

Daniel Leite Lacerda

*PROGRAMAÇÃO INTEIRA PARA  
OTIMIZAÇÃO DE UMA FROTA  
HOMOGÊNEA DE NAVIOS E  
ROTEAMENTO MARÍTIMO APLICADO  
A UMA COMPANHIA LINER*

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA E COMPUTAÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO

Goiânia – GO

Outubro / 2006

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

Daniel Leite Lacerda

***PROGRAMAÇÃO INTEIRA PARA  
OTIMIZAÇÃO DE UMA FROTA  
HOMOGÊNEA DE NAVIOS E  
ROTEAMENTO MARÍTIMO APLICADO  
A UMA COMPANHIA LINER***

Dissertação em cumprimento parcial para  
requerimento de Mestrado em Engenharia  
Elétrica e Computação.

Área de concentração: Engenharia de  
Computação.

Orientador:

Dr. Paulo César Miranda Machado

Co-orientador:

Leonardo da Cunha Brito

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA E COMPUTAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO

Goiânia – GO

Outubro / 2006

*Dedico esta dissertação a minha mãe, a quem devo mais do que posso pagar.*

# *Agradecimentos*

Eu gostaria de agradecer a Universidade Federal de Goiás, em particular, ao departamento de engenharia elétrica e computação por me dar a oportunidade de realizar este trabalho.

Minha sincera gratidão aos meus orientadores, Dr. Paulo César M. Machado e Leonardo da Cunha Brito, por seu auxílio. Em especial quero agradecer ao Dr. Paulo César M. Machado que sempre acreditou em minha capacidade, e aceitou a mudança de área de pesquisa. Estou grato por ter trabalhado sob sua supervisão. Quero expressar minha gratidão ao Prof. Dr. Antônio César Baleeiro Alves pelo ensino da matéria de Programação Linear, na qual esta pesquisa se iniciou.

Meus sinceros agradecimentos à marinha mercante, por possibilitar um futuro e rumo profissional e, também, uma área de pesquisa tão interessante. Quero estender meus agradecimentos a meu amigo Vladimir Roberto Vinchi, por seus conselhos e ajuda nesta tarefa árdua. A minha amiga Ana por me ajudar a instalar o Latex e explicar como usá-lo, a meu amigo Wesley Pacheco, por seus apontamentos na formatação deste trabalho e a irmã Ester pela correção ortográfica dos muitos erros que se encontravam presentes. Eu expresso meu apreço à Georgiana Branquinho O. das Neves, pela ajuda nas correções gramaticais.

A todos os meus colegas e amigos, obrigado pela ajuda.

Finalmente, eu quero expressar minha gratidão a todos que me encorajaram e tornaram possível a realização deste trabalho, principalmente minha mãe, Liulai L. Lacerda, por sempre acreditar em mim.

*“Aqueles que se sentem satisfeitos sentam-se e nada fazem.  
Os insatisfeitos são os únicos benfeitores do mundo.”*

***Walter Savage Landor***

# *Resumo*

Esta dissertação explora modelos de otimização em programação matemática para roteamento e tamanho de frota ideal em sistemas de transporte marítimo. A literatura pesquisada indica que existe uma escassez de pesquisa nos problemas de roteamento e tamanho de frota.

O enfoque desta pesquisa é construir um modelo que obtenha a quantidade mínima de navios necessária para suprir o atendimento de certas rotas, estimando a velocidade de trânsito ideal em cada rota e frequência de tráfego. O modelo foi construído a partir do melhoramento de uma antiga formulação de um problema de agendamento e tamanho de frota de navios-tanques de autoria de Dantzig e Fulkerson (1954). Este modelo original foi revisto e aprimorado para o melhor entendimento do novo modelo de tamanho de frota homogênea de navios e roteamento de rotas marítimas.

O modelo foi construído como um programa inteiro misto e devido à sua simples estrutura, adquirida do modelo original de Dantzig e Fulkerson e também a alguns novos elementos, as soluções são obtidas de forma rápida.

A formulação foi resolvida usando o LINGO versão 9.0 estudantil. A *performance* dos resultados está intimamente ligada na sinergias entre as rotas, e como estas foram criadas. Logo, grande parte deste trabalho está focado em como construir as rotas usadas no modelo. O modelo foi testado em problemas cujas rotas foram baseadas na antiga empresa Y.S. Line, que foi absorvida pela Mitsui O.S.K. Lines.

O potencial econômico do uso eficiente das frotas marítimas justifica o uso de modelos como este. Este modelo pode ser usado para se verificar a saturação de certas rotas e apontar ganhos de sinergia entre rotas e minimizar a quantidade de navios necessária para suprir as demandas de cargas nos portos atendidos, possibilitando assim um melhor planejamento estratégico da frota.

**Palavras chaves:** (1) Tamanho ideal de frota e roteamento, (2) Transporte marítimo, (3) Modelo de Dantzig e Fulkerson, (4) Programação Inteira Mista.

# *Abstract*

This dissertation explores mathematical programming optimization models for fleet sizing and routing in a maritime transportation system. Literature surveyed on seaborne transportation systems indicates that there is a scarcity of research on ship routing and fleet size problems.

This research is focused on building a model to determine the minimal quantity required of ships to supply the demands of routes, finding the ideal velocity on each route and the traffic frequency. This model is an improvement of a prior formulation of a tanker ship fleet size and routing problem by Dantzig and Fulkerson (1954). The original model will be reviewed for better understanding of the new and improved homogenous fleet size and routing.

A mixed-integer programming model was built and due to its simple structure, inherited from the original Dantzig-Fulkerson's model and some new elements, the solutions can be produced very quickly.

The problem is solved using LINGO 9.0 student version. The performance of the results is deeply connected with the synergy between the routes, and how they were created. So a great part of this work is dedicated to show how to build the routes used in the model. The model was tested on problems with routes based on routes owned by former Y.S. Line, now absorbed by Mitsui O.S.K. Lines.

The economical potential of efficient use of maritime fleet justifies the use of optimization models like the one presented here. This model could be used to verify saturation on high demand routes, to determine gains from synergy between routes and to minimize the quantity of ships necessary to meet the demands of cargoes on visited ports, making possible a better strategic planning of the fleet.

**Keywords:** (1) Fleet Size and Routing, (2) Maritime Transportation, (3) Dantzig and Fulkerson model, (4) Mixed Integer Programming.

# *Sumário*

**Lista de Figuras**

**Lista de Tabelas**

<b>Terminologia e Abreviaturas</b>	p. 18
<b>Introdução</b>	p. 20
<b>1 Revisão bibliográfica</b>	p. 22
1.1 Introdução . . . . .	p. 22
1.2 Características dos problemas do transporte marítimo . . . . .	p. 22
1.2.1 Planejamento estratégico . . . . .	p. 26
1.2.2 Problemas táticos e operacionais no transporte liner . . . . .	p. 29
1.2.3 Roteamento e agendamento de embarcações . . . . .	p. 31
<b>2 Construção do Modelo</b>	p. 35
2.1 Introdução . . . . .	p. 35
2.2 O modelo de tamanho de frota de Dantzig-Fulkerson . . . . .	p. 36
2.2.1 Restrições, variáveis e função objetivo do modelo de Dantzig-Fulkerson . . . . .	p. 37
2.2.2 Problema exemplo para o modelo de Dantzig-Fulkerson . . . . .	p. 39
2.2.3 Resolução do problema exemplo . . . . .	p. 42
2.2.4 A Formulação dual do modelo de tamanho de frota de Dantzig-Fulkerson . . . . .	p. 47
2.3 O problema do caixeiro viajante . . . . .	p. 48

2.4	Formulação MIP do problema de tamanho ideal de frota naval e roteamento	p. 51
2.4.1	Um pequeno exemplo do uso do modelo do tamanho ideal de frota	p. 56
2.5	Como estimar as velocidades ideais para cada rota?	p. 59
2.6	Formulação modificada para incluir o tamanho e composição ideal da frota	p. 60
2.7	Algoritmos e dificuldade computacional	p. 62
<b>3</b>	<b>Coleta de dados</b>	p. 66
3.1	Rotas, portos e histórico da Y.S. Line	p. 66
3.1.1	Rota do Sudoeste do Pacífico (rota da Califórnia)	p. 68
3.1.2	Rota do Noroeste do Pacífico	p. 68
3.1.3	Rota de Nova York	p. 69
3.1.4	Rota da Austrália	p. 70
3.1.5	Rota Austrália/Extremo Oriente	p. 72
3.1.6	Rota do Oriente Médio e Golfo	p. 72
3.1.7	A rota da China	p. 72
3.1.8	Serviço de Container Trans-Siberiano	p. 73
3.1.9	Serviços Alimentadores do Extremo Oriente e Sudeste Asiático	p. 74
3.1.10	Serviço de Container de Porto Rico	p. 75
3.2	Criação dos dados do modelo baseadas em rotas da Y.S. Line	p. 76
3.2.1	Rota 1.1: Rota do Sudoeste do Pacífico (rota da Califórnia)	p. 77
3.2.2	Rota 1.2: Rota do Sudoeste do Pacífico (rota da Califórnia)	p. 78
3.2.3	Rota 2: Rota do Noroeste do Pacífico	p. 79
3.2.4	Rota 3: Rota de Nova York	p. 79
3.2.5	Rota 4.1: Rota da Austrália - Japão-Austrália	p. 80
3.2.6	Rota 4.2: Rota da Austrália - Coreia-Austrália	p. 81
3.2.7	Rota 5: Rota Austrália/Extremo Oriente	p. 81
3.2.8	Rota 6: Rota do Oriente Médio e Golfo	p. 83

