e já entrar em adicional antes da próxima viagem.
$\pmb{\omega}_{pgs}^d$	Custo de desembarcar da categoria $g \in G$ o tripulante $p \in Cb_g$ do navio $s \in Sh$ no dia $d \in D$ e movimentá-lo até seu ponto de referência por dia
γ_{pgs}^d	Custo de movimentar da categoria $g \in G$ um tripulante $p \in \overline{Cb}_g^d$ em terra para embarcar no navio $s \in She$ no dia $d \in D$

Variáveis de Decisão

X^d_{pgs}	Variável que indica se da categoria $g \in G$ o tripulante $p \in Cb_g$ desembarca do navio $s \in Sh$ em que está no dia $d \in D$
Y^d_{pgs}	Variável que indica se da categoria $g \in G$ um tripulante $p \in \overline{Cb}_g^d$ que está em terra embarcar no navio $s \in She$ no dia $d \in D$
Z^d_{pgs}	Variável que indica se da categoria $g \in G$ o tripulante $p \in Cb_g$ desembarca do navio $s \in Sh$ em que está no dia $d \in D$ e é enviado para seu ponto de referência

Considere um período de dias *D* para o qual será realizada a programação de todos os navios atracados que necessitam de desembarque e embarque. Neste Modelo 3 o tripulante que está embarcado e necessita de desembarque pode: continuar embarcado com o recebimento de adicional ou desembarcar do navio e se direcionar para seu ponto de referência com outro colega sendo embarcado para substituí-lo, e todas estas

decisões podem ocorrer em qualquer dia do período de programação, desde que o navio não fique desassistido.

Para este Modelo 3, cada categoria $g \in G$ identifica um novo conjunto C_g^d relativo aos tripulantes que exercem a respectiva função embarcada e que estão disponíveis para a programação no dia $d \in D$. Cada conjunto de tripulantes da classe $g \in G$ possui $|C_g^d|$ elementos.

Sendo então o conjunto $Cb_g \subseteq C_g^d$ que reúne da categoria $g \in G$, os tripulantes $p \in C_g^d$ que já estão embarcados nos navios $s \in S$ no período anterior à D. O conjunto complementar \overline{Cb}_g^d dado por $\overline{Cb}_g^d = C_g^d - Cb_g$, representa os tripulantes que estão em terra no dia $d \in D$, aguardando a solicitação de embarque. Define-se $\overline{Cbu}_g \subseteq Cb_g$, como o conjunto união de todos os elementos dos conjuntos \overline{Cb}_g^d em todo o período.

De acordo com o primeiro passo da metodologia descrita na Figura 4.1, o posicionamento dos navios $s \in S$ pode ser representado pelo parâmetro $SP_s^d \in \{0,1\}$. Se $SP_s^d = 1$, a previsão é que o navio $s \in S$ esteja atracado no dia $d \in D$, caso contrário $SP_s^d = 0$. O primeiro dia atracado do navio $s \in S$ dentro do período D é definido por di_s , enquanto que o último dia é definido por df_s .

Considerando que a programação de desembarque e embarque de tripulantes é realizada apenas para navios atracados, define-se o conjunto $Sh^d \subseteq S$ de navios $s \in S$ atracados no dia $d \in D$, ou seja, $Sh^d = \{s \in S/SP_s^d = 1\}$. O conjunto de navios $Shu \subseteq Sh^d$ é definido por um conjunto união de todos os elementos dos conjuntos Sh^d no período D de dias.

Com relação ao segundo passo da Figura 4.1, relativo ao posicionamento dos tripulantes, o parâmetro $CP_{pgs} \in \{0,1\}$, também utilizado nos Modelos 1 e 2, define em qual navio está cada tripulante embarcado. Relembrando, se $CP_{pgs} = 1$, implica que da categoria $g \in G$, o tripulante $p \in Cb_g$ estará embarcado no navio $s \in S$, caso contrário, $CP_{pgs} = 0$.

Para o Modelo 3, o parâmetro tempo de embarque, B_{pg}^d , define quantos dias embarcados possui da categoria $g \in G$, o tripulante $p \in C_g^d$ no dia $d \in D$. Caso seja necessária a

permanência do mesmo pelo período de K_s dias até a próxima atracação do navio $s \in Sh$ em que esteja embarcado, deve-se contabilizar a partir do último dia atracado $df_s \in D$ se até a próxima atracação do navio será ultrapassado seu período de regime por conta do cálculo do adicional de embarque.

Da mesma forma que no Modelo 1 e Modelo 2, o parâmetro de necessidade de desembarque é dado por $\overline{D}_{pgs} \in \{0,1\}$. Se $\overline{D}_{pgs} = 1$, da categoria $g \in G$, o tripulante $p \in Cb_g$ necessita de desembarque do navio $s \in Sh$, isso ocorre caso seu tempo de embarque no dia $df_s \in D$, ou seja $B_{pg}^{df_s}$, acrescido do período K_s até a próxima atracação do navio $s \in Shu$ no qual esteja embarcado, seja superior a Sea, caso contrário não existe a necessidade de desembarque, sendo $\overline{D}_{pgs} = 0$.

O conjunto $Cbd_g \subseteq Cb_g$, o qual reúne da categoria $g \in G$, os tripulantes $p \in Cb_g$ embarcados nos navios $s \in Shdu$ que necessitam de desembarque no período D, pode ser assim definido $Cbd_g = \{p \in Cb_g/\overline{D}_{pgs} = 1 \ \forall \ g \in G, s \in Shdu\}$, da mesma forma como definido nos modelos anteriores. Sendo assim, considera-se o conjunto $Shd^d \subseteq Sh^d$, dos navios $s \in Sh^d$ os quais necessitam de desembarque no dia $d \in D$, ou seja, $Shd^d = \{s \in Sh^d/\overline{D}_{pgs} = 1 \ \forall \ g \in G, p \in Cb_g\}$, e $|Shd^d|$ a quantidade total de embarcações atracadas que necessitam de desembarque no dia $d \in D$. Define-se o conjunto de navios $Shdu \subseteq Shu$, o conjunto união de todos os elementos dos Shd^d no período D de dias.

Considera-se então, o conjunto $She^d \subseteq Sh^d$, dos navios $s \in Sh^d$ os quais necessitam de embarque no dia d, ou seja, $She^d = \{s \in Sh^d \mid E_{gs} > 0 \ \forall \ g \in G\}$, e $|She^d|$ a quantidade total de embarcações deste conjunto. Define-se o conjunto de navios $Sheu \subseteq Shu$, o conjunto união de todos os elementos dos conjuntos She^d no período D de dias.

Além do custo diário de adicional de embarque, utilizados no Modelo 1 e Modelo 2, o problema de PPTM do Modelo 3 envolve os seguintes custos:

Custo de adicional de embarque relativos a uma próxima viagem

Seja β_{pgs} o custo de manter da categoria $g \in G$, o tripulante $p \in C_g$ no navio $s \in Shu$ em que esteja embarcado ou que vai embarcar, pelo período que for

superior ao estabelecido no regime de embarque, calculado por β_{pgs} = $\operatorname{Max}(0; \alpha_{pg}(B_{pg}^{df_s} + K_s - \operatorname{Max}(B_{pg}^{df_s}; Sea)))$. A primeira função Max garante que o cálculo resulte em zero quando o $B_{pg}^{df_s} + K_s < Sea$. A segunda função Max garante que se o $B_{pg}^{df_s} > Sea$ anteriormente à viagem de K_s dias, apenas o período da viagem seja contabilizado para cálculo do custo;

- Custo de adicional de embarque para tripulantes que estão em adicional dentro da semana de programação até o dia de saída da sua embarcação Seja μ^d_{pgs} o custo de manter em adicional da categoria g ∈ G, o tripulante p ∈ Cbd_g no navio s ∈ Shdu em que esteja embarcado, até o dia d ∈ D referente ao seu desembarque, considerando apenas situações em que o saldo de embarque B^d_{pg} no dia d ∈ D de sua saída já tenha ultrapassado o estabelecido pelo regime de embarque antes mesmo de iniciar a próxima viagem, dado por
- Custo de adicional de embarque para tripulantes que estão em adicional dentro da semana de programação e que permanecem por mais uma viagem

Seja ρ_{pgs} o custo de manter em adicional da categoria $g \in G$, o tripulante $p \in Cbd_g$ no navio $s \in Shdu$ em que esteja embarcado, no período D de programação. Isso pode ocorrer quando o saldo de embarque ao final $B_{pg}^{df_s}$ já tenha ultrapassado o que é estabelecido pelo regime de embarque, dado por $\rho_{pgs} = \alpha_{pg}(\text{Max}(0; B_{pg}^{df_s} - \text{Max}(B_{pg}^{di_s}; Sea)));$

• Custo de deslocamento entre navio e ponto de referência

 $\mu_{pgs}^d = \alpha_{pg}(\text{Max}(0; B_{pg}^d - \text{Max}(B_{pg}^{di_s}; Sea)));$

 ω_{pgs}^d o custo de desembarcar no dia $d \in D$ da categoria $g \in G$, o tripulante $p \in Cbd_g$ do navio $s \in Shd^d$ em que esteja embarcado e movimentá-lo até seu ponto de referência; e

• Custo de deslocamento entre ponto de referência e navio

Seja γ_{pgs}^d o custo de movimentar no dia $d \in D$ da categoria $g \in G$ um novo tripulante $p \in \overline{Cb}_g^d$ do seu ponto de referência até o navio $s \in She^d$ que necessita de embarque $(E_{gs} > 0)$.

Verifica-se que os custos β_{pgs} e ρ_{pgs} são custos que não dependem do dia $d \in D$ por considerar apenas situações em que o tripulante não desembarca de seu navio. Os outros custos dependem do dia $d \in D$ em que o tripulante é desembarcado.

Seja então a variável $X_{pgs}^d \in \{0,1\}$, que indica se $X_{pgs}^d = 1$, da categoria $g \in G$, o tripulante $p \in Cbd_g$ sai do navio $s \in Shd^d$ em que está embarcado, caso $X_{pgs}^d = 0$, o tripulante se mantém da mesma forma em que estava no dia anterior, ou seja, se ele está embarcado, ele se mantém embarcado, caso ele esteja desembarcado, ele permanece desembarcado.

Seja ainda a variável $Y_{pgs}^d \in \{0,1\}$, que indica se $Y_{pgs}^d = 1$, da categoria $g \in G$, um novo tripulante $p \in \overline{Cb}_g^d$ que estava disponível, deve ser embarcado no navio $s \in She^d$ que necessita de embarque $(E_{gs} > 0)$, caso contrário $Y_{pgs}^d = 0$.

Desta forma a função objetivo do problema busca minimizar o custo total de alocação dos tripulantes no período de programação, composto pelo: custo de manter o tripulante no navio por mais uma viagem, considerando que ele pode estar/entrar em adicional na própria semana de programação; custo de enviá-lo para seu ponto de referência, pagando adicional caso o tripulante ultrapasse o período de regime dentro da semana de programação; e custo do embarque de tripulantes que estejam em terra, considerando que os mesmos também possam gerar adicionais de embarque. Esta função objetivo é definida abaixo:

$$\begin{split} & \textit{Minimizar} \sum_{g \in G} \sum_{p \in Cbd_g} \sum_{s \in Shdu/CP_{pgs} = 1} (\beta_{pgs} + \rho_{pgs}) \left(1 - \sum_{d \in D/s \in Shd^d} X_{pgs}^d\right) \\ & + \sum_{d \in D} \sum_{g \in G} \sum_{p \in Cbd_g} \sum_{s \in Shd^d/CP_{pgs} = 1} (\mu_{pgs}^d + \omega_{pgs}^d) X_{pgs}^d \\ & + \sum_{d \in D} \sum_{g \in G} \sum_{p \in \overline{Cb}_g^d} \sum_{s \in She^d/E_{gs} > 0} (\gamma_{pgs}^d + \beta_{pgs}) Y_{pgs}^d \end{split}$$

Com relação às restrições, o primeiro conjunto de restrições está relacionado à necessidade de embarque que deve ser atendida dentro do período de programação, mantendo da categoria $g \in G$, o tripulante $p \in Cbd_g$ no navio $s \in Shd^d$ no qual esteja embarcado, que é o equivalente a não realizar a saída do tripulante deste navio, e/ou trazendo novos tripulantes $p \in \overline{Cb}_g^d$ a bordo do navio $s \in She^d$. Este conjunto está apresentado abaixo:

$$\begin{split} \sum_{p \in Cbd_g/CP_{pgs}=1} (1 - \sum_{d \in D/s \in Shd^d} X_{pgs}^d) + \sum_{d \in D/s \in She^d} \sum_{p \in \overline{Cb}_g^d} Y_{pgs}^d & \forall g \in G, \\ &= E_{gs} \end{cases} \\ = E_{gs} = Cbd_g/CP_{pgs} + \sum_{d \in D/s \in She^d} \sum_{p \in \overline{Cb}_g^d} Y_{pgs}^d & \forall g \in G, \\ &s \in Sheu/E_{gs} > 0. \end{split}$$

O segundo conjunto de restrições está associado ao fato de que, da categoria $g \in G$, o tripulante $p \in Cbd_g$ só pode desembarcar do navio $s \in Shd^d$ em que está embarcado no máximo uma vez em todo o período D de programação. Assim sendo, tal consideração pode ser representada por:

$$\sum_{d \in D} X_{pgs}^d \leq 1 \\ \begin{cases} \forall g \in G, \\ p \in Cbd_g, \\ s \in Shdu/CP_{pgs} = 1. \end{cases}$$

O terceiro conjunto de restrições está associado aos tripulantes $p \in \overline{Cb}_g^d$ não embarcados aptos ao embarque que só podem ser alocados em apenas um navio em todo o período D. Essa restrição é representada por:

$$\sum_{\substack{d \in D/p \in \overline{Cb}_{\alpha}^d \ s \in She^d/E_{gs} > 0}} Y_{pgs}^d \le 1 \qquad \forall g \in G, \\ p \in \overline{Cbu}_g.$$

O quarto conjunto de restrições indica que no mesmo dia que algum tripulante sair de seu navio, deve estar programado a chegada de outra pessoa, conforme descrito na sequência. E por ultimo devem ser consideradas as restrições de domínio das variáveis.

$$\sum_{p \in Cbd_g/CP_{pgs}=1} X_{pgs}^d = \sum_{p \in \overline{Cb}_g^d} Y_{pgs}^d \qquad \qquad \forall \ d \in D, \\ g \in G, \\ s \in Shd^d/E_{gs} > 0.$$

Assim, o modelo matemático do problema da programação de embarques e desembarques de tripulantes marítimos com período de programação sem possibilidade de transferência entre navios, denominado Modelo 3, encontra-se apresentado a seguir.

Função Objetivo:

$$\begin{aligned} & \textit{Minimizar} \ \sum_{g \in G} \sum_{p \in Cbd_g} \sum_{s \in Shdu/CP_{pgs} = 1} (\beta_{pgs} + \rho_{pgs}) \left(1 - \sum_{d \in D/s \in Shd^d} X_{pgs}^d \right) \\ & + \sum_{d \in D} \sum_{g \in G} \sum_{p \in Cbd_g} \sum_{s \in Shd^d/CP_{pgs} = 1} (\mu_{pgs}^d + \omega_{pgs}^d) X_{pgs}^d \\ & + \sum_{d \in D} \sum_{g \in G} \sum_{p \in \overline{Cb}_g^d} \sum_{s \in She^d/E_{gs} > 0} (\gamma_{pgs}^d + \beta_{pgs}) Y_{pgs}^d \end{aligned} \tag{4.12}$$

Sujeito a:

$$\sum_{p \in Cbd_g/CP_{pgs}=1} (1 - \sum_{d \in D/s \in Shd^d} X_{pgs}^d)$$

$$+ \sum_{d \in D/s \in She^d} \sum_{p \in \overline{Cb}_g^d} Y_{pgs}^d = E_{gs} \qquad \qquad S \in Sheu/E_{gs} > 0$$

$$(4.13)$$

$$\sum_{d \in D} X_{pgs}^d \le 1 \qquad \qquad \begin{cases} \forall g \in G, \\ p \in Cbd_g, \\ s \in Shdu/CP_{pgs} \\ = 1 \end{cases} \tag{4.14}$$

$$\sum_{d \in D/p \in \overline{Cb}_q^d} \sum_{s \in She^d/E_{gs} > 0} Y_{pgs}^d \le 1 \qquad \forall g \in G, \\ p \in \overline{Cbu}_g \qquad (4.15)$$

$$\sum_{p \in Cbd_g/CP_{pgs}=1} X_{pgs}^d = \sum_{p \in \overline{Cb}_g^d} Y_{pgs}^d \qquad \qquad \begin{cases} \forall \ d \in D, \\ g \in G, \\ s \in Shd^d/E_{gs} > 0 \end{cases} \tag{4.16}$$

$$\forall g \in G, \\ p \in Cbd_g, \\ s \in Shdu/CP_{pgs} \\ = 1$$
 (4.17)

$$Y_{pgs}^{d} \in \{0,1\} \qquad \qquad \begin{aligned} \forall g \in G, \\ p \in \overline{Cb}_{g}^{d}, \\ s \in Sheu/E_{gs} > 0 \end{aligned} \tag{4.18}$$

As Restrições (4.17) e (4.18) estão associadas ao domínio das variáveis de decisão que são específicas para este modelo. Assim como para os Modelos 1 e 2, o Apêndice III apresenta um exercício numérico aplicado a este Modelo 3 que detalha todos os seus principais elementos.

4.5 MODELO 4: PERÍODO DE PROGRAMAÇÃO COM POSSIBILIDADE DE TRANSFERÊNCIA ENTRE NAVIOS

Além dos conjuntos, parâmetros e variáveis de decisão do Modelo 3, o Modelo 4 utiliza também os que estão descritos a seguir.