3.2.9	Rota 7: Rota da China . . . . .	p. 84
3.2.10	Rota 8: Serviço de Container Trans-Siberiano . . . . .	p. 85
3.2.11	Rota 9: Serviço de Container de Porto Rico . . . . .	p. 86
3.2.12	Rota 10.1: Rota da Coréia . . . . .	p. 86
3.2.13	Rota 10.2: Rota Taiwan-Hong Kong . . . . .	p. 88
3.2.14	Rota 10.3: Rota dos Straits . . . . .	p. 88
3.2.15	Rota 10.4: Rota de Cebu . . . . .	p. 88
3.2.16	Rota 10.5: Rota de Bangkok . . . . .	p. 90
3.3	Modelagem dos problemas . . . . .	p. 90
<b>4</b>	<b>Resultados</b>	p. 92
4.1	Introdução . . . . .	p. 92
4.2	Soluções triviais do problema . . . . .	p. 92
4.3	Soluções otimizadas dos problemas . . . . .	p. 95
4.3.1	Solução do problema 1 . . . . .	p. 95
4.3.2	Solução do problema 2 . . . . .	p. 100
4.3.3	Solução do problema 3 . . . . .	p. 104
4.4	As velocidades ideais para cada rota . . . . .	p. 108
	<b>Conclusões e recomendações para futuras pesquisas</b>	p. 110
	<b>Referências</b>	p. 112
<b>5</b>	<b>Apêndice A - Visão geral do meio marítimo.</b>	p. 116
5.1	As maiores linhas oceânicas . . . . .	p. 118
5.2	Comércio entre a América do Norte e o Extremo Oriente . . . . .	p. 119
5.3	A frota liner . . . . .	p. 120
5.4	Regularidade e frequência das viagens . . . . .	p. 122

5.5	Organização do sistema de conferências liners . . . . .	p. 123
5.6	Cobertura de serviços oferecidos por uma companhia liner . . . . .	p. 125
5.7	Conceitos Básicos de Navegação . . . . .	p. 126
5.7.1	Interferências oceanográficas e meteorológicas . . . . .	p. 129
<b>6</b>	<b>Apêndice B - Informações detalhadas das rotas</b>	<b>p. 132</b>
<b>7</b>	<b>Apêndice C - Portos usados para cálculo dos coeficientes de custo de viagem</b>	<b>p. 151</b>
<b>8</b>	<b>Apêndice D - Problemas baseados nas rotas criadas, modelados no LINGO</b>	<b>p. 162</b>

# *Lista de Figuras*

1	Diagrama de todas as rotas possíveis, e demandas de navios/dia . . . . .	p. 41
2	Matriz com os coeficientes da função objetivo e restrições do exemplo. . .	p. 42
3	Representação esquemática da base inicial (rotas óbvias) do problema exemplo . . . . .	p. 43
4	Solução ótima do problema exemplo de tamanho de frota e roteamento .	p. 45
5	Circulação múltipla para um problema de 6 cidades do caixeiro viajante .	p. 49
6	Representação esquemática da restrição que assegura que navios sejam designados para outras rotas após terem completados uma dada rota . .	p. 53
7	Representação esquemática da restrição que assegura que qualquer rota receba uma frequência de navios que possibilite seu percurso nas frequências dadas por $b_i$ . . . . .	p. 54
8	Coefficientes não nulos da matriz restrição e função objetivo para um problema de 7 rotas e 49 variáveis inteiras. . . . .	p. 57
9	Esquema de um sistema de rotas independentes conectados por um hub.	p. 62
10	Esquema didático de um poliedro criado pelas restrições do modelo proposto para acomodar as soluções viáveis com valores inteiros. . . . .	p. 64
11	Rotas de alimentação do sudeste asiático . . . . .	p. 74
12	Rota de Porto Rico . . . . .	p. 75
13	Seqüência de rotas para a solução 1-B. . . . .	p. 99
14	Seqüência de rotas para a solução 2-D. . . . .	p. 103
15	Seqüência de rotas para a solução 3-B. . . . .	p. 107
16	As maiores rotas marítimas e o desbalanço no comércio mundial . . . . .	p. 119
17	Composição da frota liner por tipos de navios. Fonte: Clarkson research Studies. . . . .	p. 121

- 18 Frota de navios containers: 1980-96. Fonte: Clarkson research Studies . . . p.122
- 19 Ortodromia (arco de círculo máximo). Fonte: Navegação Costeira e Estimada - A ciência e a arte. . . . . p.127
- 20 Linha de rumo ou loxodromia. Fonte: Navegação Costeira e Estimada - A ciência e a arte. . . . . p.128
- 21 Principais Correntes Oceânicas. Fonte: Navegação Costeira e Estimada - A ciência e a arte. . . . . p.130
- 22 Rotas da América e Caribe. Fonte: Y. S. Line - Container Service. . . . . p.132
- 23 Rotas do sudeste asiático, Oriente Médio e Austrália. Fonte: Y. S. Line - Container Service. . . . . p.133
- 24 Rotas da Europa alimentados pelo transporte trans-siberiano. Fonte: Y. S. Line - Container Service. . . . . p.133

# *Lista de Tabelas*

1	Comparação entre as características operacionais de diferentes modos de transporte. Fonte: Christiansen et al. (2004) . . . . .	p. 25
2	Resumo da literatura em roteamento e agendamento estratégico para frota marítima. . . . .	p. 30
3	Resumo da literatura de agendamento e roteamento em transporte liner .	p. 31
4	Resumo da literatura dos problemas relacionados com o agendamento e roteamento de navios. . . . .	p. 34
5	Frequências, origem e destino para cada rota . . . . .	p. 39
6	Matriz de tempo de viagens . . . . .	p. 40
7	Solução ótima da frota de navios para o problema exemplo . . . . .	p. 44
8	Análise da variação da função objetivo pelos preços duais. . . . .	p. 46
9	Tabela de transformações primal e dual . . . . .	p. 47
10	Tabela de tempo de viagens nas rotas 1 e 2 do exemplo . . . . .	p. 58
11	Solução do exemplo para determinar o roteamento, frequência de tráfego e tamanho da frota homogênea. . . . .	p. 59
12	Comparação das características do modelo proposto de tamanho ótimo de frota e roteamento com o modelo de Dantzig-Fulkerson. . . . .	p. 63
13	Evolução da frota e capacidade em TEU da Y.S Line . . . . .	p. 66
14	Resumo das escolhas estratégicas para companhias liners . . . . .	p. 67
15	Navios da rota da Califórnia . . . . .	p. 68
16	Navios da rota da Noroeste do Pacífico . . . . .	p. 69
17	Navios da rota de Nova York . . . . .	p. 70
18	Navios LO/LO da rota da Austrália . . . . .	p. 71

19	Navios RO/RO da rota da Austrália . . . . .	p. 71
20	Navios da rota da Austrália/Extremo Oriente . . . . .	p. 72
21	Navios da rota do Oriente Médio e Golfo . . . . .	p. 73
22	Navios da rota Trans-Siberiano . . . . .	p. 74
23	Descrição das rotas do sistema de serviço alimentador do sudeste asiático.	p. 75
24	Coeficiente de custo da rota 1.1. . . . .	p. 78
25	Coeficiente de custo da rota 1.2. . . . .	p. 79
26	Coeficiente de custo da rota 2. . . . .	p. 80
27	Coeficiente de custo da rota 3. . . . .	p. 81
28	Coeficiente de custo da rota 4.1. . . . .	p. 82
29	Coeficiente de custo da rota 4.2. . . . .	p. 82
30	Coeficiente de custo da rota 5. . . . .	p. 83
31	Coeficiente de custo da rota 6. . . . .	p. 84
32	Coeficiente de custo da rota 7. . . . .	p. 85
33	Coeficiente de custo da rota 8. . . . .	p. 86
34	Coeficiente de custo da rota 9. . . . .	p. 87
35	Coeficiente de custo da rota 10.1. . . . .	p. 87
36	Coeficiente de custo da rota 10.2. . . . .	p. 88
37	Coeficiente de custo da rota 10.3. . . . .	p. 89
38	Coeficiente de custo da rota 10.4. . . . .	p. 89
39	Coeficiente de custo da rota 10.5. . . . .	p. 90
40	Demanda de navios por dia baseada na frequência usada pela Y.S. Line. .	p. 90
41	Quantidade de navios por rota do problema 1, utilizando o seqüencia- mento das rotas óbvias. 45 Navios são necessários. . . . .	p. 93
42	Quantidade de navios por rota do problema 2, utilizando o seqüencia- mento das rotas óbvias. 43 Navios são necessários. . . . .	p. 94

43	Quantidade de navios por rota do problema 3, utilizando o seqüenciamento das rotas óbvias. 30 Navios são necessários. . . . .	p. 94
44	Solução A do problema 1 (utiliza o modelo com todas as restrições). São necessários 43 navios para cumprir as demandas. . . . .	p. 97
45	Solução B do problema 1 (utiliza o modelo com a restrição adicional de tamanho máximo da frota). São necessários 43 navios para cumprir as demandas. . . . .	p. 97
46	Solução C do problema 1 (utiliza o modelo com a restrição adicional de número máximo de navios por rotas). São necessários 43 navios para cumprir as demandas. . . . .	p. 98
47	Solução D do problema 1 (utiliza o modelo sem restrições adicionais). São necessários 43 navios para cumprir as demandas. . . . .	p. 98
48	Solução A do problema 2. São necessários 42 navios. . . . .	p. 101
49	Solução B do problema 2. São necessários 42 navios. . . . .	p. 102
50	Solução C do problema 2. São necessários 42 navios. . . . .	p. 102
51	Solução D do problema 2. São necessários 42 navios. . . . .	p. 103
52	Solução A do problema 3. São necessários 28 navios. . . . .	p. 105
53	Solução B do problema 3. São necessários 28 navios. . . . .	p. 106
54	Solução C do problema 3. São necessários 28 navios. . . . .	p. 106
55	Solução D do problema 3. São necessários 28 navios. . . . .	p. 107
56	Velocidades ideais de roteamento para ir à rota 'j', após completar uma determinada rota. . . . .	p. 108
57	Velocidades ideais para trânsito das rotas compostos pelos arcos 'ij'. . . . .	p. 109
58	Eventos Meteorológicos e Oceanográficos. Fonte: (LOBO; SOARES, 1999). . . . .	p. 131
59	Informações detalhadas da rota 1.1 . . . . .	p. 135
60	Informações detalhadas da rota 1.2 . . . . .	p. 136
61	Informações detalhadas da rota 2 . . . . .	p. 137
62	Informações detalhadas da rota 3 . . . . .	p. 138

63	Informações detalhadas da rota 4.1 . . . . .	p. 139
64	Informações detalhadas da rota 4.2 . . . . .	p. 140
65	Informações detalhadas da rota 5 . . . . .	p. 141
66	Informações detalhadas da rota 6 . . . . .	p. 142
67	Informações detalhadas da rota 7 . . . . .	p. 143
68	Informações detalhadas da rota 8 . . . . .	p. 144
69	Informações detalhadas da rota 9 . . . . .	p. 145
70	Informações detalhadas da rota 10.1 . . . . .	p. 146
71	Informações detalhadas da rota 10.2 . . . . .	p. 147
72	Informações detalhadas da rota 10.3 . . . . .	p. 148
73	Informações detalhadas da rota 10.4 . . . . .	p. 149
74	Informações detalhadas da rota 10.5 . . . . .	p. 150
75	Portos usados para cálculo dos coeficientes de custo de viagem da rota 1.1.	p. 154
76	Portos usados para cálculo dos coeficientes de custo de viagem da rota 1.2.	p. 154
77	Portos usados para cálculo dos coeficientes de custo de viagem da rota 2.	p. 155
78	Portos usados para cálculo dos coeficientes de custo de viagem da rota 3.	p. 155
79	Portos usados para cálculo dos coeficientes de custo de viagem da rota 4.1.	p. 156
80	Portos usados para cálculo dos coeficientes de custo de viagem da rota 4.2.	p. 156
81	Portos usados para cálculo dos coeficientes de custo de viagem da rota 5.	p. 157
82	Portos usados para cálculo dos coeficientes de custo de viagem da rota 6.	p. 157
83	Portos usados para cálculo dos coeficientes de custo de viagem da rota 7.	p. 158
84	Portos usados para cálculo dos coeficientes de custo de viagem da rota 8.	p. 158
85	Portos usados para cálculo dos coeficientes de custo de viagem da rota 9.	p. 159
86	Portos usados para cálculo dos coeficientes de custo de viagem da rota 10.1. . . . .	p. 159
87	Portos usados para cálculo dos coeficientes de custo de viagem da rota 10.2. . . . .	p. 160

88	Portos usados para cálculo dos coeficientes de custo de viagem da rota	
	10.3. . . . .	p.160
89	Portos usados para cálculo dos coeficientes de custo de viagem da rota	
	10.4. . . . .	p.161
90	Portos usados para cálculo dos coeficientes de custo de viagem da rota	
	10.5. . . . .	p.161

## *Terminologia e Abreviaturas*

**Armador:** Operador legal do(s) navio(s).

**Cell guides :** Estrutura que permite a melhor estivagem dos containeres.

**Calado:** Profundidade imersa do casco da embarcação.

**Carta de Mercator:** Projeção conforme cilíndrica da superfície da terra, tangente ao equador, mais usado em mapas e nas cartas náuticas.

**Containeres reefer:** Container que possui embutido em sua estrutura sistema de refrigeração.

**Deck/Convés principal:** O primeiro piso completamente chapeado e estanque, na qual estão situados a superestrutura do navio e as escotilhas para os porões.

**Dwt:** Deadweight ton. Indica o peso líquido da carga que um navio pode transportar.

**Derrota:** Conjunto de rumos que formam a trajetória estimada que o navio deve viajar.

**ETA:** Estimated Time Arrival. Data prevista de chegada do navio.

**Hub:** Porto principal que concentra vários tipos de operações de distribuição, onde as cargas podem ser redirecionadas de um meio de transporte para outro. Por exemplo pode redirecionar o transporte da carga de um navio de longo curso para navios alimentadores ou para uma malha ferroviária.

**IP:** Integer Programming. Programação inteira.

**NM:** Nautical Mile. Milha náutica, equivalente a 1852 metros.

**MIP:** Mixed Integer Programming. Programação inteira mista.

**Nós/knots:** Equivalente a 1 milha náutica por hora ou 1852 m/h.

**PCV:** Problema do caixeiro viajante.

**PL:** Programa Linear.

- Planner:** Pessoa responsável pelo planejamento de algum processo marítimo. Existem planners responsáveis pela alocação eficiente dos containeres no navio, planejamento das rotas.
- Porão:** Local no navio designado para acomodar a carga.
- RO/RO:** Navio construído especificamente para transportar carga rolante (carros, caminhões), ou carga transportada por empilhadeiras. É uma abreviação de roll-on roll-off.
- Sea-Land:** Companhia americana que fez o uso pioneiro dos containeres. Desde 1999 faz parte da A.P. Moller-Maersk Group.
- SP:** Set Partitioning.
- Superestruturas do navio:** Construção feita sobre o convés principal, na qual estão localizados os compartimentos habitáveis.
- Sistema Alimentador:** Transporte marítimo que distribui a carga, geralmente de um porto hub, para uma região geográfica próxima.
- TEU:** Twenty foot equivalent units. Unidade de contagem de um container de 20 pés. Um container de 40 pés equivale a 2 TEUs.
- Transshipment:** Transporte de carga de um porto principal para seu porto de destino, através de qualquer meio de transporte.
- Viagem em lastro:** Viagem que o navio faz quando está sem carga. Pode também significar a viagem de início para outra rota, mesmo que o navio esteja transportando carga.
- VLCC:** Very Large Crude Carrier. Navio tanque especializado no transporte de petróleo. Sua capacidade de transporte varia de 160.000 até 400.000 dwt.
- Y.S. Line:** Ramo liner da Yamashita-Shinnihon Steamship Co., Ltd.
- Waypoint:** Posição geográfica na derrota, na qual há mudança de rumo e velocidade.

# *Introdução*

Pouca pesquisa foi feita em problemas de ordem estratégica no transporte liner, tal como, tamanho ideal de frota. Isso é surpreendente, especialmente considerando o crescente tráfico de containeres e o grande número de fusões das indústrias marítimas de transporte que estão ocorrendo.

As companhias de transporte de container que operam no segmento liner deveriam pressionar por mais pesquisas em problemas no design de redes de tráfico eficientes e disposição das rotas para a frota, mas isso não está ocorrendo. A dificuldade para o uso prático dos sistemas de suporte de decisão otimizados dos trabalhos públicos disponíveis, mesmo aqueles onde os trabalhos são focados em problemas reais e possuem uma grande atratividade econômica, se deve ao fato que os sistemas de agendamento de frota em uso pelas companhias serem confidenciais e mantidos como segredos industriais e, também, em parte, devido à tradição nessas companhias do uso de planners com experiência marítima, mas sem conhecimentos em pesquisa operacional (CHRISTIANSEN; FAGERHOLT; RONEN, 2004).