Conjuntos

$Shdt^d_{pg} \subseteq She^d$	Conjunto de navios para os quais da categoria $g \in G$ o tripulante $p \in \mathcal{C}b_g$ pode	

	se transferi	r no dia d	∈ <i>D</i> (ship/harbor/d	lebarkation/t	ransferen	ce)	
$Shdtu_{pg} \subseteq Sheu$	Conjunto u	nião de na	avios	de todo o per	ríodo de prog	gramação	para	os quais da
	categoria	$g \in G$	O	tripulante	$p \in \mathcal{C}b_g$	pode	se	transferir
	(ship/harba	or/debarka	tion/t	ransference/u	nion)			

Parâmetros

δ^d_{pgs}	Custo de transferir da categoria $g \in G$, o tripulante $p \in Cbd_g$ do navio em que
	estava, para embarcar em outro navio $s \in Shdt_{pg}$ que necessita de embarque
	no dia $d \in D$

Variáveis de Decisão

$W_{pgss'}^{dd'}$	Variável que indica se da categoria $g \in G$, o tripulante $p \in Cbd_g$ sai no dia
	$d \in D$ do navio $s \in Shdu$ em que está embarcado e é transferido para outro
	navio $s \in Shdt_{pg}$ embarcando no dia $d' \in D$

Considere um período de dias $d \in D$ para o qual será realizada a programação de todos os navios atracados que necessitam de desembarque e embarque. O último dia deste período é definido por Df. Neste Modelo 4 o tripulante que está embarcado e necessita de desembarque pode: continuar embarcado com o recebimento de adicional, desembarcar do navio com outro colega sendo embarcado para substituí-lo ou ser transferido para outro navio com viagem de igual ou menor duração, com outro colega substituindo-o no navio em que se encontrava.

Utilizando para tanto os conjuntos e parâmetros definidos no Modelo 3, considere também o conjunto de navios $Shdt^d_{pg} \subseteq She^d$ que estão atracados no dia $d \in D$, que necessitam de desembarque e nos quais da categoria $g \in G$, o tripulante $p \in Cbd_g$ não esteja embarcado. Estes navios são alvos de transferência deste tripulante e pode ocorrer desde o dia que o navio do mesmo atraca até o ultimo dia Df, contanto que existam navios atracados necessitando de embarque, ou seja, $Shdt^d_{pg} = \{s \in She^d/CP_{pgs} = 0 \land E_{gs} > 0 \ \forall \ g \in G, p \in Cbd_g, di_{s' \in Shdu/CP_{pgs'}=1} \leq d \leq Df\}$.

O Modelo 4 aplica o conceito de programação de período de dias do Modelo 3 com o conceito de transferência de tripulantes entre navios do Modelo 2. Portanto, este modelo é o que se aproxima mais da realidade, o qual analisa, para um conjunto de dias, o embarque e desembarque de tripulantes com a possibilidade de utilizar tripulantes em final de regime de embarque para assumir outros navios caso isso se mostre vantajoso.

Os custos envolvidos neste problema são os mesmos definidos no Modelo 3 além do custo de transferência entre navios que é dado a seguir:

• Custo de transferência entre navios:

Seja δ_{pgs}^d o custo de transferir da categoria $g \in G$, o tripulante $p \in Cbd_g$ do navio em que estava, embarcando no dia $d \in D$ em outro navio $s \in Shdt_{pg}$ que necessita de embarque.

Considere além das variáveis do Modelo 3, a variável $W_{pgss'}^{dd'} \in \{0,1\}$, a qual indica que da categoria $g \in G$, o tripulante $p \in Cbd_g$ sai no dia $d \in D$ do navio $s \in Shdu$ em que está embarcado e é transferido para outro navio $s \in Shdt_{pg}$ embarcando no dia $d' \in D$, caso contrário, $W_{pgss'}^{dd'} = 0$.

Desta forma a função objetivo do problema busca minimizar o custo total de alocação no período de programação, composto pelo: custo de manter o tripulante no navio por mais uma viagem, considerando que ele pode entrar em adicional na própria semana de programação; custo de enviá-lo para seu ponto de referência, pagando adicional caso o tripulante ultrapasse o período de regime dentro da semana de programação; custo de transferência do tripulante para outro navio, e adicional de embarque caso esse seja o caso, e custo do embarque de tripulantes que estejam em terra, considerando que os mesmos também possam gerar adicionais de embarque. Essa função objetivo é apresentada na sequência.

$$\begin{split} & \textit{Minimizar} \sum_{g \in G} \sum_{p \in Cbd_g} \sum_{s \in Shdu/CP_{pgs} = 1} (\beta_{pgs} + \rho_{pgs}) (1 - \sum_{d \in D} X_{pgs}^d) \\ & + \sum_{d \in D} \sum_{g \in G} \sum_{p \in Cbd_g} \sum_{s \in Shd^d/CP_{pgs} = 1} (\mu_{pgs}^d X_{pgs}^d + \omega_{pgs}^d Z_{pgs}^d) \\ & + \sum_{g \in G} \sum_{p \in Cbd_g} \sum_{s \in Shdu/CP_{pgs} = 1} \sum_{d = di_s} \sum_{d' = d} \sum_{s' \in Shdt_{pg}^{d'}} \left(\delta_{pgss'}^{dd'} + \beta_{pgs'} \right) W_{pgss'}^{dd'} \\ & + \sum_{d \in D} \sum_{g \in G} \sum_{p \in \overline{Cb}_g^d} \sum_{s \in She^d/E_{gs} > 0} (\gamma_{pgs}^d + \beta_{pgs}) Y_{pgs}^d \end{split}$$

O primeiro conjunto de restrições está relacionado à necessidade de embarque que deve ser atendida dentro do período de programação, mantendo da categoria $g \in G$, o tripulante $p \in Cbd_g$ no navio $s \in Shd^d$ no qual esteja embarcado, que é o equivalente a não realizar a saída do tripulante deste navio, e/ou trazendo novos tripulantes $p \in \overline{Cb}_g^d$ a bordo do navio $s \in She^d$, e/ou recebendo transferências dos tripulantes $p \in Cbd_g$ que estão embarcados nos navios $s \in Shdt_{pg}^d$. Essas restrições estão descritas a seguir:

$$\begin{split} \sum_{p \in Cbd_g/CP_{pgs}=1} (1 - \sum_{d \in D/s \in Shd^d} X_{pgs}^d) + \sum_{d \in D/s \in She^d} \sum_{p \in \overline{Cb}_g^d} Y_{pgs}^d \\ + \sum_{d = di_s} \sum_{p \in Cbd_g/s \in Shdt_{pg}^d} \sum_{s' \in Shdu/CP_{pgs'}=1} \sum_{d' = di_{s'}} W_{pgs's}^{d'd} = E_{gs} \end{split} \quad \forall \ g \in G, \\ s \in Sheu/E_{gs} > 0. \end{split}$$

O segundo conjunto de restrições garantem que um tripulante que deixa o navio no qual esteja embarcado só pode desembarcar para seu ponto de referência ou assumir outro navio no mesmo dia ou nos dias subsequentes mas pertencentes ao período *D*.

$$X_{pgs}^{d} = Z_{pgs}^{d} + \sum_{d'=d}^{Df} \sum_{s' \in Shdt_{pg}^{d'}} W_{pgss'}^{dd'} \qquad \qquad \forall \ d \in D, g \in G, \\ p \in Cbd_{g}, \\ s \in Shdu/CP_{pgs}$$

O terceiro conjunto de restrições garante que caso haja alguma transferência de algum tripulante de um navio para outro, outro tripulante da mesma categoria, no mesmo dia, será deslocado para este navio, seja de outro navio ou de terra.

$$\begin{split} &\sum_{p \in Cbd_g/CP_{pgs}=1} Z_{pgs}^d + \sum_{p \in Cbd_g/CP_{pgs}=1} \sum_{d'=d}^{Df} \sum_{s' \in Shdt_{pg}^{d'}} W_{pgss'}^{dd'} \\ &= \sum_{p \in Cbd_g/s \in Shdt_{pg}^d} \sum_{s' \in Shdu/CP_{pgs'}=1} \sum_{d'=di_{s'}} W_{pgs's}^{d'd} & \forall g \in G, \\ &+ \sum_{p \in \overline{Cb}_d^d} Y_{pgs}^d \end{split}$$

O quarto conjunto está associado ao fato que da categoria $g \in G$, o tripulante $p \in Cbd_g$ só pode ser transferido para apenas um navio $s \in She^d$. Assim sendo, tal consideração pode ser representada por este conjunto de restrições:

$$\sum_{d=di_s}^{df_s} \sum_{\mathbf{d}'=d}^{Df} \sum_{\mathbf{s}' \in Shdt_{pg}^{\mathbf{d}'}} W_{pgss'}^{\mathbf{d}d'} \leq 1 \qquad \qquad \begin{cases} \forall \ g \in G, \\ p \in Cbd_g, \\ s \in Shdu/CP_{pgs} = 1 \end{cases}$$

O quarto e quinto conjunto de restrições foram vistas no Modelo 3 e garantem que: da categoria $g \in G$, o tripulante $p \in Cbd_g$ só pode manter-se no navio $s \in Shd^d$ em que está embarcado ou desembarcar; e que aos tripulantes $p \in \overline{Cb}_g^d$ não embarcados aptos ao embarque que só podem ser alocados em apenas um navio. Por último estão as restrições referentes ao domínio das variáveis.

Assim, o modelo matemático do problema da programação de embarques e desembarques de tripulantes marítimos com período de programação e possibilidade de transferência entre navios, denominado Modelo 4, encontra-se apresentado a seguir.

Função Objetivo:

$$\begin{aligned} & \textit{Minimizar} \ \sum_{g \in G} \sum_{p \in Cbd_g} \sum_{s \in Shdu/CP_{pgs}=1} (\beta_{pgs} + \rho_{pgs}) (1 - \sum_{d \in D/s \in Shd^d} X_{pgs}^d) \\ & + \sum_{d \in D} \sum_{g \in G} \sum_{p \in Cbd_g} \sum_{s \in Shd^d/CP_{pgs}=1} (\mu_{pgs}^d X_{pgs}^d + \omega_{pgs}^d Z_{pgs}^d) \\ & + \sum_{g \in G} \sum_{p \in Cbd_g} \sum_{s \in Shdu/CP_{pgs}=1} \sum_{d = di_s} \sum_{d' = d} \sum_{s' \in Shdt_{pg}^{d'}} \left(\delta_{pgss'}^{dd'} \right) \\ & + \beta_{pgs'} W_{pgss'}^{dd'} \\ & + \sum_{d \in D} \sum_{g \in G} \sum_{p \in \overline{Cb}_g^d} \sum_{s \in She^d/E_{gs}>0} (\gamma_{pgs}^d + \beta_{pgs}) Y_{pgs}^d \end{aligned} \tag{4.19}$$

Sujeito a (4.14), (4.15), (4.17), (4.18) e:

$$\sum_{p \in Cbd_g/CP_{pgs}=1} (1 - \sum_{d \in D/s \in Shd^d} X_{pgs}^d)$$

$$+ \sum_{d \in D/s \in She^d} \sum_{p \in \overline{Cb}_g^d} Y_{pgs}^d$$

$$+ \sum_{d = di_s} \sum_{p \in Cbd_g/s \in Shdt_{pg}^d} \sum_{s' \in Shdu/CP_{pgs'}=1} \sum_{d' = di_{s'}} W_{pgs's}^{d'd}$$

$$= E_{gs}$$

$$(4.20)$$

$$X_{pgs}^{d} = Z_{pgs}^{d} + \sum_{d'=d}^{Df} \sum_{s' \in Shdt_{pg}^{d'}} W_{pgss'}^{dd'} \qquad \qquad \begin{cases} \forall \ d \in D, g \in G, \\ p \in Cbd_g, \\ s \in Shdu/CP_{pgs} \end{cases}$$
(4.21)

$$\sum_{p \in Cbd_g/CP_{pgs}=1} Z_{pgs}^d + \sum_{p \in Cbd_g/CP_{pgs}=1} \sum_{d'=d}^{Df} \sum_{s' \in Shdt_{pg}^{d'}} W_{pgss'}^{dd'}$$

$$= \sum_{p \in Cbd_g/s \in Shdt_{pg}^d} \sum_{s' \in Shdu/CP_{pgs'}=1} \sum_{d'=di_{s'}} W_{pgs's}^{d'd} \qquad \forall g \in G,$$

$$= \sum_{p \in Cbd_g/s \in Shdt_{pg}^d} \sum_{s' \in Shdu/CP_{pgs'}=1} V_{pgs'}^{d'd} \qquad s \in Shdu/E_{gs} \qquad > 0,$$

$$+ \sum_{p \in \overline{Cbd_g}} Y_{pgs}^d \qquad di_s \leq d \qquad (4.22)$$

$$\sum_{d=di_s}^{df_s} \sum_{\mathbf{d}'=d}^{Df} \sum_{\mathbf{s}' \in Shdt_{pg}^{\mathbf{d}'}} W_{pgss'}^{\mathbf{d}\mathbf{d}'} \leq 1 \qquad \qquad \begin{cases} \forall g \in G, \\ p \in Cbd_g, \\ s \in Shdu/CP_{pgs} \end{cases}$$
 (4.23)

$$\forall d \in D,$$

$$g \in G,$$

$$p \in Cbd_{g},$$

$$s \in Shd^{d}/CP_{pgs}$$

$$-1$$

$$(4.24)$$

$$\forall d \in D,$$

$$d' \in D \leq d,$$

$$g \in G,$$

$$p \in Cbd_g,$$

$$s \in Shd^d/CP_{pgs}$$

$$= 1,$$

$$s' \in Shdt_{pg}^d$$

$$(4.25)$$

As Restrições (4.24) e (4.25) estão associadas ao domínio das variáveis de decisão que são específicas para este modelo. Assim como para os Modelos 1 e 2, o Apêndice IV apresenta um exercício numérico aplicado a este Modelo 3 que detalha todos os seus principais elementos.

4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi apresentado inicialmente uma metodologia de busca da solução para o PPTM, a qual é composta por três módulos: definição de dados de entrada, concepção do modelo e implementação em uma ferramenta de otimização, para a busca da solução ótima. Esta metodologia foi utilizada para a construção dos quatro modelos matemáticos apresentados, os quais diferem de acordo com o período de programação, considerando ou não a possibilidade de transferência entre tripulantes.

O modelo mais próximo da realidade é o Modelo 4 que realiza a alocação de tripulantes para um período de dias considerando a possibilidade de transferência entre eles. Para melhor compreensão dos mesmos foram propostos exercícios numéricos nos apêndices, os quais também serão utilizados para a verificação e validação dos resultados no Capítulo 5, relativo ao último passo da metodologia proposta, referente à implementação do modelo.

5 APLICAÇÕES E TESTES COMPUTACIONAIS DO MODELO

Os modelos matemáticos apresentados no Capítulo 4 foram utilizados para resolver um estudo de caso real de uma empresa de navegação. Entretanto, antes de realizar os experimentos com dados reais, os quatro modelos passaram por uma fase de verificação e validação. Os resultados, apesar de não fazerem parte dos objetivos do trabalho, propõem algumas reflexões sobre a utilização de modelos de otimização para a programação de embarque e desembarque de tripulantes marítimos.

Os modelos matemáticos foram construídos na linguagem Python que obtém os dados de entrada a partir de planilhas externas. Um computador equipado com processador Intel Core i7 1.8 GHz e 8 GB de memória RAM, com sistema operacional Windows 10, foi utilizado durante os testes computacionais. Como ferramenta de otimização, utilizou-se o *solver* IBM ILOG CPLEX 12.6 (IBM, 2015).

As análises de verificação e validação dos modelos foram feitas com os exercícios dos Apêndices I, II, III e IV por serem menores e com resultados mais previsíveis. Em sequência, os modelos foram testados com dados reais de uma armadora brasileira para que fosse possível um melhor entendimento da ordem de grandeza de um problema real. Por questões de segurança de informação da empresa todos os custos utilizados são hipotéticos. Os demais dados utilizados foram baseados em entrevistas e questionários aplicados a tripulantes, embarcadores e pessoas envolvidas no processo de programação.

5.1 VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS MODELOS

A verificação e validação dos modelos foi realizada por meio de alguns testes lógicos. Dos quatro navios do exercício proposto nos Apêndices, apenas três atracam no Modelo 1 e Modelo 2, e 4 no Modelo 3 e Modelo 4. São 8 pessoas embarcadas no total das categorias, três da Categoria 0 e 5 da Categoria 1, das quais seis necessitam de desembarque (3 da Categoria 0 e 3 da Categoria 1). São 3 pessoas em terra para o Modelo 1 e Modelo 2, e quatro para o Modelo 3 e Modelo 4 (2 em cada dia). Foram realizados cinco testes de variação extrema dos custos cujos objetivos são abordados a seguir e os resultados estão mostrados na Tabela 5.1:

- Teste 1: Foram colocados custos altos para a movimentação dos tripulantes do navio para seu ponto de referência portanto mesmo que seja baixo o custo de levar pessoas de terra para os navios, espera-se que a solução mantenha o máximo de tripulantes a bordo. No caso dos Modelos 3 e 4, o custo de transferência é igualmente alto.
 - ✓ Resultado do Teste 1: O teste mostrou que os Modelos 1 e 2 deram a mesma resposta, assim como os Modelos 3 e 4, ou seja, todos os tripulantes foram mantidos nos respectivos navios.
- Teste 2: Com a mesma proposta do Teste 1, foram designados custos elevados de deslocamento dos tripulantes de terra para os navios, portanto mesmo que seja baixo o custo de desembarcar quem necessita, espera-se que manter o maior número possível de tripulantes a bordo. Nos Modelos 3 e 4, o custo de transferência também é alto para que não seja feita a opção de transferência entre navios.
 - ✓ Resultado do Teste 2: Como esperado, os resultados deram iguais aos do Teste 1, ou seja, todos os tripulantes permanecem embarcados por mais uma viagem.
- Teste 3: Este teste coloca um baixo custo de embarque e desembarque de tripulantes do ponto de referência ou para o ponto de referência. Desta forma, busca-se utilizar o máximo de tripulantes possíveis em terra. Caso não haja tripulante suficiente para embarque, espera-se manter nos navios os que gerem menor custo de adicional, e espera-se desembarcar todos os outros, substituindo-os por pessoas em terra. Nos Modelos 3 e 4 também é considerado um custo altíssimo de transferência.
 - ✓ Resultados do Teste 3: Tanto nos Modelos 1 e 2 como nos Modelos 3 e
 4, todos os tripulantes que estavam em terra foram embarcados.
- Teste 4: O objetivo deste teste é realizar a maior quantidade de movimentações possíveis de transferência, por esta razão é aplicável apenas para os Modelos 2 e
 4. Para tanto foram considerados custos altos de deslocamentos dos tripulantes para os pontos de referência e do ponto de referência para os navios.