O problema estratégico do tamanho da frota e composição é extremamente importante no que concerne às decisões de roteamento e agendamento e deve ser pesquisada, com mais atenção, no futuro. Apesar da pouca pesquisa nesse tipo de problema, o potencial para melhorar as decisões do tamanho da frota, usando decisões baseadas com suporte de sistemas de otimização, é significativa. Com as transformações que estão ocorrendo no transporte marítimo, por mais ganho de eficiência, interação com a flutuação dos mercados e integração do modo de transporte marítimo com outros modos de transporte para serviços de entrega porta a porta, o tamanho ótimo da frota se torna cada vez um assunto mais importante e complexo, cujo contexto envolve suposições da evolução do mercado, no futuro, para determinar a frota ótima. Visto que a determinação do tamanho da frota ótima depende das expectativas de como o mercado futuro irá evoluir, conceitos de otimização, com incertezas, provavelmente devem ser consideradas.

O objetivo dessa dissertação é descrever um modelo para determinação do tamanho ideal de uma frota de navios de uma companhia liner, que permite atender um certo

número específico de rotas com uma frequência mínima já estabelecida previamente. O modelo proposto foi formulado em MIP e tem componentes operacionais, tais como saber qual é a maior frequência possível que as rotas podem ser transitadas e a velocidade ideal para assegurar o atendimento da rota na frequência especificada. A frota a ser considerada é de navios homogêneos, assim, todos os navios da frota podem visitar qualquer porto incluso na rota, transitando nas velocidades especificadas pelas rotas e todas as operações nos portos são idênticas para qualquer navio. O modelo permite pequenas violações na frequência da rota e com esse dado pode-se estimar a velocidade ideal que os navios devem transitar na rota. As violações nas frequências dão robustez ao modelo e permitem que atrasos sejam tolerados e as incertezas, devido ao mau tempo e outros elementos do mundo marítimo, sejam absorvidos com o aumento ou diminuição da velocidade dos navios. Esse trabalho foi desenvolvido a partir do melhoramento do modelo proposto por Dantzig e Fulkerson em 1954, que foi revisado nesta dissertação.

### **Organização da dissertação**

A dissertação está organizada da seguinte maneira. No capítulo 1, será apresentada uma revisão literária dos problemas relacionados ao agendamento, roteamento e tamanho de frota marítimos e discutidas as razões que contribuem com a escassez de pesquisa nos sistemas de transportes marítimos. No capítulo 2, será apresentada uma revisão do modelo formulado por Dantzig e Fulkerson (1954) e em seqüência será descrita a formulação MIP do modelo de tamanho de frota homogênea e roteamento. A aquisição de dados será detalhada no capítulo 3, bem como as características da construção de uma rota marítima e fatores que interferem na navegação de uma rota e, conseqüentemente, que interferem com os resultados. Os resultados obtidos com o modelo e seu significado econômico estão dispostos no capítulo 4. Por fim, na conclusão, será resumida a pesquisa desta dissertação e recomendações para futuras pesquisas e melhoramentos das idéias serão apresentadas.

# 1 *Revisão bibliográfica*

*“Os grandes navegadores devem sua reputação aos temporais e tempestades.”*

*Epicuro*

## 1.1 Introdução

Este capítulo começa citando as principais características dos problemas do meio marítimo e discutindo algumas das razões da relativa escassez de pesquisa dos problemas de otimização marítimos. Um esquema de classificação dos problemas relativos do transporte marítimo é apresentado, bem como as técnicas para solucioná-las.

Para uma noção da importância dos sistemas de transporte marítimo e conceitos básicos relativos à sua operação e características, leia o apêndice A.

## 1.2 Características dos problemas do transporte marítimo

O tamanho da frota de uma companhia marítima pode variar muito com o passar do tempo e a frota pode conter vários tipos de navios com diferentes tamanhos, com estruturas de custo e outras características distintas. Apesar do tamanho da frota e outros atributos das companhias marítimas poderem se diferenciar, consideravelmente, eles têm um objetivo principal em comum: utilizar sua frota (fixa ou variável) de maneira ótima. Conseqüentemente, as companhias marítimas têm muitas complexas similaridades, grandes problemas de planejamento que vão, desde as operações estratégicas até o nível tático. Exemplos típicos são: o tamanho ótimo da frota e assuntos correlatos, como dar rotas para cada navio e como agendá-los, e selecionar a melhor rota para um navio entre dois portos que evitem mau tempo e aproveitem as correntes oceânicas.

A aquisição de um navio envolve um grande investimento de capital (valores em mi-

lhões de dólares) e os custos de operações diárias se situam em milhares de dólares. Logo, a melhora na utilização da frota pode ser traduzida em significantes resultados financeiros. Outro resultado positivo relacionado à melhor utilização da frota é a redução dos danos ambientais, devido à redução nas operações de transporte.

Apesar do claro benefício potencial que sistemas de decisões baseadas em pesquisa operacional podem gerar, problemas de roteamento marítimo e agendamento atraíram pouco interesse de pesquisa, no passado, se comparado com a pesquisa feita em outros modos de transporte. Para uma revisão do que foi feito nos últimos vinte anos, leia Ronen (1983) e Christiansen et al. (2004). Em seu artigo, Ronen (1983) apontou uma grande escassez de trabalhos publicados em sistemas de transporte marítimo e enumerou algumas razões disso ocorrer:

- Existem poucos operadores de frotas marítimas, em contraposição ao grande número de frotas de caminhões rodoviários.
- Os problemas de roteamento e agendamento de navios são muito complexos e envolvem uma diversidade de estruturas e ambientes operacionais.
- Existe um grande nível de incerteza associado com as operações de um navio. Um navio pode se atrasar, mudar de curso devido a condições severas de tempo, problemas mecânicos, ou greves. Tais atrasos podem incluir grande perda de capital. Levy et al. (1977) investigou a performance dos navios comerciais e concluiu que a probabilidade de se conseguir completar com sucesso um trimestre de agendamento (algo em torno de três viagens) é de apenas 30 %. Atrasos em carga e descarga e problemas portuários trazem ainda mais incerteza. Mesmo com os melhoramentos tecnológicos dos últimos anos, as incertezas inerentes do meio marítimo continuam muito altas.

Além dos impedimentos citados, os problemas de roteamento e agendamento marítimos são diferentes dos encontrados em outros modos de transporte. Para citar, alguns: navios pagam taxas portuárias; o calado do navio é função do peso da carga e pode afetar a compatibilidade do navio/porto, na questão da profundidade do canal de acesso ao porto; navios operam em águas internacionais; as viagens podem durar dias ou semanas e seu tempo no porto pode incluir janelas de tempo de disponibilidade para operação; navios operam continuamente, sem espaços de tempo ocioso para absorver atrasos; existe uma grande variedade de *design* e tipos de navios; existe uma grande dependência das

condições meteorológicas. Outro tipo de incerteza que dificulta a modelagem e otimização dos sistemas marítimos é a dificuldade para uma formulação econômica abrangente das estruturas de mercado do meio marítimo. Em Haralambides (2000), é discutido a dificuldade da formulação teórica da estrutura econômica que explique o comportamento do mercado de transporte liner. Essas limitações podem interferir na precisão de um modelo de otimização que dependa de um modelo econômico e suas previsões. A tabela 1 apresenta um resumo das diferenças entre os ambientes operacionais dos diversos modos de transporte.

A literatura cobre uma grande variedade de problemas interessantes em diferentes níveis de planejamento. Os problemas de planejamento de transporte marítimo são tradicionalmente classificados de acordo com seu horizonte de planejamento: problemas de ordem estratégica, de ordem tática e de ordem operacional (PANAGIOTIS, 2005). Dentro dos problemas estratégicos temos:

- Seleção de mercados e comércio.
- Tipo de navio.
- Desenvolvimento dos sistemas de transporte e de redes (incluindo a determinação dos pontos de *transshipment* para serviços intermodais).
- Tamanho da frota e decisões correlatas (tipo, tamanho e número de navios).
- Localização dos portos, tamanho e capacidade.

Os problemas de ordem tática incluem:

- Ajuste ao tamanho da frota e problemas correlatos.
- Alocação da frota (especificar determinados navios à suas rotas de comércio).
- O roteamento e agendamento dos navios.
- Agendamento dos berços nos portos.
- Agendamento de guindastes.
- Gerenciamento do pátio de containeres nos portos.
- Planejamento dos estoques de containeres.

Tabela 1: Comparação entre as características operacionais de diferentes modos de transporte. Fonte: Christiansen et al. (2004)

Característica Operacional	Navio	Avião	Caminhão	Trem
Variedade da frota (física e econômica)	Grande	Pequena	Pequena	Pequena
Unidade de potência é uma parte integral da unidade transportadora	Sim	Sim	Sim	Não
Tamanho da unidade transportadora	Fixa	Fixa	Geralmente fixa	Variável
Opera 24 horas por dia	Normalmente	Algumas vezes	Algumas vezes	Normalmente
Tamanho da viagem	Dias ou semanas	Horas ou dias	Horas ou dias	Dias
Incerteza operacional	Grande	Grande	Pequena	Pequena
Direitos de uso da rota	Compartilhado	Compartilhado	Compartilhado	Dedicado
Pagamento de taxas em portos ou estações	Sim	Sim	Não	Não
Pedágios em rotas, canais, estradas	Possível	Não	Possível	Possível
Mudança de destino, enquanto transita rota	Possível	Não	Não	Não
Período no porto utiliza múltiplas janelas de operação	Sim	Não	Não	Sim
Compatibilidade da embarcação/porto depende do peso da carga	Sim	Algumas vezes	Não	Não
Múltiplos produtos podem ser transportados juntos	Sim	Não	Sim	Sim
Retorna para a origem	Não	Não	Sim	Não

- Distribuição dos containeres vazios.

Os problemas operacionais envolvem:

- Seleção da velocidade de cruzeiro.
- Carregamento do navio.
- Percurso da rota, evitando más condições de tempo e aproveitando as correntes marítimas.

A seguir, serão revisados os problemas de planejamento estratégico da frota, o design da frota e sistemas de transporte marítimo. Depois iremos nos concentrar nos problemas de planejamento tático e operacional da indústria liner, de agendamento e roteamento marítimos. Apesar de haver distinção na literatura entre os diferentes níveis de planejamento, as decisões estão sempre interligadas. O tamanho da frota e sua composição determinam a disponibilidade dos navios para roteamento, agendamento e alocamento. Contudo, o *design* ótimo de uma frota sempre está atrelado com a demanda por serviços de transporte e as rotas que representam tais demandas. Alguns dos trabalhos revistos aqui possuem tanto elementos estratégicos quanto operacionais. No final de cada seção, uma tabela irá resumir a revisão da literatura daquela seção, em particular.

### 1.2.1 Planejamento estratégico

Dois problemas de planejamento estratégico no transporte marítimo são: o tamanho ideal da frota e o design do sistema de logística marítima. Primeiro, iremos descrever os avanços no design da frota ótima e então lidar com o design da cadeia de suprimentos marítimos.

Começaremos com o trabalho pioneiro de Dantzig e Fulkerson (1954), que será revisado nesta dissertação. Seu objetivo é minimizar o número homogêneo de navios tanques necessários para realizar um dado conjunto de agendamentos entre pares de portos, onde apenas um carregamento e um descarregamento por porto em uma viagem eram exigidos. Isso pode ser considerado um problema de tamanho de frota, onde apenas um tipo de embarcação é necessário. Pode ser demonstrado que esse tipo de problema é formulado como um problema de transporte.

Briskin (1966) estendeu o problema de Dantzig e Fulkerson (1954) ao permitir vários portos de descarga. Ele descreveu um procedimento heurístico de agrupamento no qual

os portos de descarga eram agrupados juntos e usados para agendar os navios tanques. O autor utilizou programação dinâmica para determinar o agendamento de cada navio em seu agrupamento de portos de descarga.

Laderman et al. (1966) estudou o problema de roteamento de navios. Quantidades específicas de commodities deveriam ser transportadas em um par de portos específicos. A frota considerava navios de diferentes características. O objetivo era minimizar o número de navios necessários para alcançar as metas de transporte requeridas. O problema foi modelado como um programa linear, que alocava os navios nas viagens, enquanto arredondava qualquer valor fracionário de navios nas viagens. Rao e Zions (1968) analisaram um problema similar ao de Laderman et al. (1966). Eles consideraram se era necessário o afretamento de navios ou não. O objetivo desse problema era minimizar o afretamento de embarcações e despesas operacionais dos navios. O autor empregou um algoritmo gerador de colunas baseado em sub-problemas OUT-OF-KILTER para reduzir o tamanho do programa linear.

Cho e Perakis (1996) apresentaram um estudo em relação ao tamanho de frota e o design de rotas liner ótimas para uma companhia de transporte de container. O problema foi resolvido ao gerar um número de rotas candidatas para diferentes navios a priori. Então, o problema é formulado e resolvido como um modelo de programação linear (PL), onde as colunas representam as rotas candidatas. Eles estenderam esse modelo para um modelo em programação inteira que também considera investimentos alternativos para expandir a capacidade da frota.

Xinlian et al. (2000) considera um problema similar ao de Cho e Perakis (1996). Eles apresentam um modelo de planejamento de frota cujo alvo é determinar quais os tipos de navios a se adicionar na frota existente e o plano ótimo de alocá-los. Bendall e Stent (2001), também, apresentaram um modelo para determinar o número ótimo de navios e um plano de alocação da frota numa aplicação em um *container hub*.

Um estudo em relação ao design ótima da frota e as correspondentes rotas semanais de cada navio em um sistema liner ao longo da costa norueguesa foi apresentada por Fagerholt (1999). A solução é baseada em uma formulação *set partitioning* (SP), com a geração das rotas dos navios feita a priori por meio de um algoritmo em programação dinâmica. Infelizmente, a solução apenas obtém a seleção dos navios com mesma velocidade. Então, Fagerholt e Lindstad (2000) propuseram um novo algoritmo para solucionar o problema de navios com diferentes velocidades. O algoritmo foi testado em um problema real para operações de suprimento offshore no mar norueguês e economias anuais de US\$ 7 milhões

foram identificadas em comparação à solução manual em uso naquele tempo.

Gerenciamento de recursos para uma frota de navios containeres foi estudada por Pesenti (1995). Esse problema envolve decisões de adquirir e usar navios para satisfazer as demandas de clientes. Um modelo hierárquico para o problema foi desenvolvido, e técnicas heurísticas, que resolvem o problema foram descritas em diferentes níveis de decisões.

Muitas cadeias de suprimento incluem o transporte marítimo como uma parte da via de transporte. Richetta e Larson (1997) apresentaram um problema em relação ao design do sistema de transporte marinho de resíduos de Nova York. Caminhões de lixo descarregam sua carga em estações em terra onde os resíduos são colocados em barcaças guinchadas por rebocadores até Fresh Kills Landfill na ilha Staten. Eles desenvolveram um modelo de simulação de eventos discretos que incorpora o complexo módulo de descarga para dar suporte às decisões no tamanho da frota e planejamento operacional. Esse trabalho é uma extensão de um estudo anterior de Larson (1988).

Outro estudo de simulação em relação ao design da cadeia de suprimento marítima é encontrado em Fagerholt e Rygh (2002). Aqui, o problema é desenvolver um sistema marítimo para transportar água fresca da Turquia até à Jordânia. A água fresca era transportada por mar da Turquia até uma(s) bóia(s) de descarga fora da costa de Israel, onde um sistema de dutos de canalização levava a água até um tanque do terminal na costa e finalmente, através de dutos de canalização de Israel até a Jordânia. O estudo objetivava responder a questões relacionadas ao número necessário de navios, capacidade, e velocidade das embarcações, capacidade e número de dutos e bóias de descarga e a capacidade necessária do tanque no terminal.

Mehrez et al. (1995) relataram a modelagem e solução de um problema real de uma indústria de transporte marítimo de carga: o transporte de granéis minerais das indústrias de extração até o destino dos clientes. As decisões feitas incluíram o número e tamanho dos navios para alugar em cada período de tempo durante o horizonte de planejamento, o número e localização dos portos de transshipment em uso e rotas para os portos de descarga dos clientes. O problema foi modelado e resolvido usando um modelo de programação inteira mista (MIP).

Imai e Rivera (2001) descrevem um problema onde a simulação é usada. Seu estudo lida com o planejamento do tamanho da frota de containeres refrigerados, isto é, decidir o número necessário de containeres necessários para satisfazer a demanda esperada do tráfego futuro.

Um caso especial de problema do problema estratégico do tamanho de frota é o tamanho da frota de destroyers norte-americana descrita por Crary et al. (2002), que ilustra o uso de métodos quantitativos em conjunção com opiniões de especialistas. Essas idéias foram aplicadas no planejamento do cenário para o "conflito na península Coreana de 2015", um dos dois cenários que o departamento de defesa usa para planejamento. A tabela 2 resume esses estudos.

### 1.2.2 Problemas táticos e operacionais no transporte liner

O transporte liner se diferencia bastante dos outros dois modos de operações de transporte: industrial e tramp. As diferenças, também, são evidentes em relação ao roteamento e agendamento. O transporte liner envolve decisões em diferentes níveis de planejamento:

1. O design das rotas e agendamento, isto é, o desenvolvimento de um conjunto ótimo de rotas a serem servidas por uma frota de embarcações. Isso pode ser considerado um planejamento estratégico e inclui várias similaridades com o design da rede na indústria aeronáutica.
2. Tamanho da frota e outros atributos, que é um problema de planejamento estratégico.
3. Alocação da frota, isto é, o apontamento de cada embarcação para suas rotas. A alocação da frota é problema de planejamento tático com várias similaridades com o agendamento aeronáutico.
4. Agendamento da carga, isto é, escolher que cargas serão aceitas ou rejeitadas em dada viagem. Isso é um problema de planejamento operacional.