- ✓ Resultados do Teste 4: Neste teste o resultado foi que nenhum tripulante foi transferido, sendo todos foram mantidos nos seus respectivos navios. Isso se deve ao fato de que o número de dias da próxima viagem é igual para todos os navios, por conta disso a transferência não é escolhida. O interessante deste teste é perceber que um tripulante é escolhido para transferir de um navio a outro apenas se a viagem do outro navio for menor ou igual ao do seu navio de origem, com um custo de movimentação que justifique esta transferência.
- Teste 5: Foram testados os exercícios propostos nos Apêndices sem mudanças nos dados do enunciado, para verificar se existiria alguma dificuldade na busca do resultado.
 - ✓ Resultados do Teste 5: Não foi encontrado nenhuma dificuldade na busca pela solução, a qual foi encontrada em menos de 5 segundos.

Tabela 5.1: Resultados dos Testes de Verificação e Validação dos Modelos

	Objetivo	Custos	Modelos	Permanência no	Desembarques para o ponto de	Desembarques para	Embarques de tripulantes dos pontos	FO
Testes				navio	referência	transferências	de referência	
	.,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,	$\alpha, \Upsilon = Ap$ êndice I e II	1			na		
	rorçar o maximo de	$\omega = 100.000$,	9	1		•	36.510
_	tripulantes a	$(\delta = 100.000 - Modelo 2)$	7			ı		
-	permedec. é cere ir nere	$\alpha, \Upsilon = \text{Apendice III e IV}$	3			n.a		
	o nonto de referência	$\omega = 100.000$		9	•		•	38.510
	o poino de referenda	$(\delta = 100.000 - Modelo 4)$	4			-		
	Forçar o máximo de	$\alpha, \omega = \text{Apendice I e II}$	1			na		
	tripulantes a	$\Upsilon = 100.000$,	9	•		•	36.510
,	permanecerem	$(\delta = 100.000 - Modelo 2)$	7			•		
1	embarcados: caro levar	$\alpha, \omega = \text{Apendice III e IV}$	3			n.a		
	alguem do ponto de	$\Upsilon=100.000$	•	9	•		•	38.510
	referência	$(\delta = 100.000 - Modelo 4)$	4			_		
		α = Apêndice I e II	1			n.a		
	Forçar o máximo de	$\omega = 1$,	,		,	13 703
	tripulantes a	$\Upsilon = 10$	2	c	ç	•	c	13./83
"		$(\delta = 100.000 - Modelo 2)$						
)	ponto de referência com	α = Apêndice III e IV	3			n.a		
	outros embarcando de	00=1			_			13 793
	terra	$\Upsilon = 10$	4	C	+	ı	4	13.703
		$(\delta = 100.000 - Modelo 4)$						
	Lorons o máximo do	VII o II o IV	2	9	•	-	•	36.510
4	roiçai o maximo de tripulantes a se	$\alpha - Apendice II e I v$ $Y, \omega = 100.000$	•					0.00
	transferirem de seus navios	$\delta = 1$	4	0		'	1	38.310
	Docolyna on paradolog	II o I coibugur — o V n	1	3	3	n.a	3	16.780
v	S dos Anândioss de socrdo	a, 1, 00 – Apendice 1 e 11	2	3	3	-	3	16.780
J	uos Apendices de acondo	Y & X = Anândioa III a IV	3	2	4	na	4	13.690
	com os enunciados	α, 1, ω, υ – προικικό μι σ 1 ν	4	2	4	1	4	13.690

Os resultados dos testes encontram-se dentro do que era esperado de cada um, o que significa dizer que os modelos respondem de forma adequada ao que foi proposto, respeitando todas as restrições.

5.2 ESTUDO DE CASO – EMPRESA DE NAVEGAÇÃO BRASILEIRA

A fim de entender um problema de programação de tripulantes real, foram realizadas diversas entrevistas para a coleta de dados e compreensão das restrições do sistema de uma das maiores armadoras da América Latina. Para garantia de segurança da informação, os dados fornecidos neste trabalho correspondem apenas a uma ordem de grandeza do problema.

No caso desta empresa, a programação de embarque e desembarque de tripulantes não é realizada com o auxílio de uma ferramenta de otimização, alegando-se que não foi encontrada no mercado uma ferramenta que se adequasse ao sistema de banco de dados, e incorporasse todas as restrições e particularidades existentes.

A principal diferença com os modelos propostos é que as equipes de cada navio são préfixadas, e sempre o mesmo grupo de pessoas são alocadas ao mesmo grupo de navios, independente do custo. Basicamente o sistema propõe três tripulações para cada dois navios, sendo assim, em um regime de 90/45 por exemplo, verifica-se que o tripulante titular do navio 1 e o tripulante titular do navio 2 são rendidos por um terceiro tripulante em um sistema de rotação a cada 45 dias, similar ao exemplo da Figura 5.1.

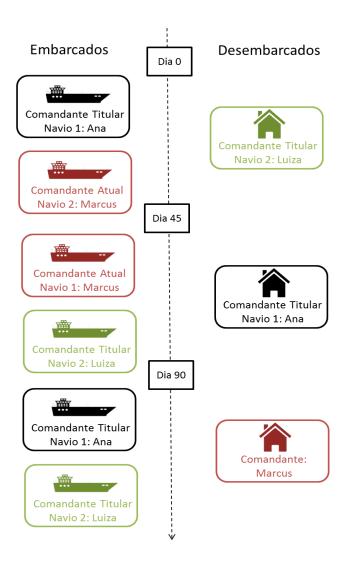


Figura 5.1: Sistema de tripulação fixa

Essa estratégia foi baseada em experiências anteriores com relação a afinidades entre tripulantes de uma mesma equipe e de bom desempenho das tarefas naquela embarcação. Pelo lado comportamental e de segurança do navio, esta decisão é bastante eficiente, porém é questionada pela empresa por conta do viés econômico.

Considerando então que a empresa seja armadora de 42 navios e possua uma tripulação disponível total de 1364 tripulantes das 19 categorias identificadas. A programação destes tripulantes é realizada para intervalos de período de 7 dias. A Tabela 5.2 e o Apêndice V detalham os principais dados utilizados para este teste. São identificados, dentro do período de programação proposto, quantos tripulantes estão disponíveis em terra, quantos de cada categoria estão embarcados e em quais navios, assim como a variação de adicionais de embarque diários (o mínimo, a moda e o máximo valor

utilizado). Os custos de deslocamento entre ponto de referência/navio/ponto de referência e navio/navio são atribuídos de forma aleatória, variando entre 50 e 2000. Os períodos das próximas viagens podem variar de 3 a 15 dias.

Tabela 5.2: Dados de entrada do estudo de caso

Categoria	Adicional de	Embarcados		De	sembai	cados	(por d	ia)	
	embarque diário (Min; Média; Max)		0	1	2	3	4	5	6
0	(830; 921; 1025)	32	3	8	9	10	10	10	11
1	(691; 782; 890)	107	5	13	15	19	23	25	27
2	(592; 696; 789)	100	6	15	20	20	22	22	22
3	(303; 419; 500)	33	2	7	8	12	12	12	12
4	(300; 405; 498)	54	2	4	4	7	9	11	12
5	(1263; 1364; 1450)	48	1	3	4	5	5	7	7
6	(1420; 1521; 1620)	45	5	7	8	9	9	9	10
7	(350; 447; 550)	43	1	3	3	7	7	8	8
8	(180; 277; 379)	80	3	7	9	13	13	13	13
9	(345; 436; 538)	45	1	3	4	8	8	9	9
10	(338; 1384; 1519)	46	2	8	8	9	9	11	12
11	(226; 389; 499)	37	2	4	4	6	6	7	7
12	(180; 279; 378)	107	6	8	11	20	23	24	26
13	(160; 276; 379)	94	6	13	15	17	19	20	22
14	(135; 241; 329)	80	2	6	9	11	11	12	13
15	(134; 306; 1004)	38	1	2	2	3	3	5	6
16	(722; 900; 1017)	29	0	0	0	0	0	0	1
17	(694; 795; 890)	70	3	4	8	8	8	8	8
18	(181; 288; 380)	43	2	5	5	5	5	5	5
19	(319; 385; 452)	2	0	0	0	0	0	0	0
	Total	1101	53	120	146	189	202	218	231

Com relação à solução dos quatro modelos propostos, a comparação que deve ser realizada é sempre do Modelo 1 com o Modelo 2 (um dia de programação), e do Modelo 3 com o Modelo 4 (período de dias de programação) por apresentarem características semelhantes. Foram testados também as possibilidades de 5, 15, 25, 35 e 42 navios estarem atracados no mesmo dia (Modelos 1 e 2) ou no mesmo período (Modelos 3 e 4).

Os resultados obtidos são expostos na Tabela 5.3. A partir deles foram realizadas alguns cenários de análises:

- Cenário 1: Impacto da variação da quantidade de navios atracados na função objetivo;
- Cenário 2: Representatividade da permissão de transferência de tripulantes entre navios no custo total (ou seja, comparar a função objetivo entre os Modelos 1 e 2 e entre o 3 e 4);
- Cenário 3: Comportamento das movimentações de tripulantes com a variação dos modelos para uma mesma quantidade de navios atracados;
- Cenário 4: Impacto da quantidade de tripulantes disponíveis em terra nas decisões sobre movimentações;
- Cenário 5: Impacto da variação do custo da diária dos tripulantes na função objetivo; e
- Cenário 6: Impacto da variação dos custos de movimentação (deslocamentos) no custo total;

Tabela 5.3: Informações e resultados dos cenários do estudo de caso

Navios	Modelos	Necessidades de Desembarque	Permanência no navio	Desembarques para o ponto de referência	Desembarques para transferências	Embarques de tripulantes dos pontos de referência	Tripulantes aguardando embarque nos pontos de referência	G
	Modelo 1	8	4	4	n.a	4	52	16.701
L	Modelo 2	8	3	4	1	4	52	16.309
Sinavios	Modelo 3	5	-	5	n.a	5	231	2.146
	Modelo 4	5	-	5	•	1	231	2.146
	Modelo 1	28	14	14	n.a	14	52	86.961
75	Modelo 2	28	10	14	4	14	52	85.684
SOLIANIOS	Modelo 3	27	5	22	n.a	22	231	27.207
	Modelo 4	27	4	22	1	22	231	23.265
	Modelo 1	46	24	22	n.a	22	52	131.544
25	Modelo 2	46	17	22	7	22	52	129.012
20 Havios	Modelo 3	65	8	57	n.a	57	231	72.275
	Modelo 4	65	9	56	3	26	231	68.385
	Modelo 1	99	36	30	n.a	30	52	169.169
25	Modelo 2	99	23	31	12	31	52	165.122
SOLIANICS	Modelo 3	80	13	29	n.a	29	231	99.965
	Modelo 4	80	12	99	2	99	231	96.299
	Modelo 1	85	49	36	n.a	36	52	235.569
ocirca CV	Modelo 2	85	32	34	19	34	52	220.284
42 1190103	Modelo 3	91	18	73	n.a	73	231	118.164
	Modelo 4	91	14	71	9	71	231	112.173

✓ Cenário 1: Variação da função objetivo (FO) com o aumento da quantidade de navios atracados

A primeira análise proposta é verificar como que a FO varia com o aumento gradativo da quantidade de navios atracados: 5, 15, 25, 35 e 42. De acordo com a Figura 5.2, verifica-se que quanto maior a quantidade de navios atracados, maior a diferença entre os valores da FO entre modelos. No caso dos 42 navios, o custo da FO dos Modelos 3 e 4 é quase 50% do custo da FO para os Modelos 1 e 2.

Isso se deve ao fato que o Modelo 3 e Modelo 4 consideram um período de programação, composto por uma maior disponibilidade de tripulantes que voltam de suas folgas diariamente, além de abrir maiores possibilidade de transferência entre embarcações.

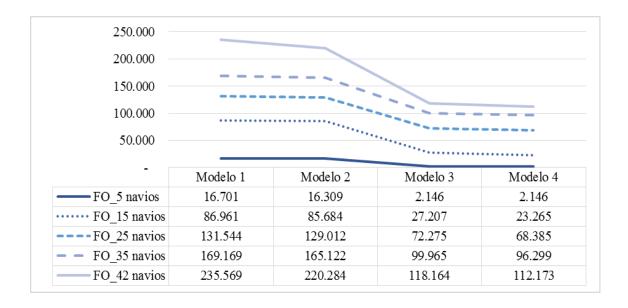


Figura 5.2: Impacto da quantidade de navios atracados na FO

✓ Cenário 2: Impacto da permissão de transferência de tripulantes entre navios na FO

Este teste verificou que do Modelo 1 para o Modelo 2 e do Modelo 3 para o Modelo 4, existe uma diferença muito pequena (de no máximo 8%) no custo total de alocação dos tripulantes por conta da permissão de transferência de tripulantes entre navios, como pode ser visto na Figura 5.3.

Isso indica que de uma forma geral a transferência é uma opção pouco utilizada. As transferências são consideradas boas opções somente se o tripulante vai para um navio que realizará uma viagem menor ou igual a do navio em que esteja, no qual ele não receberá adicional ou receberá menos, e que o custo de movimentação entre os navios realmente compense esta mudança.

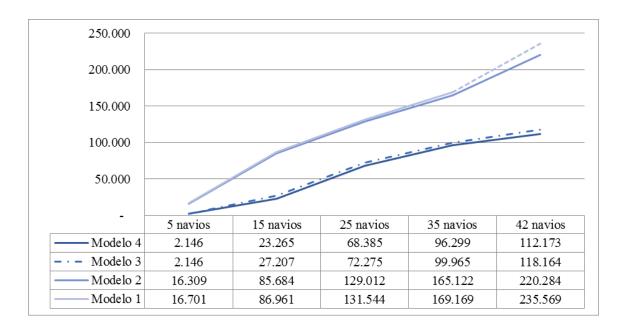


Figura 5.3: Impacto da permissão de transferência entre navios na FO

✓ Cenário 3: Impacto da variação dos modelos nas movimentações dos tripulantes

Nas entrevistas com a empresa do estudo de caso, foi comentado que para uma frota de 42 navios, é comum que em média de 15 a 25 navios estão atracados para um período de 7 dias de programação. Desta forma foi escolhido o cenário de 15 navios atracados para realizar esta avaliação.

Como visto na Tabela 5.3, para 15 navios atracados do estudo de caso, verifica-se que 28 tripulantes necessitam de desembarque no enunciado dos Modelos 1 e 2 e 27 nos Modelos 3 e 4. Como citado no início deste capítulo, os modelos que devem ser comparados são o 1 com o 2 e o 3 com o 4. Apesar dos enunciados serem praticamente iguais, o fato do Modelo 3 e 4 trabalharem com um período de 7 dias de programação, modifica o dia que o mesmo atracará novamente depois de uma viagem, por contabilizar

o tempo de embarque do ultimo dia atracado (enquanto que para o Modelo 1 e 2, isso é contabilizado do próprio dia de programação).

A Figura 5.4 indica que para o Modelo 1 a solução ótima foi manter 14 tripulantes embarcados em seus navios recebendo 14 de terra dos 52 que estavam disponíveis. Já a solução do Modelo 2 foi manter 10 tripulantes, transferir 4 entre navios e receber 14 do ponto de referência. Para o Modelo 3, a solução foi manter 5 tripulantes em seus navios e embarcar 22 de terra. Com a permissão de transferência do Modelo 4, foram mantidos 4, um foi transferido de navio e 22 dos 231 disponíveis em terra foram embarcados.

Percebe-se então que para o Modelo 3 e 4 de programação de um período de 7 dias, foi possível encontrar opções mais econômicas de movimentação, nas quais pudessem desembarcar uma quantidade maior de tripulantes que entrariam em adicional de embarque, com colegas disponíveis em terra para rendê-los.

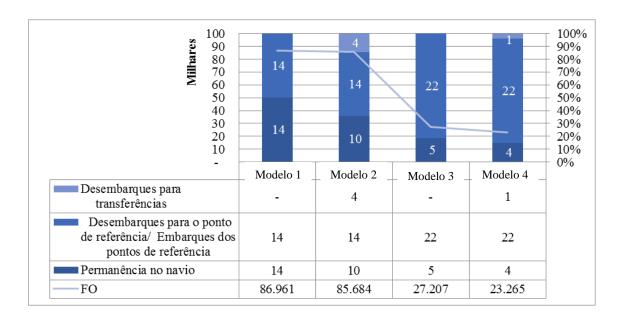


Figura 5.4: Diferenças nas alocações de tripulantes entre modelos para 15 navios atracados

✓ Cenário 4: Impacto da variação de pessoas em terra na FO

Em sequência da análise anterior, busca-se verificar neste cenário qual o impacto da variação da quantidade de tripulantes disponíveis em terra na função objetivo. Sendo assim, considere novamente o exemplo dos 15 navios atracados e o Modelo 2 (por ser mais simples, de apenas um dia de programação, mas que permite a transferência entre navios). As variações de quantidade de pessoas vão de -75% até +75% de pessoas em

terra aguardando o pedido de embarque (comparado com o mesmo enunciado dos 15 navios da Tabela 5.3.

De acordo com a Figura 5.5, verifica-se que quanto menos tripulantes são disponibilizados em terra, mais colegas necessitam permanecer por mais uma viagem, o que leva a um custo maior de FO. Porém percebe-se que a quantidade de tripulantes que embarcam de seus pontos de referência atinge um patamar. Isso pode ocorrer com mais frequência para categorias com adicionais de baixo custo, nos quais o deslocamento para terra e o embarque de um colega não justificam economicamente a sua saída.

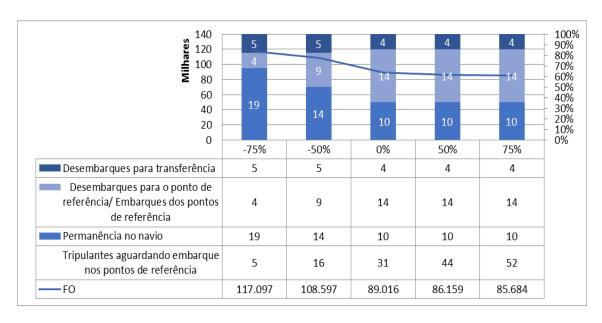


Figura 5.5: Impacto da variação de pessoas em terra na FO do Modelo 2 para 15 navios atracados.

✓ Cenário 5: Impacto do custo da diária dos tripulantes na FO

Este quinto cenário verifica como que a função objetivo se comporta com o aumento gradativo dos custos de diárias dos tripulantes. Foi considerado para tanto 15 navios atracados e o Modelo 1 (o qual não possibilita transferência). As variações de custo com relação a este exemplo foram de -50% a +50% com intervalos de 10%.

De acordo com a Figura 5.6, a função objetivo responde de forma linear aos aumentos de adicionais de embarque com 0,99 de coeficiente de correlação. Portanto é esperado que o custo total com alocação de tripulantes responda na mesma proporção de aumento anual do salário dos tripulantes (que é a base de cálculo para os adicionais).

Verifica-se também que quanto maior o custo diário de adicional, mais pessoas são desembarcadas e enviadas para seus pontos de referência. E da mesma forma como o Cenário 4, a quantidade de tripulantes que permanecem embarcados varia em patamares. Mesmo existindo 52 tripulantes disponíveis em terra, no limite máximo de aumento de diária (50%) mantiveram-se 12 tripulantes por mais uma viagem. Isso novamente pode ocorrer com as categorias que os adicionais são de custo inferior aos custos de movimentação.

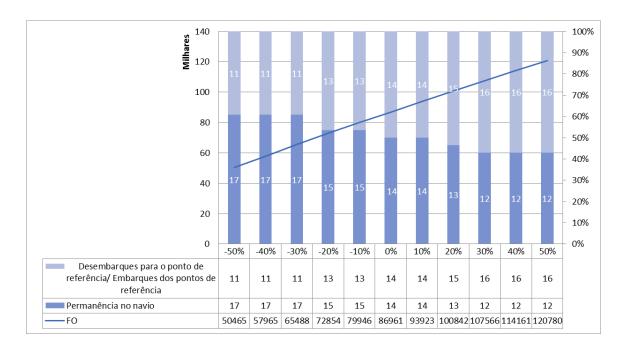


Figura 5.6: Impacto do custo da diária dos tripulantes na FO

✓ Cenário 6: Impacto da variação dos custos de movimentação na FO

O ultimo cenário, da Figura 5.7, verifica o aumento da FO com a variação dos custos de deslocamento dos tripulantes entre os pontos de referência/ navios e entre navios/navios, para as mesmas 15 embarcações atracadas e a aplicação do Modelo 2 (para considerar também os custos de transferência). As variações de custo foram de -50% a +50% com intervalos de 25%.

Da mesma forma como no Cenário 5, a FO também responde linearmente com 0,99 de coeficiente de determinação, o que significa dizer que um aumento no custo geral de movimentações impacta na mesma proporção no custo total da função objetivo para este estudo de caso.

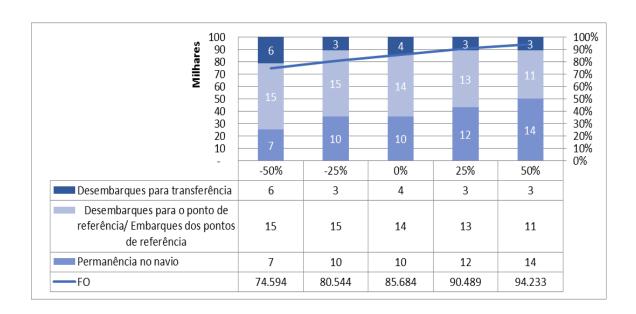


Figura 5.7: Impacto da variação dos custos de movimentação na FO

5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentados alguns testes de verificação e validação dos modelos e a aplicação em um sistema de dimensões reais de uma armadora brasileira. Verificouse que o impacto de uma programação em um período de dias na função objetivo é muito maior do que a possibilidade de transferência entre navios.

A transferência é uma opção bastante específica que exige que a viagem do navio para o qual o tripulante está sendo transferido seja menor ou igual ao do navio no qual esteja embarcado, sendo os custos de movimentação interessantes para que essa movimentação ocorra.

Outro ponto importante é com relação a resposta linear da FO com as variações de custo de adicionais e de movimentações e a existência de um patamar na quantidade de tripulantes que desembarcam, mesmo com o aumento de tripulantes disponíveis em casa.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base no exposto nesta dissertação, pode-se concluir que a pesquisa alcançou o objetivo de propor modelos de programação de embarque e desembarque de tripulantes marítimos. Estes modelos buscam realizar a programação com o menor custo, respeitando premissas básicas do problema. E apesar da motivação exposta nos capítulos iniciais enfatizar a cabotagem, os modelos foram desenvolvidos de forma livre, ou seja, aplicáveis ao contexto de embarque e desembarque de forma geral.

A literatura apresenta uma carência de trabalhos sobre gerenciamento e otimização de embarque e desembarque de tripulantes marítimos e isso pode ser resultado de uma composição de fatores: incertezas sobre os períodos de atracação e desatracação dos navios; necessidade de uma base de dados de entrada robusta dos custos envolvidos; necessidade da excelência em treinamentos para que os tripulantes estejam sempre aptos a assumirem o trabalho de uma quantidade cada vez maior de navios; e quebra de paradigma do processo que é realizado hoje, na qual o custo é uma variável pouco significativa nas decisões comparada à interação e desempenho da equipe.

Cada empresa apresenta uma forma de realizar sua programação, portanto os modelos devem ser adaptados a cada situação para que representem de forma mais fiel as decisões tomadas pelas equipes embarcadoras que não utilizam ferramentas de otimização. Os modelos apresentados são um primeiro passo na busca de soluções mais econômicas de programação.

Verificou-se ao longo do estudo a importância que é dada ao envolvimento da equipe, e a uma melhor distribuição das cargas de trabalho para pessoas em regime de confinamento por períodos longos de tempo. Um primeiro possível avanço dos modelos propostos é a incorporação destes pontos na função objetivo, sendo importante um acompanhamento regular e treinamentos que ajudem a melhor interação entre tripulantes de diferentes navios.

Outro ponto importante é a flexibilização dos tripulantes na operação de mais navios com características diferentes. Quanto mais o tripulante é especialista de uma categoria ou série de navios, menos flexível ele é na alocação dos mesmos aos navios. É

importante que a empresa possa oferecer constantes treinamentos para os marítimos e contato com diferentes sistemas de navios.

A questão das incertezas com relação à atracação e desatracação dos navios também pode ser estudada com mais profundidade. A infraestrutura brasileira de portos e terminais é antiga, e muitas vezes é considerada um gargalo para o escoamento de produtos, o que implica em filas de navios aguardando a autorização para atracar. Portanto, fica mais difícil precisar as datas que os tripulantes devem estar disponíveis para assumirem a operação dos navios. Outro avanço no modelo seria considerar essas incertezas por meio das probabilidades dos históricos de atracação e desatracação nos períodos previstos.

Também poderia ser interessante considerar o local para o qual os navios estão se direcionando, caso o ponto de referência do tripulante que precisa desembarcar seja mais próximo do local para onde a embarcação está seguindo. Porém qualquer necessidade de informação de um horizonte maior, implica na consideração de vários outros pontos como: quem estará disponível em terra, onde e quando os navios vão atracar para verificar a possibilidade de transferências, entre outros, e nem sempre essas informações são verificáveis para o próprio período de programação, quanto mais para um período maior. Portanto essa questão do período de programação é importante estar muito bem definida para que se possa entender os limites dos modelos.

Verificou-se também, a partir dos resultados, a necessidade de se introduzir um limite máximo de dias que o tripulante pode ficar embarcado. Em algumas situações, as soluções mostraram uma recorrência quanto a manter os mesmos tripulantes a bordo, e isso pode interferir diretamente na qualidade do trabalho e na segurança da operação.

Questões importantes surgirão com o desenvolvimento deste estudo como: quanto realmente o adicional de embarque é um "adicional", ou seja, um pagamento extra e que deve ser minimizado, e com que frequência ele na verdade acaba sendo a opção mais econômica ou até mesmo única para a continuidade da operação. Percebeu-se com a análise do impacto da variação de tripulantes em terra, que mesmo tendo mais pessoas disponíveis para embarcar, as soluções consideram uma mesma quantidade de tripulantes para permanecer. Isso é um indicativo de que talvez, em algumas situações específicas, o adicional de embarque seja a melhor opção.

Por fim, os modelos são um primeiro passo no desenvolvimento de ferramentas e métodos de apoio à decisão na programação de embarque e desembarque de tripulantes marítimos. Deve-se agora avançar com os aprimoramentos, como aportado anteriormente, para que se obtenha de fato um gerenciamento mais adequado e econômico da força de trabalho disponível.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERG, N., STOGARD, J., LAPPALAINEN, J.,2013, **The Impact of Ship Crews on Maritime Safety**, Publications of the centre for maritime studies A 64, University of Turku.

BRASIL. Lei 9.537. 11 de dezembro de 1997a. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19537.htm Acesso em: 14 de jul 2016, 18:29

BRASIL. Lei 9.432. 8 de janeiro de 1997b. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19537.htm Acesso em: 14 de jul 2016, 18:29

BRASIL. Decreto 90.672. 7 de dezembro de 1997c. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil-03/decreto/1970-1979/D80672.htm Acesso em: 14 de jul 2016, 18:29

BURKARD, R. E., ÇELA, E., 1999, "Linear Assignment Problems and Extensions". In: Ding-Zhu Du, Panos M. Pardalos, **Handbook of Combinatorial Optimization**, Graz, Austria, Kluwer Academic Publishers, pp 75 - 149.

BUSSÖW, T., JOHN, O., 2013, **Best Practice Ship Management Study 2013**, Disponível em: http://www.cml.fraunhofer.de/content/dam/cml/de/documents/Studien/Best-practice-Studie-2013.pdf > Acesso em: 14 jul. 2016, 09:05:05.

CAMPBELL, K. W., DURFEE, R. B., HINES, G. S., 1997. "FedEx Generates Bid Lines Using Simulated Annealing", **Interfaces**, v 27, n. 2 (Mar. – Apr.), pp 1 – 16.

CARLISLE, R., 2009, "Second Registers: Maritime Nations Respond to Flags of Convenience", **Journal The Nothern Mariner**, v.19, pp. 319 - 340.

CARVALHO, A. L., 2000, **Gerenciamento de Tripulações de Navios Mercantes.** Tese de Mestrado , COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

CAVIQUE, L., REGO, C., THEMAIDO, I., 1999, "Subgraph ejection chains and tabu search for the crew scheduling problem", **Journal of the Operational Research Society**, v. 50, n. 6 (Jun.), pp. 608 - 616.

ÇELA, E, 2002. "Assignment Problems". In: Panos M. Pardalos, M. Resende, **Handbook of Applied Optimization, Part II – Aplications**, Graz, Austria, Oxford University Press, pp. 661 - 678.

CNT, 2013, **Pesquisa CNT do Transporte Aquaviário - Cabotagem 2013,** Confederação Nacional do Transporte, Brasília.

DREWRY MARITIME RESEARCH, 2011, Ship Operating Costs Annual Review and Forecast.

DREYER, I., GERALD, S., 2013, "The shale gas 'revolution", **EUISS - European Union Institute for Security** Studies, ISSN: 2315-1110, February.

ERNST, A., JIANG, H., KRISHNAMOORTHY, M., *et Al*, 2004, "An Annotated Bibliography of Personnel Scheduling and Rostering", **Annals of Operations Research**, v. 127, pp 21 – 144.

FRELING, R., LENTINK, R., ODIJK, M., 2001, "Scheduling Train Crews: A Case Study for the Dutch Railways", **Computer-Aided Scheduling of Public Transport**, v. 505 of Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, pp 153 – 165.

GERSHKOFF, I., 1989, "Opmitimazing flight crew schedules", **Interfaces**, v.19, n. 4 (Aug.), pp 29-43.

GIANCHETTI, R. E., DAMODARAN, P., MESTRY, S, 2013, "Optimization-based decision support system for crew scheduling in the cruise industry", **Journal of Computers & Industrial Engineering**, v. 64, n. 1 (Jan.), pp 500 – 510.

GILBERT, K. C., HOFSTRA, R.B, 1988 "Multidimentional Assignment Problems", In: **Decision Sciences**, v. 19, pp 306 – 321.

GOMES, W. P., 2009, **Programação de Tripulantes de Aeronaves no Contexto Brasileiro**, Tese de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil

GOMES, W. P., GUALDA, N. D., 2015, "Heuristics to solve the integrated airline crew assignment problem", **Journal of Transport Literature**, v. 9, n. 1, pp. 25 - 29.

GOPALAKRISHNAN, B., JOHNSOS, E., 2005, "Airline crew scheduling: State-of-the-Art", **Annals of Operations Research**, v.140, n. 1 (Nov.), pp 305 – 307.

GUILLERMO, C. G., JOSÉ, M. R., 2009, "Hybrid algorithm of Tabu Search and Integer Programming for the railway crew scheduling problem", **Computational Intelligence and Industrial Applications**, v. 2, pp. 413 - 416.

IBM, 2015, IBM ILOG CPLEX versão 12.6.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION, 1999 Disponível em: http://www.imo.org/en/OurWork/HumanElement/VisionPrinciplesGoals/Documents/8 http://www.imo.org/en/Ourwork/HumanElement/VisionPrinc

JOHN, O. G., GAILUS, S., 2014, "Model for a Specific Decision Support System for Crew Requirement Planning in Ship Management", **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 147, pp 275 - 283.

JOHN, O., BÖTTCHER, M., JAHN, C., 2013, "Decision Support for the Crew Scheduling Problem in Ship Management", **International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries**, N-256281,.Cortona, Italy.

KARP, R., 1972, "Reducibility among combinatorial problems", In. Raymond E. Miller, James W. Thatcher, Jean D. Bohlinger, **Complexity of Computer Computations**, California, EUA, Springer, pp. 85 – 103.

Symposium on Mathematical Programming at the University of Wisconsin at Madison.

KOHL, N., KARISCH, S., 2004, "Airline crew rostering: Problem types, modeling and optmization", **Annals of Operations Research**, v. 127, n. 1 (Mar.), pp 223 – 257.

KUHN, H. W., 1955, "The Hungarian Method for the Assignment Problem", **Naval Research Logistics quartely**, v. 2, n. 1 – 2 (Mar.), pp 83 - 97.

KUMAR, V. P., BIERLAIRE, M., GALLAY, O., 2010, "Generalized Algorithms for Crew Planning: Survey and Future Directions for Railways", **Swiss Transport Research Conference**, 152346, Ascona, Switzerland.

LEGGATE, A, 2009. "An Investigation into the Vessel Crew Scheduling Problem".

MARINHA DO BRASIL, 2013, NORMAN 13. Disponível em: https://www.dpc.mar.mil.br/sites/default/files/normam13_0.pdf Acesso em: 14 jul 2016, 18:21

MINISTÉRIO DO TRABALHO, 2006, Resolução Normativa n. 72 do Conselho Nacional de Imigração. Disponível em: http://www.normaslegais.com.br/legislacao/resolucaocni72.htm Acesso em: 14 de jul 2016, 18:25

PENTICO, D. W, 2007, "Assignment problems: A golden anniversary survey", **European Journal of Operational Research**, v. 176, pp 774 - 793.

PIERSKALLA, W. P., 1968, "The Multidimensional Assignment Problem. Operations Research", **Operations Research**, v 16, pp. 422 - 431.

SENNE, E., MÉLLO, F., LORENA, L., 2006, "Uma abordagem para o problema de escalonamento de motoristas", **Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, 1676 – 1901, Fortaleza, Ceará, Brasil, 9-11 out.

SHEN, Y., KWAN, R., 2001, "Tabu Search for Driver Scheduling", **Computer-Aided Scheduling of Public Transport**, v 505 of the series Lectures Notes in Economics and Mathematical Systems, pp. 121-136.

SHODI, M., NORRIS, S., 2004, "A flexible, fast and optimal modeling approach applied to crew rostering at London Underground" **Annals of Operations Research**, v. 127, n. 1 (Mar.), pp. 259-281.

SPIEKSMA, F. C., 2000, "Multi Index Assignment Problems: Complexity, Approximation, Applications" In: Pardalos, P. M., Pitsoulis, L, **Non Linear Assignment Problems**, chapter 1, Springer.

STCW, 1978. International Conventions of Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafares. Disponível em: https://cil.nus.edu.sg/rp/il/pdf/1978%20STCW%20Convention%20Amended%20by%202010%20Manila%20Amendments-pdf.pdf Acessoem: 14 de jul de 2016.

STOPFORD, M., 2008, Maritime Economies, 3 ed, New York, Routledge.

SYNDARMA, 2011, **Oferta e Demanda de Oficiais de Marinha Mercante no Mercado Brasileiro**, Disponível em: http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/camaras_tematicas/Infraestrutura_e_logistica/28RO/App_Syndarma.pdf > Acesso em: 14 jul. 2016, 14:33:17

TRANSPETRO, 2013. Acordo Coletivo de Trabalho. Disponível em: http://sindipetropepb.com.br/wp-content/uploads/2014/03/ACT-2013-2015-TRANSPETRO.pdf Acesso em: 14 de jul de 2016.

U.S DEPARTMENT OF TRANSPORTATION MARITIME ADMINISTRATION, 2011, Comparison of U.S and Foreign Flag Operating Costs, US.

UNCTAD, 2015, **Review of Maritime Transport**, United Nations Conference on Trade and Development, Geneva, Switzerland.

VELASCO, L., & LIMA, E., 1997, A Marinha Mercante, BNDES, Rio de Janeiro.

WANG, F., CHEN, B., MIAO, Z., 2008, "A Survey on Reviewer Assignment Problem", **IEA/AIE** '08 Proceedings of the 21st international conference on Industrial, Engineering and Other Applications of Applied Intelligent Systems: New Frontiers in Applied Artificial Intelligence, pp 718 - 727.

WERMUS, M., POPE, J., 1994, Scheduling Harbor Pilots, **Interfaces**, v. 24, n. 2 (Apr.) pp. 44 - 52.