Durante as últimas quatro décadas, a carga geral tem sido containerizada e houve um aumento significativo no transporte de carga por containeres que, quase sempre ocorre no contexto do transporte liner. Em 1995, os navios containeres constituíam 5,9% da frota mundial em capacidade bruta, enquanto em 2001, ela cresceu para 9,0% (I.S.L., 2001). Considerando o crescimento da frota mundial durante esse período, a capacidade da frota de navios containeres mais que dobrou. Apesar desse rápido crescimento, estudos em roteamento, agendamento e alocação no transporte liner são escassos. Em Powell e Perakis (1997), um modelo IP para a alocação da frota é formulado. O objetivo é minimizar os custos operacionais e de taxas para uma frota de navios liners engajados em várias

Tabela 2: Resumo da literatura em roteamento e agendamento estratégico para frota marítima.

Artigo	Decisão maior	Objetivo	Carga	Método
Briskin (1966)	Tamanho da frota e alocação	Número mínimo dos navios tanques	Petróleo cru	LP+ DP + heurísticas
Bendall e Stent (2001)	Tamanho da frota e alocação	Maior lucro	Container	MIP
Cho e Perakis (1996)	Alocação	Maior lucro	Container	SP
Crary et al.(2002)	Tamanho da frota	Probabilidade máxima de ganhar a campanha	-	MIP + opiniões de especialistas
Dantzig e Fulkerson (1954)	Tamanho da frota	Número mínimo de navios tanques	Petróleo cru	LP
Fagerholt (1999)	Tamanho da frota e outros	Custo mínimo	Container	IP + DP
Fagerholt e Lindstad (2000)	Tamanho da frota e outros	Custo mínimo	Carga Geral	IP + DP
Imai e Rivera (2001)	Tamanho da frota de container	Custo mínimo	Container	Simulação
Laderman et al.(1966)	Tamanho da frota	Número mínimo de navios	Commodities	LP
Larson (1988)	Atributos da frota e design do sistema	Custo mínimo	Sedimentos	Descritiva + heurísticas
Mehrez et al.(1995)	Tamanho da frota e design do sistema logístico	Custo mínimo	Graneis secos	MIP
Pesenti (1995)	Gerenciamento de recursos	Lucro máximo	Container	Heurística
Richetta e Larson (1997)	Tamanho da frota	Avaliação das soluções	Lixo sólido	Simulação + heurística
Xinlian et al.(2000)	Tamanho e alocação da frota	Custo mínimo	Qualquer	LP + DP
Rao e Zionts (1968)	Tamanho da frota	Custo mínimo	Commodities	LP

rotas. O modelo determina a alocação ótima da frota, dando a rota, serviço, frete de aluguel e compatibilidade de restrições. O modelo foi testado em um problema real liner e economias substanciais foram relatadas em comparação à alocação anterior. O trabalho apresentado por Powell e Perakis (1997) é uma extensão e melhoramento do trabalho de Perakis e Jaramillo (1991) e Jaramillo e Perakis (1991). Nesses dois últimos trabalhos, uma aproximação LP é usada para resolver o problema da alocação da frota. Manipulação dos resultados é necessária para atingir soluções inteiras das soluções contínuas, o que pode levar a soluções sub-ótimas e mesmo a violações nas restrições. Esses trabalhos estão resumidos na tabela 3.

Tabela 3: Resumo da literatura de agendamento e roteamento em transporte liner

Trabalho	Decisão maior	Objetivo	Carga	Método
Jaramillo e Perakis (1991)	Alocação	Custos mínimos	Carga geral	LP + heurísticas
Perakis e Jaramillo (1991)	Alocação	Custos mínimos	Carga geral	LP + heurísticas
Powell e Perakis (1997)	Alocação	Custos mínimos	Carga geral	IP

### 1.2.3 Roteamento e agendamento de embarcações

Segundo Ronen (1993), roteamento pode ser definido como o apontamento da seqüência de portos a serem visitados pelos navios. O termo agendamento é usado, quando o aspecto temporal é trazido ao roteamento. Logo, agendamento inclui o tempo dos vários eventos na rota do navio.

O objetivo do problema de agendamento clássico é minimizar a somatória dos custos para todos os navios na frota, assegurando que todas as cargas sejam entregues do porto onde a carga é embarcada até o porto de descarga. Normalmente, uma carga consiste de uma quantidade de unidades de algum produto ou commodity.

Dentro da literatura de agendamento marítimo, encontramos muitos problemas que são resolvidos por *set partitioning* (SP). Cerca de 40% dos artigos disponíveis nos últimos 10 anos, nessa área, usam uma variação de modelos SP. As principais vantagens dos modelos SP são que as restrições intrincadas e não-lineares e os custos podem ser facilmente incorporados na geração de colunas. Os modelos SP podem ser resolvidos pelo uso de software padrões de otimização e suas colunas podem ser geradas com uso de heurísticas ou otimização, dependendo do grau de qualidade desejado para a solução e tempo disponível (CHRISTIANSEN; FAGERHOLT; RONEN, 2004).

Os problemas de agendamento marítimo são, geralmente, bem restringidos, onde é possível gerar todos os agendamentos candidatos (colunas) a priori no modelo SP. Devido à relativa longa duração de cada viagem e a grande incerteza envolvida, é improvável que o planejamento de um agendamento de um navio funcione por mais do que algumas viagens. Problemas SP com poucas tarefas em cada coluna são relativamente fáceis de se resolver. Contudo, para alguns tipos de agendamentos marítimos, o número deles viáveis para a frota pode ser muito grande, para permitir a enumeração exaustiva. Para tais problemas, é possível gerar apenas agendamentos promissores, usando regras heurísticas. Alternativamente, pode-se usar a geração dinâmica de colunas. A cada iteração do processo, colunas que não foram consideradas antes podem ser geradas e aquelas, com custos reduzidos negativos, podem ser consideradas no modelo SP. Grandes problemas reais em SP têm sido resolvidos com sucesso, regularmente (Butchers et al. 2001), e o rápido desenvolvimento de algoritmos e poder computacional assegura tal progresso.

O agendamento de transporte de petróleo é um problema clássico no transporte comercial de carga e foi estudado por Brown et al. (1987). Muitos outros trabalhos o estendem em uma direção ou outra. Uma grande companhia de petróleo envia petróleo cru do Oriente Médio até a Europa e América do Norte. Todas as cargas são de navios completamente cheios e há portos e datas específicas para carregar e descarregar. As cargas podem ser feitas ou por navios controlados da própria frota ou por algum espaço afretado em outros navios. O problema é formulado em um modelo SP. O problema pode ser resolvido ao gerar todos os agendamentos viáveis, pois ele é relativamente bem restringido e o método de solução explora as próprias características do problema para realizar um procedimento de enumeração elástica. O mesmo problema é estudado por Perakis e Bremer (1992), e os resultados do estudo são apresentados em Bremer e Perakis (1992). Aqui, também, foi utilizado um modelo SP. O número de agendamentos viáveis indica que o problema foi bem restringido.

O trabalho de Brown et al. (1987) é estendido em Al-Yakoob (1997) ao incorporar os processos de construção e seleção dos agendamentos viáveis dentro do modelo, ao invés de gerá-los, separadamente. Isso é feito ao selecionar as viagens entre os pares de portos que satisfazem a demanda dentro do horizonte de tempo especificado. Além disso, o modelo de Brown et al (1987) não leva em consideração os vários tipos de navios, ou considera diferentes produtos. O modelo MIP de Al-Yakoob (1997) é capaz de lidar com navios de vários tamanhos e capacidades, o design de diferentes compartimentos no navio, e diferentes produtos. Tal modelo foi aplicado à companhia de transporte de petróleo Kuwait Petroleum Corporation (KPC), porém, devido à dificuldade e complexidade do

problema, não foi possível a obtenção de uma solução para o problema da KPC.

Um agendamento multi-produto é discutido em Fagerholt e Christiansen (2000a). Cada navio na frota é equipado com um porão de carga flexível que pode ser dividido em vários porões menores em um dado número de maneiras. O agendamento de navios é constituído dos problemas de escolha de múltiplos navios e entrega com janela de tempo, enquanto a divisão dos porões e a alocação da carga nos porões menores se fez com um problema de multialocação. A geração dos agendamentos é feita a priori e eles incluem a alocação ótima das cargas para os possíveis compartimentos. O algoritmo que acha os agendamentos ótimos para cada navio é descrito em detalhes em Fagerholt e Christiansen (2000b).

Como já foi discutido, o problema de agendamento para navios é diferente em várias maneiras dos outros modos de transporte. Duas diferenças foram focadas em Christiansen e Fagerholt (2002). Nesse problema de agendamento, os portos ficam fechados para serviços à noite e finais de semana. Logo, uma ampla janela de tempo pode ser modelada como janelas múltiplas. Além disso, o carregamento e descarregamento de alguns tipo de carga podem levar vários dias. Isso significa que o navio pode ficar ocioso muito tempo no porto, e o tempo total irá depender do tempo de chegada dele. O objetivo é achar agendamentos robustos que são menos prováveis em resultar em ociosidade do navio nos portos devido a chegadas em dias de risco (isto é, perto dos finais de semana). Eles formularam o problema como um modelo SP. Todos os agendamentos viáveis são produzidos a priori e sua geração leva em consideração as duas forças, incerteza e janelas múltiplas de tempo. Os resultados computacionais mostram que a robustez dos agendamentos aumenta com o crescimento dos custos de transporte.