APÊNDICE I – EXERCÍCIO DO MODELO 1

Considere um conjunto de categorias de tripulantes marítimos $G = \{0,1\}$, sendo a categoria 0 de comandantes e 1 de condutores de máquinas. Cada categoria $g \in G$ identifica um conjunto de tripulantes, sendo eles: $C_0 = \{0,1,2,3\}$ relativos, respectivamente, a $\{Ana, Araujo, Agnes, Carlos\}$ e $C_1 = \{0,1,2,3,4,5,6\}$ relativos, respectivamente, a $\{Beatriz, Bruno, Bianca, Bartolomeu, Bart, Dalva, Danilo\}$.

Considere também um conjunto $S = \{0,1,2,3\}$ de navios relativos, respectivamente, a $\{Celso\ Furtado, Sergio\ Buarque\ de\ Holanda,\ Romulo\ Almeida,\ José\ Alencar\}.$

O posicionamento dos navios é dado pela Tabela I. 1. Portanto define-se que o conjunto de navios atracados é $Sh = \{0,1,2\}$ para o dia d = 0 para o qual se deseja realizar a programação.

Tabela I. 1: Posicionamento dos navios no dia d

Navio (s)	SP _s	Local
0	1	Suape
1	1	Santos
2	1	São Francisco do Sul (SFS)
3	0	-

Considere que o conjunto de tripulantes embarcados é definido por $Cb_0 = \{0,1,2\}$ e $Cb_1 = \{0,1,2,3,4\}$. O conjunto complementar de tripulantes disponíveis em terra para embarque é dado por $\overline{Cb}_0 = \{3\}$ e $\overline{Cb}_1 = \{5,6\}$ como na Tabela I. 2.

Tabela I. 2: Tripulantes aguardando embarque

Dia\Categoria (d\ g)	0	1	1
0	3	5	6

O posicionamento dos tripulantes embarcados é dado pela Tabela I. 3. Verifica-se que não existe tripulante da ategoria 0 no navio 3, enquanto que da categoria 1 existem dois tripulantes no navio 0, o tripulante 0 e o tripulante 4.

Tabela I. 3: Posicionamento dos Tripulantes no dia d

			CF	pgs				
Categoria (g)		0				1		
Navio\Tripulante (s\p)	0	1	2	0	1	2	3	4
0	1	0	0	1	0	0	0	1
1	0	1	0	0	1	0	0	0
2	0	0	1	0	0	1	0	0
3	0	0	0	0	0	0	1	0

Considerando o parâmetro tempo de embarque, B_{pg} , e considerando que as viagens de todos os navios atracados são de $K_s=10$ dias até a próxima atracação, tem-se que os tripulantes com necessidade de desembarque, ou seja, para o qual $B_{pg}+K_s>Sea$, são dados por \overline{D}_{000} , \overline{D}_{101} , \overline{D}_{202} , \overline{D}_{010} , \overline{D}_{212} e \overline{D}_{410} (Tabela I. 4). Observa-se que para o navio 3 que não está atracado não são realizadas analises de desembarque, assim como para os tripulantes que estão em terra.

Tabela I. 4: Necessidade de Desembarque de tripulantes

Categoria (g)		()					1			
Tripulante (p)	0	1	2	3	0	1	2	3	4	5	6
B_{pg}	93	82	87	0	85	80	95	75	86	70	0
Navio (s)	0	1	2		0	1	2	3	0		
K _s	10	10	10		10	10	10		10		
$B_{pg} + K_{s}$	103	92	97		95	90	105		96		
$\overline{D}_{ m pgs}$	1	1	1		1	0	1		1		

Portanto o conjunto de tripulantes embarcados e que necessitam de desembarque é dado por $Cbd_0 = \{0,1,2\}e$ $Cbd_1 = \{0,2,4\}$. E o conjunto de navios atracados que necessitam de desembarque é dado por $Shd = \{0,1,2\}$.

A Tabela I. 5 relaciona os cartões de segurança de todos os navios da frota, utilizados como balizadores da quantidade mínima de tripulantes necessários a bordo de cada categoria, para que o navio possa realizar suas operações.

Tabela I. 5: Quantidade mínima de tripulantes por navio

	CTS _{gs}	
Navio\Categoria (s\g)	0	1
0	1	2
1	1	1
2	1	1
3	0	1

Portanto a Tabela I. 6 se refere à necessidade de embarque (E_{gs}) de cada navio atracado por categoria.

Tabela I. 6: Necessidade de embarque de tripulantes

	${\sf E_{gs}}$									
Navio\Categoria (s\g)	0	1								
0	1	2								
1	1	0								
2	1	1								

Portanto o conjunto de navios que necessitam de embarque é dado por $She = \{0,1,2\}$. O navio 3 não aparece na relação de navios que necessitam de embarque por não estar atracado. Os pontos de referência são dados pela Tabela I. 7.

Tabela I. 7: Pontos de referência dos tripulantes

	Catego			C	ategoria 1					
Tripulante (p)										
0	1	2	3	0 1 2 3 4 5 6						
Santos	Santos	Recife	Natal	Belém Santos SFS Belém Fortaleza SFS R						

Os custos com adicional diário de embarque (α_{pg}) são dados pela Tabela I. 8. Ressaltase que todos os valores monetários foram gerados de forma hipotética, apenas com a finalidade de demonstrar o modelo matemático.

Tabela I. 8: Adicional de Embarque diário

	$lpha_{ m pg}$											
Categoria (g) 0 1												
Navio\Tripulante (s\p)	0	0 1 2 3 0 1 2 3 4 5 6							6			
	1500 1300 1200 1000 550 520 500 480 460 450 400											

Portanto, o custo de se manter os tripulantes embarcados por mais uma viagem é dado por β_{pgs} , calculada considerando a duração das viagens K_s , conforme Tabela I. 9. Este custo não é calculado para tripulantes de navios que não estejam atracados. As células vazias da tabela são referentes a informações que não são calculadas ou necessárias para o modelo.

Tabela I. 9: Custo de manter o tripulante embarcado por mais uma viagem

	$eta_{ m pgs}$											
Categoria (g)		0 1										
Navio\Tripulante (s\p)	0	0 1 2 3 0 1 2 3 4 5 6								6		
0	15000			0	2750				2760	0	0	
1		2600		0						0	0	
2			8400	0			5000			0	0	

O custo de desembarcar o tripulante de seu navio e movimentá-lo até seu ponto de referência (ω_{pgs}) é apresentado na Tabela I. 10.

Tabela I. 10: Custo de enviar o tripulante para seu ponto de referência

	$\omega_{ m pgs}$											
Categoria (g)		0 1										
Navio\Tripulante (s\p)	0	0 1 2 3 0 1 2 3 4 5 6								6		
0	1400				400				300			
1		50										
2			1200				40					

O custo de movimentar um novo tripulante do seu ponto de referência até o navio que necessita de embarque (γ_{pgs}) é apresentado pela Tabela I. 11.

Tabela I. 11: Custo de deslocamento do tripulante do seu ponto de referência até o navio

	$\gamma_{ m pgs}$											
Categoria (g)	(g) 0 1											
Navio\Categoria (s\p)	0	1	2	3	0	1	2	3	4	5	6	
0				150						1200	1100	
1				1100						600	300	
2				1300						40	500	

Portanto, aplicando-se o Modelo 1 que considera um dia de programação sem possibilidade de transferência entre navios, obtém-se o modelo matemático a seguir:

Variáveis do problema:

$$X_{000}, X_{101}, X_{202}, X_{010}, X_{410}, X_{212}, Y_{300}, Y_{301}, Y_{302}, Y_{510}, Y_{512}, Y_{610}, Y_{612}$$

Função Objetivo:

$$\begin{aligned} & \textit{Minimizar} \; \{ \left[\beta_{000} (1 - X_{000}) + \, \omega_{000} X_{000} + \beta_{101} (1 - X_{101}) + \, \omega_{101} X_{101} \right. \\ & + \beta_{202} (1 - X_{202}) + \, \omega_{202} X_{202} + \beta_{010} (1 - X_{010}) + \, \omega_{010} X_{010} \\ & + \beta_{212} (1 - X_{212}) + \, \omega_{212} X_{212} + \beta_{410} (1 - X_{410}) + \, \omega_{410} X_{410} \right] \\ & + \left[(\gamma_{300} + \beta_{300}) Y_{300} \right. + (\gamma_{301} + \beta_{301}) Y_{301} \right. \\ & + (\gamma_{510} + \beta_{510}) Y_{510} \right. + (\gamma_{512} + \beta_{512}) Y_{512} \right. \\ & + \left. (\gamma_{610} + \beta_{612}) Y_{612} \right] \} \end{aligned}$$

$$(1 - X_{000}) + Y_{300} = E_{00}$$
$$(1 - X_{101}) + Y_{301} = E_{01}$$

$$(1 - X_{202}) + Y_{302} = E_{02}$$

$$(1 - X_{010}) + (1 - X_{410}) + Y_{510} + Y_{610} = E_{10}$$

$$(1 - X_{212}) + Y_{512} + Y_{612} = E_{12}$$

$$Y_{300} + Y_{301} + Y_{302} \le 1$$

$$Y_{510} + Y_{512} \le 1$$

$$Y_{610} + Y_{612} \le 1$$

$$X_{000}, X_{101}, X_{202}, X_{010}, X_{410}, X_{212} \in \{0, 1\}$$

$$Y_{300}, Y_{301}, Y_{302}, Y_{510}, Y_{512}, Y_{610}, Y_{612} \in \{0, 1\}$$

Assim, substituindo os parâmetros pelos seus respectivos valores, obtém-se a modelagem matemática a seguir.

Função Objetivo:

$$\begin{array}{l} \textit{Minimizar} \left[15000(1 - X_{000}) + 1400X_{000} + 2600(1 - X_{101}) + 50X_{101} \right. \\ \left. + 8400(1 - X_{202}) + 1200\,X_{202} + 2750(1 - X_{010}) + 400X_{010} \right. \\ \left. + 5000(1 - X_{212}) + 40X_{212} + 2760(1 - X_{410}) + 300X_{410} \right] \\ \left. + \left[Y_{300} \left(150 + 0 \right) + Y_{301} \left(1100 + 0 \right) + Y_{302} \left(1300 + 0 \right) \right. \\ \left. + Y_{510} \left(1200 + 0 \right) + Y_{512} \left(40 + 0 \right) + Y_{610} \left(1100 + 0 \right) \right. \\ \left. + Y_{612} \left(500 + 0 \right) \right] \end{array}$$

$$(1 - X_{000}) + Y_{300} = 1$$

$$(1 - X_{101}) + Y_{301} = 1$$

$$(1 - X_{202}) + Y_{302} = 1$$

$$(1 - X_{010}) + (1 - X_{410}) + Y_{510} + Y_{610} = 2$$

$$(1 - X_{212}) + Y_{512} + Y_{612} = 1$$

$$\begin{split} Y_{300} + Y_{301} + Y_{302} &\leq 1 \\ Y_{510} + Y_{512} &\leq 1 \\ Y_{610} + Y_{612} &\leq 1 \\ X_{000}, X_{101}, X_{202}, X_{010}, X_{410}, X_{212} &\in \{0,1\} \\ Y_{300}, Y_{301}, Y_{302}, Y_{510}, Y_{512}, Y_{610}, Y_{612} &\in \{0,1\} \end{split}$$

A solução ótima do exemplo apresenta todas as variáveis iguais a 0, exceto as seguintes que são iguais a 1:

$$X_{000}, X_{212}, X_{410}, Y_{300}, Y_{610} e Y_{512}$$

Totalizando um custo total de alocação (FO) para o Modelo 1 de 16.750. O resultado deve ser interpretado conforme a Tabela I. 12.

Tabela I. 12: Resultado do exercício do Apêndice I

		An	tes		Depois				
Categoria (g)	Navio 0	Navio 1	Navio 2	Ponto de Referência	Navio 0	Navio 1	Navio 2	Ponto de Referência	
0	Ana	Araujo	Agnes	Carlos	Carlos	Araujo	Agnes	Ana	
1	Beatriz; Bartolomeu	Bruno	Bianca	Dalva; Danilo	Beatriz; Danilo	Bruno	Dalva	Bartolomeu; Bianca	

De acordo com a Tabela I. 12, da categoria 0 a tripulante Ana sai do navio 0 (Celso Furtado) em Suape e retorna para seu ponto de referência em Santos. Para isso o colega de mesma categoria Carlos sai de Natal para rendê-la. Para a categoria 1, Bartolomeu também desembarca do Celso Furtado e volta para Belém, com seu colega Danilo vindo do Rio de Janeiro para assumir suas tarefas.

O navio 1 (Sergio Buarque de Holanda) não apresenta nenhuma movimentação e o navio 2 (Rômulo Almeida) desembarca a tripulante da categoria 1 Bianca em São Francisco do Sul para que a mesma retorne para sua casa na mesma cidade, com a tripulante Dalva, de mesma categoria e também vinda de SFS, para dar continuidade à operação deste navio.

APÊNDICE II - EXERCÍCIO DO MODELO 2

O exercício para demonstração do Modelo 2 possui os mesmos dados utilizados no exercício do Apêndice I, com o diferencial de possibilidade de transferência entre navios dos tripulantes que necessitem de desembarque.

Considere então os conjuntos de navios para os quais cada tripulante de cada categoria pode se transferir (Tabela II. 1):

Tabela II. 1: Conjunto de navios para os quais cada tripulante de cada categoria pode se transferir

	Shdt _{pg}											
Categoria (g) 0 1												
Tripulante (p)	0	0 1 2 3 0 1 2 3 4							5	6		
Navio alvo de transferência (s)	1 ou 2	0 ou 2	0 ou 1		2		0		2			

E considere também os custos de transferência (δ_{pgs}) dados na Tabela II. 2. O custo β_{pgs} se mantém o mesmo para cada tripulante, por que todas as viagens de todos os navios são de mesmo período.

Tabela II. 2: Custo de transferência dos tripulantes entre navios

	$\delta_{ m pgs}$											
Categoria (g)		0)					1				
Navio\Tripulante (s\p)	0	1	2	3	0 1 2 3 4 5 6						6	
0		1200	1200				1200					
1	1400		600									
2	1100	600			1100				1100			

Assim, aplicando-se o Modelo 2 que considera um dia de programação com possibilidade de transferência, obtém-se a modelagem matemática a seguir:

Variáveis do problema:

$$\begin{split} X_{000}, X_{101}, X_{202}, X_{010}, X_{410}, X_{212}, Z_{000}, Z_{101}, Z_{202}, Z_{010}, Z_{410}, Z_{212}, Y_{300}, Y_{301}, Y_{302}, \\ Y_{510}, Y_{512}, Y_{610}, Y_{612}, W_{001}, W_{002}, W_{100}, W_{102}, W_{200}, W_{201}, W_{012}, W_{412}, W_{210} \end{split}$$

Função Objetivo:

$$\begin{aligned} &\textit{Minimizar} \left\{ \left[\beta_{000} (1 - X_{000}) + \omega_{000} Z_{000} + \beta_{101} (1 - X_{101}) + \omega_{101} Z_{101} \right. \\ &+ \beta_{202} (1 - X_{202}) + \omega_{202} Z_{202} + \beta_{010} (1 - X_{010}) + \omega_{010} Z_{010} \\ &+ \beta_{212} (1 - X_{212}) + \omega_{212} Z_{212} + \beta_{410} (1 - X_{410}) + \omega_{410} Z_{410} \right] \\ &+ \left[(\gamma_{300} + \beta_{300}) Y_{300} + (\gamma_{301} + \beta_{301}) Y_{301} + (\gamma_{302} + \beta_{302}) Y_{302} \right. \\ &+ (\gamma_{510} + \beta_{510}) Y_{510} + (\gamma_{512} + \beta_{512}) Y_{512} + (\gamma_{610} + \beta_{610}) Y_{610} \\ &+ (\gamma_{612} + \beta_{612}) Y_{612} \right] + \left[(\delta_{001} + \beta_{001}) W_{001} + (\delta_{002} + \beta_{002}) W_{002} \right. \\ &+ (\delta_{100} + \beta_{100}) W_{100} + (\delta_{102} + \beta_{102}) W_{102} + (\delta_{200} + \beta_{200}) W_{200} \\ &+ (\delta_{201} + \beta_{201}) W_{201} + (\delta_{012} + \beta_{012}) W_{012} + (\delta_{412} + \beta_{412}) W_{412} \\ &+ (\delta_{210} + \beta_{210}) W_{210} \right] \end{aligned}$$

$$(1 - X_{000}) + Y_{300} + W_{100} + W_{200} = E_{00}$$

$$(1 - X_{101}) + Y_{301} + W_{001} + W_{201} = E_{01}$$

$$(1 - X_{202}) + Y_{302} + W_{002} + W_{102} = E_{02}$$

$$(1 - X_{010}) + (1 - X_{410}) + Y_{510} + Y_{610} + W_{210} = E_{10}$$

$$(1 - X_{212}) + Y_{512} + Y_{612} + W_{012} + W_{412} = E_{12}$$

$$X_{000} = Z_{000} + W_{002} + W_{001}$$

$$X_{101} = Z_{101} + W_{100} + W_{102}$$

$$X_{202} = Z_{202} + W_{200} + W_{201}$$

$$X_{010} = Z_{010} + W_{012}$$

$$X_{410} = Z_{410} + W_{412}$$

$$\begin{split} X_{212} &= Z_{212} + W_{210} \\ Y_{300} + Y_{301} + Y_{302} &\leq 1 \\ Y_{510} + Y_{512} &\leq 1 \\ Y_{610} + Y_{612} &\leq 1 \\ W_{002} + W_{001} &\leq 1 \\ W_{100} + W_{102} &\leq 1 \\ W_{200} + W_{201} &\leq 1 \\ W_{210} &\leq 1 \\ W_{210} &\leq 1 \\ Y_{300}, Y_{301}, Y_{302}, Y_{510}, Y_{512}, Y_{610}, Y_{612} &\in \{0,1\} \\ X_{000}, X_{101}, X_{202}, X_{010}, X_{410}, X_{212} &\in \{0,1\} \\ Z_{000}, Z_{101}, Z_{202}, Z_{010}, Z_{410}, Z_{212} &\in \{0,1\} \\ W_{001}, W_{002}, W_{100}, W_{102}, W_{200}, W_{201}, W_{012}, W_{412}, W_{210} &\in \{0,1\} \end{split}$$

Assim, substituindo os parâmetros pelos seus respectivos valores, obtém-se a modelagem matemática a seguir.

Função Objetivo:

```
\begin{array}{l} \textit{Minimizar} \left\{ \left[ 15000(1 - X_{000}) + \ 1400Z_{000} + 2600(1 - X_{101}) + \ 50Z_{101} \right. \right. \\ \left. + \ 8400(1 - X_{202}) + 1200\ Z_{202} + 2750(1 - X_{010}) + \ 400Z_{010} \right. \\ \left. + \ 5000(1 - X_{212}) + \ 40Z_{212} + 2760(1 - X_{410}) + \ 300Z_{410} \right] \\ \left. + \left[ Y_{300} \left( 150 + 0 \right) + Y_{301} \left( 1100 + 0 \right) + Y_{302} \left( 1300 + 0 \right) \right. \\ \left. + Y_{510} \left( 1200 + 0 \right) + Y_{512} \left( 40 + 0 \right) + Y_{610} \left( 1100 + 0 \right) \right. \\ \left. + Y_{612} \left( 500 + 0 \right) \right] + \left[ \left( 1200 + 15000 \right) W_{001} + \left( 1200 + 1500 \right) W_{002} \right. \\ \left. + \left( 1400 + 2600 \right) W_{100} + \left( 600 + 2600 \right) W_{102} + \left( 1100 + 8400 \right) W_{200} \right. \\ \left. + \left( 600 + 8400 \right) W_{201} + \left( 1100 + 2750 \right) W_{012} + \left( 1100 + 2760 \right) W_{412} \right. \\ \left. + \left( 1200 + 5000 \right) W_{210} \right] \right\} \end{array}
```

$$(1 - X_{000}) + Y_{300} + W_{100} + W_{200} = 1$$

$$(1 - X_{101}) + Y_{301} + W_{001} + W_{201} = 1$$

$$(1 - X_{202}) + Y_{302} + W_{002} + W_{102} = 1$$

$$(1 - X_{201}) + (1 - X_{410}) + Y_{510} + Y_{610} + W_{210} = 2$$

$$(1 - X_{212}) + Y_{512} + Y_{612} + W_{012} + W_{412} = 1$$

$$X_{000} = Z_{000} + W_{002} + W_{001}$$

$$X_{101} = Z_{101} + W_{100} + W_{102}$$

$$X_{202} = Z_{202} + W_{200} + W_{201}$$

$$X_{100} = Z_{010} + W_{012}$$

$$X_{410} = Z_{410} + W_{412}$$

$$X_{212} = Z_{212} + W_{210}$$

$$Y_{300} + Y_{301} + Y_{302} \le 1$$

$$Y_{510} + Y_{512} \le 1$$

$$Y_{610} + Y_{612} \le 1$$

$$W_{100} + W_{102} \le 1$$

$$W_{100} + W_{102} \le 1$$

$$W_{102} \le 1$$

$$W_{412} \le 1$$

$$Y_{300}, Y_{301}, Y_{302}, Y_{510}, Y_{512}, Y_{610}, Y_{612} \in \{0,1\}$$

$$X_{000}, X_{101}, X_{202}, X_{010}, X_{410}, X_{212} \in \{0,1\}$$

$$Z_{000}, Z_{101}, Z_{202}, Z_{010}, Z_{410}, Z_{212} \in \{0,1\}$$

$$W_{001}, W_{002}, W_{100}, W_{102}, W_{200}, W_{201}, W_{012}, W_{412}, W_{210} \in \{0,1\}$$

$$W_{001}, W_{002}, W_{100}, W_{102}, W_{200}, W_{201}, W_{012}, W_{412}, W_{210} \in \{0,1\}$$

$$W_{001}, W_{002}, W_{100}, W_{102}, W_{200}, W_{201}, W_{012}, W_{412}, W_{210} \in \{0,1\}$$

$$W_{001}, W_{002}, W_{100}, W_{102}, W_{200}, W_{201}, W_{012}, W_{412}, W_{210} \in \{0,1\}$$

A solução ótima deste exemplo apresenta todas as variáveis iguais a 0, exceto as seguintes que recebem o valor 1:

$$X_{000}, X_{212}, X_{410}, Y_{300}, Y_{610}, Y_{512}, Z_{000}, Z_{410} \ e \ Z_{212}$$

Totalizando um custo total de alocação (FO) para o Modelo 2 de 16.750. O resultado está definido na Tabela II. 3.

Tabela II. 3: Resultado do exercício do Apêndice II

		An	ites		Depois				
g	Navio 0	Navio 1	Navio 2	Ponto de Referência	Navio 0	Navio	Navio 2	Ponto de Referência	
0	Ana	Araujo	Agnes	Carlos	Carlos	Araujo	Agnes	Ana	
1	Beatriz; Bartolomeu	Bruno	Bianca	Dalva; Danilo	Beatriz; Danilo	Bruno	Dalva	Bartolomeu; Bianca	

O resultado deste exemplo foi exatamente o mesmo resultado do Apêndice I, dado que mesmo com a opção de transferência entre embarcações, esta não foi utilizada. Isso era esperado considerando que os períodos de tempo das próximas viagens são iguais para todos os navios, e que os custos com movimentação de tripulantes é sempre positivo.

A transferência entre embarcações é vantajosa quando o tripulante é utilizado para uma viagem menor ou igual que a do seu próprio navio, isso apenas se o custo de movimentá-lo compensar esta mudança. Por esta razão, os comentários realizados sobre a Tabela I. 12 permanecem os mesmos para a interpretação da Tabela II. 3.

APÊNDICE III - EXERCÍCIO DO MODELO 3

Considere um conjunto de categorias de tripulantes marítimos $G = \{0,1\}$, sendo a categoria 0 de comandantes e 1 de condutores de máquinas. Cada categoria $g \in G$ identifica um novo conjunto de tripulantes, sendo eles: $C_0 = \{0,1,2,3,4\}$ relativo, respectivamente, a $\{Ana, Araujo, Agnes, Alexandre, Carlos, Cau\hat{e}\}$ e $C_1 = \{0,1,2,3,4,5,6\}$ relativo, respectivamente, a $\{Beatriz, Bruno, Bianca, Bartolomeu, Bart, Dalva, Danilo\}$.

Considere também um conjunto $S = \{0,1,2,3\}$ de navios relativos respectivamente a $\{Celso\ Furtado, Sergio\ Buarque\ de\ Holanda,\ Romulo\ Almeida,\ José\ Alencar\}.$

O posicionamento dos navios é dado pela Tabela III. 1. Nesta tabela é introduzido o parâmetro de dias de programação, no caso deste exemplo o período de programação é dado por $D = \{0,1\}$. Portanto define-se que o conjunto de navios atracados é $Sh = \{0,1,2\}$, sendo que o navio 0 e 2 ficam atracados no período todo de programação, enquanto que o navio 1 fica atracado apenas no primeiro dia e o 3 no segundo dia.

Tabela III. 1: Posicionamento dos Navios no dia $d \in D$

	SP _s										
Navio\Dia (s\d)	0	1	Local								
0	1	1	Suape								
1	1	0	Santos								
2	1	1	São Francisco do Sul (SFS)								
3	0	1	Suape								

É dado que o conjunto de tripulantes embarcados é definido por $Cb_0 = \{0,1,2\}$ e $Cb_1 = \{0,1,2,3,4\}$. O conjunto complementar de tripulantes disponíveis para embarque é dado por $\overline{Cb_0}^0 = \{3\}$, $\overline{Cb_0}^1 = \{3,4\}$ e $\overline{Cb_1}^0 = \{5,6\}$, $\overline{Cb_1}^1 = \{5,6\}$, indicados pela Tabela III. 2.

Tabela III. 2: Posicionamento dos tripulantes em terra

$\overline{\mathbf{Cb}}_{\mathbf{g}}^{\mathbf{d}}$										
Dia\Categoria (d\ g) 0 1										
0	3		5	6						
1 3 4 5 6										

O posicionamento dos tripulantes esta apresentado na Tabela III. 3. Verifica-se nesta tabela que não existe tripulante do grupo 0 no navio 3, enquanto que do grupo 1 existem dois tripulantes no navio 0.

Tabela III. 3: Posicionamento dos Tripulantes no período D

	CP_{pgs}												
Categoria (g)		0				1							
Navio\Tripulante (s\p)	0	1	2	0	1	2	3	4					
0	1	0	0	1	0	0	0	1					
1	0	1	0	0	1	0	0	0					
2	0	0	1	0	0	1	0	0					
3	0	0	0	0	0	0	1	0					

Considerando o parâmetro tempo de embarque no último dia que o navio encontra-se atracado, $B_{pg}^{df_s}$, e considerando que as viagens de todos os navios atracados são de $K_s=10$ dias até a próxima atracação, tem-se que os tripulantes com necessidade de desembarque, ou seja, para o qual $B_{pg}^{df_s}$, $+K_s>Sea$, são dados por \overline{D}_{000} , \overline{D}_{101} , \overline{D}_{202} , \overline{D}_{010} , \overline{D}_{212} e \overline{D}_{410} , veja Tabela III. 4.

Tabela III. 4: Necessidade de Desembarque de tripulantes

Categoria (g)			0						1			
Tripulante (p)	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	5	6
$B_{pg}^{df_s}$	93	82	87	0	85	85	80	95	75	86	70	0
S	0	1	2			0	1	2	3	0		
K _s	10	10	10			10	10	10	10	10		
$B_{pg}^{df_s} + K_s$	103	92	97			95	90	105	85	96		
$\overline{\mathrm{D}}_{\mathrm{pgs}}$	1	1	1			1	0	1	0	1		

Portanto o conjunto de tripulantes embarcados e que necessitam de desembarque é dado por $Cbd_0 = \{0,1,2\}$ e $Cbd_1 = \{0,2,4\}$. E o conjunto de navios atracados que necessitam de desembarque é dado por $Shd^0 = \{0,1,2\}$, $Shd^1 = \{0,2\}$ e $Shdu = \{0,1,2\}$.

Os cartões de segurança de todos os navios da frota são dados a seguir, pela Tabela III. 5.

Tabela III. 5: Quantidade mínima de tripulantes por navio

	CTS _{gs}	
Navio\Categoria (s\g)	0	1
0	1	2
1	1	1
2	1	1
3	0	1

Portanto a Tabela III. 6 se refere à necessidade de embarque (E_{gs}) para cada categoria e navio atracado.

Tabela III. 6: Necessidade de Embarque de tripulantes

	$\mathbf{E}_{\mathbf{gs}}$	
Navio\Categoria (s\g)	0	1
0	1	2
1	1	0
2	1	1
3	0	0

Portanto o conjunto de navios que necessitam de embarque é dada por por $She^0 = \{0,1,2\}$, $She^1 = \{0,2\}$ e $Sheu = \{0,1,2\}$.

Os pontos de referência de cada tripulante são dados pela Tabela III. 7.

Tabela III. 7: Pontos de referência dos tripulantes

	(Categoria	ı 0		Categoria 1									
				e (p)										
0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	5	6			
Santos						Santos	SFS	Belém	Fortaleza	SFS	RJ			

Considerando um custo de adicional de embarque diário de α_{pg} dado por (Tabela III. 8):

Tabela III. 8: Adicional de Embarque diário

	$lpha_{ m pg}$												
Categoria (g)			0						1				
Tripulante (p)	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	5	6	
	1500	1300	1200	1000	800	550	520	500	480	460	450	400	

Portanto, o custo de se manter os tripulantes embarcados por mais uma viagem é dado por β_{pgs} , calculado considerando a duração das viagens K_s a partir do último dia atracado de cada navio, conforme a Tabela III. 9. Este custo não é calculado para tripulantes que não necessitem de desembarque, que é o caso do tripulante 1 e 3 da categoria 1.

Tabela III. 9: Custo de manter o tripulante embarcado por mais uma viagem

					$\beta_{ m pgs}$								
Categoria (g)		0 1											
Navio\Tripulante (s\p)	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	5	6	
0	15000			0	4000	2750				2760	0	0	
1		2600		0	4000						0	0	
2			8400	0	4000			5000			0	0	
3													

O custo μ_{pgs}^d é relativo ao adicional gerado pelo tripulante que já ultrapassou o seu regime, mas que permaneceu embarcado em alguns dias do período de programação até a sua saída do navio. Esta parâmetro é apresentado na Tabela III. 10.

Tabela III. 10: Custo de manter o tripulante em adicional até sua saída na semana de programação

										ļ	l ^d pgs											
					Di	a 0]	Dia	1				
	C	atego	ria ()			Cat	egoi	ria 1	Ĺ		Cat	ego	ria ()			Cate	egor	ria 1	-	
										T	ripu	ulante (p)										
Navio	0	1	2	3	0	1	2	3	4	5	6	0	1	2	3	0	1	2	3	4	5	6
0												1500										
1																						
2																		500				

O custo ρ_{pgs} considera o custo de tripulantes que estão em adicional já na semana de programação, mas que são escolhidos para permanecerem no navio por mais uma viagem. Os valores utilizados para este parâmetro estão apresentados na Tabela III. 11.

Tabela III. 11: Custo de manter um tripulante em adicional na semana de programação por mais uma viagem

				$ ho_{ m pgs}$	i						
Categoria (g)		0						1			
Navio\Tripulante (s\p)	0	1	2	3	0	1	2	3	4	5	6
0	1500										
1											
2							500				
3											

Seja ω_{pgs}^d o custo de desembarcar o tripulante que esteja embarcado e movimentá-lo até seu ponto de referência (Tabela III. 12).

Tabela III. 12: Custo de enviar os tripulantes para o ponto de referência

		ω_{pgs}^d												
Dia (d)		0												
Categoria (g)		0 1												
Navio\Tripulante (s\p)	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	5	6		
0	1400					400				300				
1		50												
2			1200					40						

3												
Dia (d)						1						
Categoria (g)			0						1			
Navio\Tripulante (s\p)	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	5	6
0	1500					250				300		
1												
2			1000					40				
3												

Seja γ_{pgs} o custo de movimentar um novo tripulante do seu ponto de referência até o navio que necessita de embarque (Tabela III. 13).

Tabela III. 13: Custo de deslocar um tripulante do ponto de referência para o navio

$\gamma_{ m pgs}^{ m d}$													
Dia (d)		0											
Categoria (g)		0 1											
Navio\Tripulante (s\p)	0	1		2	3	4	0	0 1 2 3 4 5 6					6
0					150							1200	1100
1					1100							600	300
2					1300							40	500
3													
Dia (d)								1					
Categoria (g)				0							1		
Navio\Tripulante (s\p)	0		1	2	3	4	0	1	2	3	4	5	6
0					200	1300						1200	1100
1					900	150						650	300

2		1400	350			40	600
3							

Desta forma, ao aplicar-se o Modelo 3 que considera um período de programação sem possibilidade de transferência entre embarcações, obtém-se a modelagem matemática a seguir.

Variáveis do problema:

$$X^{0}_{000}, X^{1}_{000}, X^{0}_{101}, X^{0}_{202}, X^{1}_{202}, X^{0}_{010}, X^{1}_{010}, X^{0}_{410}, X^{1}_{410}, X^{0}_{212}, X^{1}_{212}$$

$$Y^{0}_{300}, Y^{1}_{300}, Y^{0}_{301}, Y^{0}_{302}, Y^{1}_{302}, Y^{1}_{400}, Y^{1}_{402}, Y^{0}_{510}, Y^{1}_{510}, Y^{0}_{512}, Y^{1}_{512}, Y^{0}_{610}, Y^{0}_{612}, Y^{1}_{610}, Y^{1}_{612}$$

Função Objetivo:

$$\begin{aligned} \textit{Minimizar} & \big\{ \big[(\beta_{000} + \rho_{000}) \big(1 - (X_{000}^0 + X_{000}^1) \big) + (\beta_{101} + \rho_{101}) \big(1 - (X_{101}^0) \big) \\ & + (\beta_{202} + \rho_{202}) \big(1 - (X_{202}^0 + X_{202}^1) \big) \\ & + (\beta_{010} + \rho_{010}) \big(1 - (X_{010}^0 + X_{010}^1) \big) \\ & + (\beta_{212} + \rho_{212}) \big(1 - (X_{212}^0 + X_{212}^1) \big) \\ & + (\beta_{410} + \rho_{410}) \big(1 - (X_{410}^0 + X_{410}^1) \big) + (\mu_{000}^0 + \omega_{000}^0) X_{000}^0 \\ & + (\mu_{000}^1 + \omega_{000}^1) X_{000}^1 + (\mu_{101}^0 + \omega_{101}^0) X_{101}^0 + (\mu_{202}^0 + \omega_{202}^0) X_{202}^0 \\ & + (\mu_{202}^1 + \omega_{202}^1) X_{202}^1 + (\mu_{010}^0 + \omega_{010}^0) X_{010}^0 + (\mu_{010}^1 + \omega_{101}^0) X_{110}^1 \\ & + (\mu_{410}^4 + \omega_{410}^0) X_{410}^0 + (\mu_{410}^1 + \omega_{410}^1) X_{410}^1 + (\mu_{212}^0 + \omega_{212}^0) X_{212}^0 \\ & + (\mu_{212}^1 + \omega_{212}^1) X_{212}^1 \big] \\ & + \big[(\gamma_{300}^0 + \beta_{300}) Y_{300}^0 + (\gamma_{301}^0 + \beta_{301}) Y_{301}^0 + (\gamma_{302}^0 + \beta_{302}) Y_{302}^0 \\ & + (\gamma_{402}^1 + \beta_{402}) Y_{402}^1 + (\gamma_{510}^1 + \beta_{510}) Y_{510}^1 + (\gamma_{512}^0 + \beta_{512}) Y_{512}^0 \\ & + (\gamma_{510}^1 + \beta_{510}) Y_{510}^1 + (\gamma_{512}^1 + \beta_{512}) Y_{512}^1 + (\gamma_{610}^0 + \beta_{610}) Y_{610}^0 \\ & + (\gamma_{612}^0 + \beta_{612}) Y_{612}^0 + (\gamma_{610}^1 + \beta_{610}) Y_{610}^1 + (\gamma_{612}^1 + \beta_{612}) Y_{612}^1 \big] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 1 - (X_{000}^0 + X_{000}^1) + Y_{300}^0 + Y_{300}^1 + Y_{400}^1 &= E_{00} \\ 1 - (X_{101}^0) + Y_{301}^0 &= E_{01} \\ 1 - (X_{202}^0 + X_{202}^1) + Y_{302}^0 + Y_{302}^1 + Y_{402}^1 &= E_{02} \\ \left(1 - (X_{010}^0 + X_{010}^1)\right) + \left(1 - (X_{410}^0 + X_{410}^1)\right) + Y_{510}^0 + Y_{510}^1 + Y_{610}^1 + Y_{610}^1 &= E_{10} \\ \left(1 - (X_{212}^0 + X_{212}^1)\right) + Y_{512}^0 + Y_{512}^1 + Y_{612}^1 + Y_{612}^1 &= E_{12} \\ X_{000}^0 + X_{000}^1 &\leq 1 \\ X_{101}^0 &\leq 1 \\ X_{010}^0 + X_{010}^1 &\leq 1 \\ X_{010}^0 + X_{010}^1 &\leq 1 \\ X_{212}^0 + X_{212}^1 &\leq 1 \\ Y_{300}^0 + Y_{300}^1 + Y_{301}^0 + Y_{302}^0 + Y_{302}^1 &\leq 1 \\ Y_{510}^0 + Y_{510}^1 + Y_{512}^0 + Y_{512}^1 &\leq 1 \\ Y_{610}^0 + Y_{612}^0 + Y_{610}^1 + Y_{612}^1 &\leq 1 \\ X_{000}^0 &= Y_{300}^0 \\ X_{100}^1 &= Y_{301}^1 \\ X_{202}^0 &= Y_{302}^0 \\ X_{101}^1 &= Y_{301}^0 \\ X_{202}^0 &= Y_{302}^1 \\ X_{100}^1 &= Y_{301}^1 + Y_{402}^1 \\ X_{202}^0 &= Y_{302}^1 \\ X_{101}^1 &= Y_{10}^0 + Y_{410}^1 = Y_{510}^0 + Y_{610}^1 \\ X_{101}^1 &= Y_{10}^1 + Y_{410}^1 = Y_{510}^1 + Y_{610}^1 \\ X_{101}^1 &= Y_{112}^0 + Y_{612}^1 \\ X_{212}^1 &= Y_{512}^1 + Y_{612}^1 \\ X_{212}^1 &= Y_{512}^1 + Y_{612}^1 \\ X_{212}^1 &= Y_{512}^1 + Y_{612}^1 \end{aligned}$$