Flexibilidade, bem como robustez, são duas propriedades importantes no agendamento. O aspecto da flexibilidade é considerado em Fagerholt (2001) ao introduzir janelas de tempo flexíveis ao modelo de agendamento marítimo. A motivação para a introdução de janelas de tempo flexíveis, ao invés de rígidas é permitir violações controladas, no tempo, para algumas cargas, o que pode tornar possível a obtenção de melhores agendamentos e reduções de custos significantes. O controle das violações das janelas de tempo são impostas por custos de inconveniência para serviços de carga fora de sua janela de tempo. Aqui, também, é usado um modelo SP. As janelas de tempo flexíveis são produzidas com gerador de agendamento (colunas). A solução proposta também permite a determinação da velocidade ótima em vários trechos das rotas no agendamento.

Os assuntos discutidos até aqui são categorizados como problemas de planejamento

de médio prazo. Cho e Perakis (2001) fizeram uma formulação mais eficiente e melhorada do modelo apresentado por Ronen (1986). Aqui, o agendamento é de curto prazo para o transporte de commodities a granel. Cada navio na frota começa carregando em uma única área de carga. Então, cada navio visita um número de portos de descargas. Em contraste com a maioria dos problemas de agendamentos de médio prazo marítimos, um transporte para um porto de descarga específico pode ser dividido entre vários navios. A formulação melhorada é uma versão generalizada do bem conhecido problema de localização de instalações capacitadas. A tabela 4 resume as referências vistas nessa seção.

Tabela 4: Resumo da literatura dos problemas relacionados com o agendamento e roteamento de navios.

Trabalho	Decisão maior	Objetivo	Carga	Método
Al-Yakoob (1997)	Agendamento	Custo mínimo	Produtos petrolíferos e petróleo cru	MIP e heurísticas
Bremer and Perakis (1992)	Agendamento	Custo mínimo	Petróleo Cru	SP
Brown et al. (1987)	Agendamento e velocidade	Custo mínimo	Petróleo Cru	SP
Cho e Perakis (2001)	Agendamento	Custo mínimo	Granel sólidos e commodities	IP
Christiansen e Fagerholt (2002)	Agendamento robusto	Custo mínimo	Granel sólidos	SP
Fagerholt (2001)	Agendamento e velocidade	Custo mínimo	Granel sólidos	SP
Christiansen e Fagerholt (2000a, b)	Agendamento e alocação da carga	Custo mínimo	Fertilizantes	SP
Perakis e Bremer (1992)	Agendamento	Custo mínimo	Petróleo Cru	SP
Ronen (1986)	Agendamento	Custo mínimo	Granel sólidos e commodities	IP + heurísticas

Na maioria dos estudos relatados na literatura de agendamento marítimo, a perspectiva da cadeia de suprimentos está faltando. Durante os últimos anos, alguns pesquisadores têm investigado como as companhias marítimas oceânicas podem ser integradas em uma cadeia de suprimento multimodal de entregas porta a porta. Um exemplo desse tipo de pesquisa é Saldanha e Gray (2002), onde os potenciais do transporte na costa britânica em uma cadeia multimodal são analisados.

## 2 *Construção do Modelo*

*“I don’t want it perfect, I want it Thursday.”*

*John Pierpont Morgan*

### 2.1 Introdução

Uma formulação em programação inteira do problema do tamanho ótimo de uma frota homogênea de navios será desenvolvida, nesse capítulo (seção 2.4). Serão apresentados a estrutura das restrições e significado, as variáveis que representam os navios e suas rotas, as demandas de uso de cada rota, notação e conceitos. Esse capítulo começa com uma revisão da pesquisa pioneira feita por Dantzig e Fulkerson (1954), onde serão discutidas importantes informações sobre o problema de otimização do tamanho de frota e roteamento formulado por eles. Devido à importância e semelhança com o problema de tamanho de frota e roteamento, o problema do caixeiro viajante será abordado brevemente. Ele será comparado com o modelo do tamanho de frota e suas similaridades discutidas.

O problema de tamanho de frota homogênea descrita nesta dissertação é um típico problema de otimização e se refere a como se obter a frota com o menor número de navios que consegue atender todos os portos com uma frequência mínima, previamente estipulada. Além de seus componentes estratégicos, nesse caso qual o tamanho da frota e frequência que cada rota será transitada, o modelo, também, incorpora decisões de ordem operacional e tática. O modelo é capaz de estimar qual a velocidade de cruzeiro que os navios devem apresentar em cada rota, uma decisão operacional e também indica a alocação da quantidade de navios para cada rota, uma decisão tática.

Apesar do problema formulado aqui, determinar o tamanho ideal de uma frota homogênea, no final deste capítulo serão sugeridas modificações na sua construção para que o modelo, também, consiga escolher a melhor composição de navios, para a obtenção de

uma frota mista ótima.

## 2.2 O modelo de tamanho de frota de Dantzig-Fulkerson

O modelo de tamanho de frota de Dantzig-Fulkerson é bem simples e inteligente. O modelo foi formulado como sendo um problema de transporte PL com restrições inteiras de Leontief. As restrições de Leontief têm as seguintes propriedades (JEROSLOW et al., 1992):

1. Cada restrição é uma igualdade.
2. Cada coluna tem exatamente um coeficiente positivo e deve ser igual a +1.
3. Cada coluna tem 0 ou mais coeficientes negativos e todos esses coeficientes devem ser inteiros.
4. Cada coeficiente no RHS é um inteiro não negativo.

Como resultado, um PL cujas restrições sejam do tipo Leontief inteiras, terá como solução ótima um conjunto de variáveis com valores inteiros. Além disso, se os coeficientes da função objetivo forem todos inteiros, então se obterá uma solução ótima com valores também inteiros para os preços duais.

O problema de tamanho de frota de Dantzig-Fulkerson é um problema de transporte balanceado, devido à sua forma. Um problema de transporte é dito balanceado, quando a oferta é igual à demanda. Isto é:

$$\sum_{i=1}^m s_i = \sum_{j=1}^n d_j \quad (2.1)$$

Um problema de transporte pode ser definido como se segue.

Minimizar

$$c_{11} \cdot x_{11} + \dots + c_{21} \cdot x_{21} + \dots + c_{2n} \cdot x_{2n} + \dots + c_{m1} \cdot x_{m1} + \dots + c_{mn} \cdot x_{mn}$$

Sujeito a:

$$\begin{array}{rcccccc}
x_{11} & + \dots + & x_{1n} & & & & = s_1 \\
& & & x_{21} & + \dots + & x_{2n} & = s_2 \\
& \ddots & & \ddots & & \ddots & \vdots \\
& & & & & & x_{m1} + \dots + x_{mn} = s_m \\
x_{11} & & & x_{21} & & & x_{m1} + \dots + x_{mn} = d_1 \\
& \ddots & & \ddots & & \ddots & \vdots \\
& & x_{1n} + \dots + & & x_{2n} + \dots + & & x_{mn} = d_n \\
x_{11}, \dots, x_{1n}, \dots, x_{21}, \dots, x_{2n}, \dots, x_{m1}, \dots, x_{mn} \geq 0.
\end{array}$$

Assumindo que a quantidade de oferta total é igual à demanda, o problema de transporte sempre tem uma solução viável. É simples demonstrar:

Seja  $x_{ij} = (s_i \cdot d_j)/d$ , onde  $i = 1, \dots, m$ ;  $j = 1, \dots, n$ ; e  $d$  é igual a equação 2.1.

$x_{ij}$  será uma solução básica viável e todos os componentes de  $x_{ij}$  são limitados como se segue:

$$0 \leq x_{ij} \leq \text{mínimo}[s_i, d_j] \quad (2.2)$$

Um problema linear limitado que possua uma solução básica viável sempre tem uma solução ótima (BAZARAA; JARVIS; SHERALI, 2005). Logo, podemos afirmar que o modelo de tamanho de frota de Dantzig-Fulkerson sempre possuirá uma solução ótima.

### 2.2.1 Restrições, variáveis e função objetivo do modelo de Dantzig-Fulkerson

A função objetivo do modelo é achar qual a quantidade mínima de navios necessários para satisfazer as viagens entre pares de portos, atendendo a frequência exigida. O modelo assume que as demandas, isto é, a frequência de cada rota são previamente conhecidas, bem como todas as rotas entre os pares de portos. Todas as cargas são compatíveis com qualquer navio da frota. Além das restrições de não negatividade das variáveis ( $x_{ij} \geq 0$ ), existem dois tipos de restrições que precisam ser mantidas nesse problema. A primeira restrição assegura que uma certa frequência de navios vindos de alguma rota sejam direcionados para alguma outra rota. A segunda restrição assegura que a quantidade de navios por dia necessários cheguem em cada rota.

Seja  $x_{ij}$  o número de navios por dia vindo da rota 'i' e direcionado para a rota 'j'. A demanda de navios por dia necessário na rota 'i' será representado por  $b_i$ .