 $X_{000}^0, X_{000}^1, X_{101}^0, X_{202}^0, X_{202}^1, X_{010}^0, X_{010}^1, X_{410}^0, X_{410}^1, X_{212}^0, X_{212}^1 \in \{0,1\}$

$$Y_{300}^0,Y_{300}^1,Y_{301}^0,Y_{301}^0,Y_{302}^0,Y_{302}^1,Y_{400}^1,Y_{402}^1,Y_{510}^0,Y_{510}^1,Y_{512}^0,Y_{512}^1,Y_{610}^0,Y_{612}^0,Y_{610}^1,Y_{612}^1 \in \{0,1\}$$

Assim, substituindo os parâmetros pelos seus respectivos valores, obtém-se a modelagem matemática a seguir.

Função Objetivo:

$$\begin{aligned} \textit{Minimizar} & \{ \left[(15000 + 1500) \left(1 - (X_{000}^0 + X_{000}^1) \right) + (2600 + 0) \left(1 - (X_{101}^0) \right) \\ & + (8400 + 0) \left(1 - (X_{202}^0 + X_{202}^1) \right) + (2750 + 0) \left(1 - (X_{010}^0 + X_{010}^1) \right) \\ & + (5000 + 500) \left(1 - (X_{212}^0 + X_{212}^1) \right) \\ & + (2760 + 0) \left(1 - (X_{410}^0 + X_{410}^1) \right) + (0 + 1400) X_{000}^0 \\ & + (1500 + 1500) X_{000}^1 + (0 + 50) X_{101}^0 + (0 + 1200) X_{202}^0 \\ & + (0 + 1000) X_{202}^1 + (0 + 400) X_{010}^0 + (0 + 250) X_{010}^1 \\ & + (0 + 300) X_{410}^0 + (0 + 300) X_{410}^1 + (0 + 40) X_{212}^0 + (0 + 40) X_{212}^1 \right] \\ & + \left[(150 + 0) Y_{300}^0 + (1100 + 0) Y_{301}^0 + (1300 + 0) Y_{302}^0 \right. \\ & + (200 + 0) Y_{100}^1 + (1400 + 0) Y_{510}^1 + (1300 + 0) Y_{400}^0 \\ & + (350 + 0) Y_{402}^1 + (1200 + 0) Y_{510}^0 + (40 + 0) Y_{512}^0 \\ & + (1200 + 0) Y_{510}^0 + (40 + 0) Y_{512}^1 + (1100 + 0) Y_{610}^0 \\ & + (500 + 0) Y_{612}^0 + (1100 + 0) Y_{610}^1 + (600 + 0) Y_{612}^1 \right] \, \} \end{aligned}$$

$$1 - (X_{000}^{0} + X_{000}^{1}) + Y_{300}^{0} + Y_{300}^{1} + Y_{400}^{1} = 1$$

$$1 - (X_{101}^{0}) + Y_{301}^{0} = 1$$

$$1 - (X_{202}^{0} + X_{202}^{1}) + Y_{302}^{0} + Y_{302}^{1} + Y_{402}^{1} = 1$$

$$(1 - (X_{010}^{0} + X_{010}^{1})) + (1 - (X_{410}^{0} + X_{410}^{1})) + Y_{510}^{0} + Y_{510}^{1} + Y_{610}^{0} + Y_{610}^{1} = 2$$

$$(1 - (X_{212}^{0} + X_{212}^{1})) + Y_{512}^{0} + Y_{512}^{1} + Y_{612}^{0} + Y_{612}^{1} = 1$$

$$X_{000}^{0} + X_{000}^{1} \le 1$$

$$X_{101}^{0} \le 1$$

$$X_{202}^{0} + X_{202}^{1} \le 1$$

$$\begin{split} X_{010}^0 + X_{010}^1 &\leq 1 \\ X_{410}^0 + X_{410}^1 &\leq 1 \\ X_{212}^0 + X_{212}^1 &\leq 1 \\ Y_{300}^0 + Y_{300}^1 + Y_{301}^0 + Y_{302}^0 + Y_{302}^1 &\leq 1 \\ Y_{510}^0 + Y_{510}^1 + Y_{512}^0 + Y_{512}^1 &\leq 1 \\ Y_{610}^0 + Y_{612}^0 + Y_{610}^1 + Y_{612}^1 &\leq 1 \\ X_{000}^0 &= Y_{300}^0 \\ X_{100}^1 &= Y_{300}^1 + Y_{400}^1 \\ X_{202}^0 &= Y_{302}^0 \\ X_{101}^1 &= Y_{302}^1 \\ X_{202}^0 &= Y_{302}^1 + Y_{402}^1 \\ X_{010}^1 + X_{410}^1 &= Y_{510}^1 + Y_{610}^1 \\ X_{212}^0 &= Y_{512}^1 + Y_{612}^1 \\ X_{212}^0 &= Y_{512}^1 + Y_{612}^1 \\ X_{200}^0, X_{100}^1, X_{101}^0, X_{202}^0, X_{1202}^1, X_{010}^0, X_{101}^0, X_{410}^0, X_{410}^1, X_{212}^0, X_{212}^1 &\in \{0,1\} \\ \end{split}$$

A solução ótima indica que todas as variáveis são iguais a 0, exceto as seguintes que assumem valor igual a 1:

$$X^0_{000}, X^1_{202}, X^1_{010}, X^0_{212}, Y^0_{300}, Y^0_{512}, Y^1_{402} \; e \; Y^1_{610}$$

Totalizando um custo total de alocação (FO) para o Modelo 1 de 13.690. O resultado está definido na Tabela III. 14.

Tabela III. 14: Resultado do exercício o Apêndice III

		Antes										
g	Navio	0 0]	Navio 1	Navio 2	2	Ponto de Referência					
0	Ana			Araujo	Agnes		Carlos					
							Cauê					
1	Beatriz; Bartolomeu			Bruno	Bianca		Dalva; Danilo					
		– Dia 0		Depois – Dia 1								
a	Navio	Navio	Navio	Ponto de	Navio Navi		Navio	Ponto de				
g	0	1	2	Referência	0	1	2	Referência				
0	Carlos	Araujo	Agnes	Ana Cauê	Carlos	Araujo	Cauê	Ana Agnes				
1	Beatriz; Bartolomeu	Bruno	Dalva	Bianca; Danilo	Danilo; Bartolomeu	Bruno	Dalva	Bianca; Beatriz				

De acordo com a Tabela III. 14, os tripulantes da categoria 0: Ana e Agnes, e da categoria 1: Bianca e Beatriz desembarcaram. A grande diferença para os outros Apêndices é que o Modelo 3 permite o embarque e desembarque em um período de dias, o que pode (e que de fato ocorreu neste exemplo) proporcionar mais opções de tripulantes disponíveis em terra, e opções mais econômicas de movimentações.

No dia 1, a comandante Ana sai de seu navio (Celso Furtado) atracado em Suape e retorna para Santos, com o comandante Carlos vindo de Natal para assumir a função. No navio 2 a chefe de máquinas Bianca também desembarca do Romulo Almeida em SFS, e segue para seu ponto de referência na mesma cidade, sendo substituída pela colega Dalva também de SFS.

No segundo dia, a chefe de máquinas Beatriz desembarca do Celso Furtado para Belém, sendo rendida pelo colega Danilo vindo de SFS. E a comandante Agnes desembarca do

Romulo Almeida e segue para Recife, com o comandante Cauê saindo de Campinas para assumir o navio em SFS.

APÊNDICE IV – EXERCÍCIO DO MODELO 4

O exemplo numérico do Modelo 4 considera os mesmos dados utilizados no exercício do Apêndice III, com o diferencial de possibilidade de transferência entre navios dos tripulantes que necessitem de desembarque.

Considere os conjuntos de navios para os quais cada tripulante de cada categoria pode se transferir a cada dia (Tabela IV. 1).

Tabela IV. 1: Conjunto de navios para os quais cada tripulante de cada categoria pode se transferir

			Sho	dt ^d _{pg}								
Dia (d)		0										
Categoria (g)			0						1			
Tripulante (p)	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	5	6
Navio alvo de transferência (s)	1 ou 2	0 ou 2	0 ou 1			2		0		2		
Dia (d)						1						
Categoria (g)			0						1			
Tripulante (p)	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	5	6
Navio alvo de transferência (s)	1 ou 2	0 ou 2	0 ou 1			2		0		2		

Considere a tabela de custos de transferência dada por δ^d_{pgs} na Tabela IV. 2. O custo β_{pgs} , se mantém o mesmo para cada tripulante, por que todas as viagens de todos os navios são de mesmo período.

Tabela IV. 2: Custos de transferência entre navios de acordo com o dia

				δ ^d _{pg}	s							
Dia (d)		0										
Categoria (g)		(0						1			
Navio\Tripulante	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	5	6
(s\p)												
0		1200	1200					1200				
1	1400		600									
2	1100	600				1100				1100		
3												
Dia (d)						1						
Categoria (g)			0						1			
Navio\Tripulante	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	5	6
(s\p)												
0		1000	1200					1300				
1	1300		550									
2	1100	700				1100				900		
3												

Ao aplicar-se o Modelo 4 que considera um período de programação com possibilidade de transferência entre embarcações, obtém-se a modelagem matemática a seguir.

Variáveis do problema:

$$\begin{split} X^0_{000}, X^1_{000}, X^0_{101}, X^0_{202}, X^1_{202}, X^0_{010}, X^1_{010}, X^0_{212}, X^1_{212}, X^0_{410}, X^1_{410} \\ Y^0_{300}, Y^1_{300}, Y^0_{301}, Y^0_{302}, Y^1_{302}, Y^1_{400}, Y^1_{402}, Y^0_{510}, Y^1_{510}, Y^0_{512}, Y^1_{512}, Y^0_{610}, Y^0_{612} \\ Z^0_{300}, Z^1_{300}, Z^0_{301}, Z^0_{302}, Z^1_{302}, Z^1_{400}, Z^1_{402}, Z^0_{510}, Z^1_{510}, Z^0_{512}, Z^1_{512}, Z^0_{610}, Z^0_{612} \end{split}$$

Função Objetivo:

$$\begin{aligned} & \textit{Minimizar} \left\{ \left[(\beta_{000} + \rho_{000}) \left(1 - (X_{000}^0 + X_{000}^1) \right) + (\beta_{101} + \rho_{101}) \left(1 - (X_{101}^0) \right) \right. \\ & + (\beta_{202} + \rho_{202}) \left(1 - (X_{202}^0 + X_{202}^1) \right) \\ & + (\beta_{010} + \rho_{010}) \left(1 - (X_{010}^0 + X_{010}^1) \right) \\ & + (\beta_{212} + \rho_{212}) \left(1 - (X_{212}^0 + X_{212}^1) \right) \\ & + (\beta_{410} + \rho_{410}) \left(1 - (X_{410}^0 + X_{410}^1) \right) + (\mu_{000}^0 + \omega_{000}^0) X_{000}^0 \\ & + (\mu_{000}^1 + \omega_{000}^1) X_{000}^1 + (\mu_{101}^1 + \omega_{101}^0) X_{101}^1 + (\mu_{202}^0 + \omega_{202}^0) X_{202}^0 \\ & + (\mu_{202}^1 + \omega_{202}^1) X_{202}^1 + (\mu_{010}^1 + \omega_{010}^0) X_{010}^0 + (\mu_{010}^1 + \omega_{101}^0) X_{101}^1 \\ & + (\mu_{410}^1 + \omega_{410}^1) X_{410}^1 + (\mu_{410}^1 + \omega_{410}^1) X_{410}^1 + (\mu_{212}^0 + \omega_{212}^0) X_{202}^0 \\ & + (\mu_{200}^1 + \beta_{300}) X_{300}^1 + (\mu_{301}^1 + \beta_{301}) X_{301}^0 + (\mu_{302}^0 + \beta_{302}) X_{302}^0 \\ & + (\mu_{300}^1 + \beta_{300}) Y_{300}^1 + (\mu_{301}^1 + \beta_{301}) Y_{301}^0 + (\mu_{302}^0 + \beta_{302}) Y_{302}^0 \\ & + (\mu_{402}^1 + \beta_{402}) Y_{402}^1 + (\mu_{510}^1 + \beta_{510}) Y_{510}^1 + (\mu_{512}^1 + \beta_{512}) Y_{512}^1 \\ & + (\mu_{510}^1 + \beta_{510}) Y_{510}^1 + (\mu_{512}^1 + \beta_{512}) Y_{512}^1 + (\mu_{610}^1 + \beta_{610}) Y_{610}^1 \\ & + (\mu_{612}^0 + \beta_{612}) Y_{002}^1 + (\mu_{610}^1 + \beta_{610}) Y_{610}^1 + (\mu_{612}^1 + \beta_{612}) Y_{612}^1 \right] \\ & + \left[(\delta_{0001}^0 + \beta_{001}) W_{0001}^0 + (\delta_{0002}^0 + \beta_{002}) W_{0002}^{0002} \\ & + (\delta_{1010}^0 + \beta_{100}) W_{1010}^0 + (\delta_{1010}^1 + \beta_{100}) W_{1010}^1 \\ & + (\delta_{0002}^0 + \beta_{202}) W_{0002}^0 + (\delta_{0102}^0 + \beta_{202}) W_{0002}^{0002} \\ & + (\delta_{1010}^0 + \beta_{100}) W_{1010}^0 + (\delta_{1010}^1 + \beta_{100}) W_{1010}^0 \\ & + (\delta_{0002}^0 + \beta_{202}) W_{0002}^0 + (\delta_{0102}^0 + \beta_{202}) W_{0102}^{0002} \\ & + (\delta_{1010}^0 + \beta_{200}) W_{0102}^0 + (\delta_{0102}^0 + \beta_{202}) W_{0102}^0 \\ & + (\delta_{1012}^0 + \beta_{202}) W_{1012}^0 + (\delta_{1012}^0 + \beta_{202}) W_{0102}^0 \\ & + (\delta_{1012}^0 + \beta_{202}) W_{10102}^0 + (\delta_{0102}^0 + \beta_{202}) W_{0102}^0 \\ & + (\delta_{1102}^0 + \beta_{202}) W_{1012}^0 + (\delta_{1102}^0 + \beta_{202}) W_{1102}^0 \\ & + (\delta_{1102}^0 + \beta_{202}) W_{1102}^0 + (\delta_{1102}^0 + \beta_{202}) W_{1102$$

$$1 - (X_{000}^{0} + X_{000}^{1}) + Y_{300}^{0} + Y_{300}^{1} + Y_{400}^{1} + W_{1010}^{00} + W_{1010}^{01} + W_{2020}^{00} + W_{2020}^{01} + W_{2020}^{11}$$

$$= E_{00}$$

$$1 - (X_{101}^{0}) + Y_{301}^{0} + W_{0001}^{00} + W_{2021}^{00} = E_{01}$$

$$1 - (X_{202}^{0} + X_{202}^{1}) + Y_{302}^{0} + Y_{302}^{1} + Y_{402}^{1} + W_{0002}^{00} + W_{0002}^{01} + W_{1012}^{11} + W_{1012}^{00} + W_{1012}^{11}$$

$$= E_{20}$$

$$\begin{split} \left(1-(X_{010}^0+X_{010}^1)+(1-(X_{010}^1+X_{010}^1)+Y_{010}^1+Y_{010}^1+Y_{010}^1+Y_{010}^1+W_{0120}^{110})\right.\\ &+W_{2120}^{112}+W_{2120}^{112}=E_{10} \\ \left(1-(X_{212}^0+X_{212}^1)\right)+Y_{312}^0+Y_{312}^1+Y_{612}^1+Y_{612}^0+Y_{612}^0+W_{0102}^{010}+W_{0102}^{011}+W_{0102}^{110}+W_{0102}^{110}+W_{0102}^{110}+W_{0102}^{110}+W_{0102}^{110}+W_{0102}^{110}+W_{0102}^{110}+W_{0102}^{110}+W_{0102}^{110}+W_{0102}^{110}+W_{0102}^{110}+W_{0002}^{110}+W_{0002}^{110}+W_{0002}^{110}+W_{0102}^{110}+W_{0102}^{110}+W_{0101}^{110}+W_{1010}^{110}+W_{1010}^{110}\\ X_{000}^0=Z_{000}^1+W_{0001}^{010}+W_{0101}^{101}+W_{0101}^{100}+W_{1010}^{101}\\ X_{010}^2=Z_{022}^0+W_{0202}^{100}+W_{0102}^{101}+W_{0202}^{100}\\ X_{010}^1=Z_{010}^1+W_{0102}^{101}+W_{0102}^{101}+W_{0102}^{101}\\ X_{010}^1=Z_{010}^1+W_{0102}^{101}+W_{0102}^{110}\\ X_{010}^1=Z_{010}^1+W_{0102}^{101}+W_{0102}^{110}\\ X_{010}^1=Z_{010}^1+W_{0102}^{101}+W_{0102}^{110}\\ X_{010}^1=Z_{010}^1+W_{0102}^{101}+W_{0102}^{110}+W_{0102}^{110}\\ X_{010}^1=X_{010}^1+W_{0101}^{101}+W_{0102}^{110}+W_{0102}^{110}+W_{0102}^{110}\\ X_{010}^1+W_{0101}^{101}+W_{0101}^{101}+W_{0101}^{101}+W_{0102}^{101}+W_{0102}^{101}+Y_{0102}^{101}\\ X_{010}^1+W_{0101}^{101}+W_{0101}^{101}+W_{0101}^{101}+W_{0102}^{101}+W_{0102}^{101}+Y_{0102}^{101}\\ X_{010}^1+W_{0101}^1+W_{0101}^{101}+W_{0101}^{101}+W_{0102}^{101}+W_{0102}^{101}+Y_{0102}^{101}+Y_{0102}^{101}\\ X_{010}^1+W_{0101}^1+W_{0101}^1+W_{0101}^1+W_{0101}^1+W_{0101}^1+Y_{0101}^1+$$

$$\begin{split} X_{010}^0 + X_{010}^1 &\leq 1 \\ X_{410}^0 + X_{410}^1 &\leq 1 \\ X_{212}^0 + X_{212}^1 &\leq 1 \\ Y_{300}^0 + Y_{300}^1 + Y_{301}^0 + Y_{301}^0 + Y_{302}^1 + Y_{302}^1 &\leq 1 \\ Y_{400}^1 + Y_{402}^1 &\leq 1 \\ Y_{510}^0 + Y_{510}^1 + Y_{512}^0 + Y_{512}^1 + Y_{512}^1 &\leq 1 \\ Y_{610}^0 + Y_{612}^0 + Y_{611}^1 + Y_{612}^1 &\leq 1 \\ Y_{0001}^0 + W_{0002}^{000} + W_{0002}^{001} + W_{0002}^{001} &\leq 1 \\ W_{1010}^{00} + W_{1010}^{01} + W_{1010}^{001} + W_{1012}^{001} &\leq 1 \\ W_{2020}^{00} + W_{2020}^{01} + W_{2020}^{01} + W_{2021}^{01} &\leq 1 \\ W_{0102}^0 + W_{0102}^{01} + W_{1012}^{11} &\leq 1 \\ W_{0102}^0 + W_{0102}^{01} + W_{4102}^{11} &\leq 1 \\ W_{2020}^0 + W_{2120}^{01} + W_{2120}^{11} &\leq 1 \\ W_{2020}^0 + W_{2120}^{01} + W_{2120}^{11} &\leq 1 \\ W_{300}^0, X_{300}^1, X_{301}^0, X_{302}^0, X_{302}^1, X_{400}^1, X_{402}^1, Y_{510}^0, Y_{510}^1, Y_{512}^1, Y_{512}^1, Y_{610}^0, Y_{612}^0 &\in \{0,1\} \\ Z_{300}^0, Z_{300}^1, Z_{301}^0, Z_{302}^0, Z_{302}^1, Z_{400}^1, Z_{402}^1, Z_{510}^0, Z_{510}^1, Z_{512}^1, Z_{512}^1, Z_{610}^1, Z_{612}^0 &\in \{0,1\} \\ W_{2020}^{000}, W_{0002}^{000}, W_{0002}^{001}, W_{1010}^{000}, W_{1010}^{001}, W_{1010}^0, W_{1012}^0, W_{1012}^0, W_{2020}^{01}, W_{2020}^{01}, W_{2120}^{01}, W_{2120}^{01}, W_{2120}^1, W_{2120}^1,$$

O modelo matemático encontrado substituindo-se os parâmetros pelos seus respectivos valores é dado na sequência.

Função Objetivo:

$$\begin{aligned} &\textit{Minimizar} \left\{ \left[(15000 + 1500) \left(1 - (X_{000}^0 + X_{000}^1) \right) + (2600 + 0) \left(1 - (X_{010}^1) \right) \right. \\ &\quad + (8400 + 0) \left(1 - (X_{202}^0 + X_{202}^1) \right) + (2750 + 0) \left(1 - (X_{010}^0 + X_{010}^1) \right) \\ &\quad + (5000 + 500) \left(1 - (X_{212}^0 + X_{212}^1) \right) \\ &\quad + (2760 + 0) \left(1 - (X_{410}^0 + X_{410}^1) \right) + (0 + 1400) X_{000}^0 \\ &\quad + (1500 + 1500) X_{000}^1 + (0 + 50) X_{101}^1 + (0 + 1200) X_{202}^0 \\ &\quad + (0 + 1000) X_{202}^1 + (0 + 400) X_{010}^0 + (0 + 250) X_{101}^1 \\ &\quad + (0 + 300) X_{410}^0 + (0 + 300) X_{410}^1 + (0 + 40) X_{212}^0 + (0 + 40) X_{212}^1 \right] \\ &\quad + \left[(150 + 0) Y_{300}^0 + (1100 + 0) Y_{301}^0 + (1300 + 0) Y_{302}^0 \\ &\quad + (200 + 0) Y_{300}^1 + (1400 + 0) Y_{301}^1 + (1300 + 0) Y_{400}^0 \\ &\quad + (350 + 0) Y_{402}^1 + (1200 + 0) Y_{512}^0 + (40 + 0) Y_{512}^0 \\ &\quad + (1200 + 0) Y_{510}^1 + (40 + 0) Y_{512}^1 + (1100 + 0) Y_{610}^0 \\ &\quad + (500 + 0) Y_{612}^0 + (1100 + 0) Y_{610}^1 + (600 + 0) Y_{612}^1 \right] \\ &\quad + \left[\left(\delta_{0001}^{000} + \beta_{001} \right) W_{0001}^{000} + \left(\delta_{0002}^{000} + \beta_{002} \right) W_{0002}^{000} \\ &\quad + \left(\delta_{1010}^{10} + \beta_{100} \right) W_{1010}^{000} + \left(\delta_{1010}^{10} + \beta_{100} \right) W_{1010}^{101} \\ &\quad + \left(\delta_{0002}^{10} + \beta_{002} \right) W_{0002}^{000} + \left(\delta_{1011}^{00} + \beta_{100} \right) W_{1012}^{101} \\ &\quad + \left(\delta_{0102}^{20} + \beta_{202} \right) W_{2020}^{000} + \left(\delta_{2021}^{00} + \beta_{202} \right) W_{0102}^{000} \\ &\quad + \left(\delta_{1012}^{10} + \beta_{100} \right) W_{1012}^{101} + \left(\delta_{0102}^{00} + \beta_{202} \right) W_{0102}^{000} \\ &\quad + \left(\delta_{1012}^{10} + \beta_{002} \right) W_{0102}^{101} + \left(\delta_{0102}^{00} + \beta_{002} \right) W_{0102}^{000} \\ &\quad + \left(\delta_{1012}^{10} + \beta_{002} \right) W_{0102}^{101} + \left(\delta_{0102}^{00} + \beta_{002} \right) W_{0102}^{000} \\ &\quad + \left(\delta_{1012}^{10} + \beta_{002} \right) W_{1012}^{101} + \left(\delta_{0102}^{00} + \beta_{002} \right) W_{0102}^{100} \\ &\quad + \left(\delta_{1012}^{10} + \beta_{002} \right) W_{0102}^{101} + \left(\delta_{0102}^{00} + \beta_{002} \right) W_{0102}^{100} \\ &\quad + \left(\delta_{1012}^{10} + \beta_{002} \right) W_{0102}^{101} + \left(\delta_{1102}^{00} + \beta_{002} \right) W_{1102}^{100} \\ &\quad + \left(\delta_{1102}^{00} + \beta_{102} \right) W_{1122}^{101} + \left(\delta_{1102}^{00} + \beta_{002} \right) W_{1102}^{100} \\ &\quad$$

$$\begin{split} 1 - (X_{000}^{0} + X_{000}^{1}) + Y_{300}^{0} + Y_{300}^{1} + Y_{400}^{1} + W_{1010}^{00} + W_{1010}^{01} + W_{2020}^{00} + W_{2020}^{01} + W_{2020}^{11} \\ &= 1 \\ \\ 1 - (X_{101}^{0}) + Y_{301}^{0} + W_{0001}^{00} + W_{2021}^{00} = 1 \\ \\ 1 - (X_{202}^{0} + X_{202}^{1}) + Y_{302}^{0} + Y_{302}^{1} + Y_{402}^{1} + W_{0002}^{00} + W_{0002}^{01} + W_{0002}^{11} + W_{1012}^{00} + W_{1012}^{01} + W_{1012}^{01} \\ &= 1 \\ \\ \left(1 - (X_{010}^{0} + X_{010}^{1})\right) + \left(1 - (X_{410}^{0} + X_{410}^{1})\right) + Y_{510}^{0} + Y_{510}^{1} + Y_{610}^{0} + Y_{610}^{1} + W_{2120}^{00} \\ &+ W_{2120}^{01} + W_{2120}^{11} = 2 \\ \\ \left(1 - (X_{212}^{0} + X_{212}^{1})\right) + Y_{512}^{0} + Y_{512}^{1} + Y_{612}^{0} + Y_{612}^{1} + W_{0102}^{00} + W_{0102}^{01} + W_{0102}^{01} + W_{4102}^{01} \\ &+ W_{4102}^{01} + W_{4102}^{11} = 1 \\ X_{000}^{0} = Z_{000}^{0} + W_{0001}^{00} + W_{0002}^{00} + W_{0002}^{00} + W_{0002}^{01} \\ X_{000}^{1} = Z_{000}^{1} + W_{0002}^{10} + W_{0002}^{10} \end{split}$$

$$\begin{split} X_{201}^0 &= Z_{101}^0 + W_{1010}^{001} + W_{1012}^{001} + W_{1012}^{00} \\ X_{202}^0 &= Z_{202}^0 + W_{2020}^{000} + W_{2020}^{01} + W_{2021}^{000} \\ X_{202}^0 &= Z_{202}^0 + W_{2020}^{000} + W_{2020}^{000} \\ X_{201}^0 &= Z_{010}^0 + W_{0102}^{000} + W_{0102}^{000} \\ X_{010}^0 &= Z_{010}^0 + W_{0102}^{000} + W_{0102}^{000} \\ X_{410}^0 &= Z_{410}^1 + W_{4102}^{000} + W_{4102}^{000} \\ X_{410}^1 &= Z_{410}^1 + W_{4102}^{000} + W_{4102}^{000} \\ X_{410}^1 &= Z_{410}^1 + W_{4102}^{000} + W_{4102}^{000} + Y_{4102}^{00} \\ X_{410}^1 &= X_{410}^1 + W_{4102}^{000} + W_{4102}^{000} + W_{4102}^{000} + Y_{300}^{00} \\ X_{410}^1 &= X_{410}^1 + W_{4102}^{000} + W_{4102}^{000} + W_{4102}^{000} + Y_{300}^{00} \\ X_{410}^1 &= X_{410}^1 + W_{4102}^{000} + W_{4102}^{000} + W_{4102}^{000} + W_{2020}^{000} + Y_{300}^{00} \\ X_{010}^1 &+ W_{0001}^{000} + W_{0002}^{010} + W_{0011}^{000} + W_{2020}^{000} + W_{2021}^{000} + Y_{300}^{00} \\ Z_{101}^1 &+ W_{1010}^{000} + W_{1010}^{011} + W_{1012}^{000} + W_{1012}^{000} + Y_{1012}^{000} + Y_{302}^{00} \\ Z_{202}^1 &+ W_{2020}^{000} + W_{2020}^{010} + W_{1002}^{010} + W_{1012}^{010} + Y_{302}^{00} + Y_{402}^{10} \\ X_{010}^1 &+ X_{410}^1 + W_{0102}^{010} + W_{4102}^{010} + W_{4102}^{010} + W_{4102}^{010} + Y_{510}^1 + Y_{510}^1 + Y_{610}^1 \\ X_{010}^1 &+ X_{410}^1 + W_{1012}^{010} + W_{4102}^{010} + W_{4102}^{010} + Y_{511}^0 + Y_{610}^1 \\ X_{212}^1 &+ W_{2120}^{010} + W_{0102}^{010} + W_{0102}^{010} + W_{4102}^{010} + Y_{512}^1 + Y_{612}^1 \\ X_{101}^1 &\leq 1 \\ X_{010}^0 &+ X_{1010}^1 &\leq 1 \\ X_{010}^0 &+ X_{1010}^1 &\leq 1 \\ X_{010}^0 &+ Y_{100}^1 + Y_{100}^1 + Y_{100}^1 + Y_{102}^1 + Y_{102}^1 &\leq 1 \\ Y_{100}^0 &+ Y_{100}^1 + Y_{100}^1 + Y_{100}^1 + Y_{102}^1 + Y_{102}^1 &\leq 1 \\ Y_{100}^0 &+ Y_{100}^1 + Y_{100}^1 + Y_{100}^1 + Y_{102}^1 &\leq 1 \\ Y_{100}^0 &+ Y_{100}^1 + Y_{100}^1 + Y_{100}^1 + Y_{100}^1 + Y_{100}^1 + Y_{100}^1 &\leq 1 \\ Y_{100}^0 &+ Y_{1000}^1 + Y_{10000}^1 + Y_{10000}^1 + Y_{10000}^1 + Y_{10000}^1$$

$$\begin{split} Y_{610}^{0} + Y_{612}^{0} + Y_{610}^{1} + Y_{612}^{1} &\leq 1 \\ W_{0001}^{00} + W_{0002}^{00} + W_{0002}^{01} + W_{0002}^{01} &\leq 1 \\ W_{1010}^{00} + W_{1010}^{01} + W_{1012}^{00} + W_{1012}^{01} &\leq 1 \\ W_{1010}^{00} + W_{1010}^{01} + W_{1012}^{00} + W_{1012}^{01} &\leq 1 \\ W_{2020}^{00} + W_{2020}^{01} + W_{2020}^{11} + W_{2021}^{00} &\leq 1 \\ W_{0102}^{00} + W_{0102}^{01} + W_{0102}^{11} &\leq 1 \\ W_{4102}^{00} + W_{4102}^{01} + W_{4102}^{11} &\leq 1 \\ W_{200}^{00} + W_{2120}^{01} + W_{2120}^{11} &\leq 1 \\ X_{000}^{00}, X_{101}^{10}, X_{202}^{0}, X_{202}^{1}, X_{010}^{0}, X_{010}^{1}, X_{212}^{0}, X_{212}^{1}, X_{410}^{0}, X_{410}^{1} &\in \{0,1\} \\ Y_{300}^{0}, Y_{300}^{1}, Y_{301}^{0}, Y_{302}^{0}, Y_{302}^{1}, Y_{400}^{1}, Y_{402}^{1}, Y_{510}^{0}, Y_{510}^{1}, Y_{512}^{0}, Y_{512}^{1}, Y_{610}^{0}, Y_{612}^{0} &\in \{0,1\} \\ Z_{300}^{0}, Z_{300}^{1}, Z_{301}^{0}, Z_{302}^{0}, Z_{302}^{1}, Z_{400}^{1}, Z_{402}^{1}, Z_{510}^{0}, Z_{510}^{1}, Z_{512}^{0}, Z_{512}^{1}, Z_{610}^{0}, Z_{612}^{0} &\in \{0,1\} \\ W_{0001}^{00}, W_{0002}^{00}, W_{0002}^{00}, W_{0002}^{010}, W_{1010}^{10}, W_{1010}^{00}, W_{1010}^{010}, W_{1012}^{010}, W_{1012}^{00}, W_{2020}^{010}, W_{2120}^{010}, W_{2120}^{11}, W_{2120}^{110}, W_{2120}^{110}$$

A solução ótima indica que todas as variáveis são iguais a 0, exceto as seguintes que assumem valor igual a 1.

$$X_{000}^0, X_{202}^1, X_{010}^1, X_{212}^0, Z_{000}^0, Z_{202}^1, Z_{010}^1, Z_{212}^0, Y_{300}^0, Y_{512}^0, Y_{402}^1 \ e \ Y_{610}^1$$

Totalizando um custo total de alocação (FO) para este exercício de aplicação do Modelo 1V de 13.690. O resultado está definido na Tabela IV. 3.

Tabela IV. 3: Resultado do exercício o Apêndice IV

	Antes										
g	Navio 0	Navio 1	Navio 2	Ponto de Referência							
0	Ana	Araujo	Agnes	Carlos							

							Cauê			
1	Beatr Bartolo			Bruno	Bianca		Dalva; Danilo			
		Depois	– Dia 0		Depois – Dia 1					
g	Navio	Navio	Navio	Ponto de	Navio	Navio	Navio	Ponto de		
8	0	1	2	Referência	0	1	2	Referência		
0	Carlos	Carlos Araujo		Ana	Carlos	Araujo	Cauê	Ana		
0	Carios	Alaujo	Agnes	Cauê	Carios	Araujo	Cauc	Agnes		
1	Beatriz;	Bruno	Dalva	Bianca;	Danilo;	Bruno	Dalva	Bianca;		
	Bartolomeu	Diulio	Daiva	Danilo	Bartolomeu	Diuno	Daiva	Beatriz		

Os resultados da Tabela IV. 3 são os mesmos da Tabela III. 14, pelo mesmo motivo que os resultados dos Apêndices I e II deram iguais: os períodos das próximas viagens dos navios são iguais. Portanto mesmo que a aplicação do Modelo 4 permita transferência entre navios, isso não ocorre por não ser a opção mais econômica.

APÊNDICE V – DADOS DE ENTRADA DO ESTUDO DE CASO

Material em formato digital (CD-ROM)