Para assegurar que, após a finalização da rota 'i', haja uma quantidade de navios por dia para uma outra rota 'j', nós escreveremos a restrição:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = b_i \quad , \quad i = 1, \dots, n. \text{ Sendo } n \text{ a última rota.} \quad (2.3)$$

Para assegurarmos que, uma dada rota sempre possua os navios necessários para transitá-la, escreveremos o segundo tipo de restrição:

$$\sum_{k=1}^n x_{ki} = b_i \quad , \quad i = 1, \dots, n. \text{ Sendo } n \text{ a última rota.} \quad (2.4)$$

Esse tipo de restrição é muito similar ao problema do caixeiro viajante e no próximo capítulo iremos vislumbrar tais características.

Os coeficientes da função objetivo são o ponto focal deste modelo e mais atenção será dada em sua construção. Como o objetivo da função é minimizar o número total de navios tanques, iremos definir o coeficiente de custo,  $c_{ij}$  como sendo o tempo total necessário para que um navio viaje na rota 'i' e seja direcionado para o início da rota 'j'. Vemos que ao combinar os coeficientes de custo (o tempo de trânsito em dias) e as variáveis de frequência de navios nas rotas  $x_{ij}$  (navio por dia), iremos obter como resultado uma quantidade de navios e, devido às restrições, também a melhor ordenação das rotas a serem percorridas. A função objetivo pode ser escrita como se segue:

$$\text{Minimizar } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot x_{ij} \quad (2.5)$$

O coeficiente de custo de trânsito da rota pode ser construído da seguinte forma:

$c_{ij}$  = Número de dias para carregamento de carga + número de dias para transitar rota 'i' + número de dias descarregando carga + número de dias viajando do porto de destino da rota 'i' até o porto de origem da rota 'j'.

É importante lembrar que os valores dos coeficientes de custo de tempo da viagem devem ser inteiros. Essa é uma das desvantagens do modelo de Dantzig-Fulkerson. O uso de valores inteiros, tanto para os coeficientes de custos,  $c_{ij}$  quanto para as variáveis de demanda por navios/dia para cada rota,  $b_i$ , é, muitas vezes, não realístico. Veremos durante a resolução de um exemplo que, mesmo a demanda mais baixa de um navio por dia, pode gerar uma quantidade estrondosa de navios.

Outra característica dessa classe de problemas é o crescimento quadrático das variáveis com a adição de rotas, isto é, as variáveis aumentam pelo quadrado do número de rotas. Logo um problema com 16 rotas irá gerar 256 variáveis e 256 coeficientes de custo. Logo, criar rotas (os coeficientes de custo de viagem) para problemas de grande escala pode ser uma tarefa muito penosa para um planner que queira usar modelos similares a estes.

### 2.2.2 Problema exemplo para o modelo de Dantzig-Fulkerson

A fim de visualizar as principais características do modelo de Dantzig-Fulkerson, um problema em aberto extraído do livro *Linear Programming and Network flows* será resolvido (BAZARAA; JARVIS; SHERALI, 2005). Tal problema foi baseado no modelo de Dantzig-Fulkerson (1954). No artigo, o problema de minimização alcançou a solução ótima com 6 navios que supriam o transporte de 20 cargas (PANAGIOTIS, 2005), e esta foi a primeira publicação que Fulkerson fez junto com Dantzig. A seguir, abordaremos o problema de otimização de frota e roteamento de navios tanques através da Programação Linear.

Uma companhia precisa adquirir uma frota de navios tanques para fazer o transporte de carga entre 6 cidades. Existem 4 rotas específicas que precisam ser atendidas diariamente. As rotas e o número de navios necessários para supri-las estão descritas na tabela 5.

Tabela 5: Frequências, origem e destino para cada rota

Rota #	Origem	Destino	Número de navios necessários por dia
1	Dhahran	New York	3
2	Marseilles	Istambul	2
3	Nápoles	Bombaim	1
4	New York	Marseilles	1

Todas as cargas são compatíveis com qualquer navio, logo, apenas um tipo de navio é necessário (a carga, neste caso, é petróleo). A matriz de tempo de viagem entre as várias cidades é mostrada na tabela 6.

Sendo necessário um dia para descarregar e um dia para carregar cada navio completamente, quantos navios a companhia marítima precisa adquirir?

Primeiramente, iremos formular as restrições do problema. A restrição 2.3 assegura que navios, após percorrerem sua rota sejam apontados para outra rota. Dessa forma, a restrição para esse problema fica como a seguir:

Tabela 6: Matriz de tempo de viagens

-	Nápoles	Marseilles	Istambul	New York	Dhahran	Bombaim
Nápoles	0	1	2	14	7	7
Marseilles	1	0	3	13	8	8
Istambul	2	3	0	15	5	5
New York	14	13	15	0	17	20
Dhahran	7	8	5	17	0	3
Bombaim	7	8	5	20	3	0

$$\begin{aligned}
x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14} &= b_1 \\
x_{21} + x_{22} + x_{23} + x_{24} &= b_2 \\
x_{31} + x_{23} + x_{33} + x_{34} &= b_3 \\
x_{41} + x_{24} + x_{34} + x_{44} &= b_4
\end{aligned} \tag{2.6}$$

Onde  $b_1 = 3$ ,  $b_2 = 2$ ,  $b_3 = 1$ ,  $b_4 = 1$ .

A segunda restrição 2.4, que assegura a recirculação do sistema, ao possibilitar que haja uma quantidade de navios chegando em cada rota, está escrita a seguir:

$$\begin{aligned}
x_{11} + x_{21} + x_{31} + x_{41} &= b_1 \\
x_{12} + x_{22} + x_{32} + x_{42} &= b_2 \\
x_{13} + x_{23} + x_{33} + x_{43} &= b_3 \\
x_{14} + x_{24} + x_{34} + x_{44} &= b_4
\end{aligned} \tag{2.7}$$

Com as demandas,  $b_1 = 3$ ,  $b_2 = 2$ ,  $b_3 = 1$ ,  $b_4 = 1$ .

A figura 1 mostra uma representação esquemática das possíveis rotas descritas pelas restrições 2.6 e 2.7.

Computar os custos dos coeficientes é um pouco mais difícil. Para ilustrar como se constrói os coeficientes de custo  $c_{ij}$ , considere  $c_{23}$ :

- É necessário 1 dia para carregar um navio em Marseilles, 3 dias para viajar de Marseilles até Istambul, 1 dia para descarregar a carga em Istambul e 2 dias para chegar de Istambul a Nápoles, um total de 7 dias. Como a demanda é de 1 navio por dia para esta rota, isso implica que 7 navios são necessários para o atendimento da rota 2 e ir para a rota 3.

Para este exemplo,  $c_{ij}$  é construído da seguinte forma:

$$c_{ij} = (1 \text{ dia para carregar}) + (\text{número de dias para trânsito na rota } i) + (1 \text{ dia para$$



$$\begin{aligned}
 x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14} &= 3 \\
 x_{21} + x_{22} + x_{23} + x_{24} &= 2 \\
 x_{31} + x_{23} + x_{33} + x_{34} &= 1 \\
 x_{41} + x_{24} + x_{34} + x_{44} &= 1 \\
 x_{11} + x_{21} + x_{31} + x_{41} &= 3 \\
 x_{12} + x_{22} + x_{32} + x_{42} &= 2 \\
 x_{13} + x_{23} + x_{33} + x_{43} &= 1 \\
 x_{14} + x_{24} + x_{34} + x_{44} &= 1
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

Com  $x_{ij} \geq 0$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $j = 1, 2, \dots, n$ ).

O formato da matriz dos coeficientes das variáveis das restrições e função objetivo do problema está indicado na figura 2.

	x11	x12	x13	x14	x21	x22	x23	x24	x31	x32	x33	x34	x41	x42	x43	x44
1	36	32	33	19	10	8	7	20	12	17	16	29	23	15	16	28
2	1	1	1	1												
3					1	1	1	1								
4									1	1	1	1				
5													1	1	1	1
6	1				1				1				1			
7		1				1				1				1		
8			1				1				1				1	
9				1				1				1				1

Figura 2: Matriz com os coeficientes da função objetivo e restrições do exemplo.

### 2.2.3 Resolução do problema exemplo

Um problema comum a todos os Programas Lineares é a geração de uma base inicial. Apesar de haver técnicas específicas para a geração de uma base inicial para um PL de transporte, tais como: Regra do Canto Noroeste, Método de Vogel e Método do Custo Mínimo, para este modelo em questão, uma base inicial pode ser deduzida facilmente. Tal base inicial nada mais é do que, após os navios cumprirem suas rotas, retornam para seu início. No caso deste problema, as variáveis que entrariam na base inicial seriam:  $x_{11}$ ,  $x_{22}$ ,  $x_{33}$  e  $x_{44}$ . Esse sistema de roteamento era usado pela maioria das empresas

marítimas, antes da introdução de sistemas de controle mais eficientes. Iremos chamar as rotas geradoras da base inicial como sendo as "rotas óbvias". A figura 3 mostra como seria a base inicial do problema, esquematicamente.

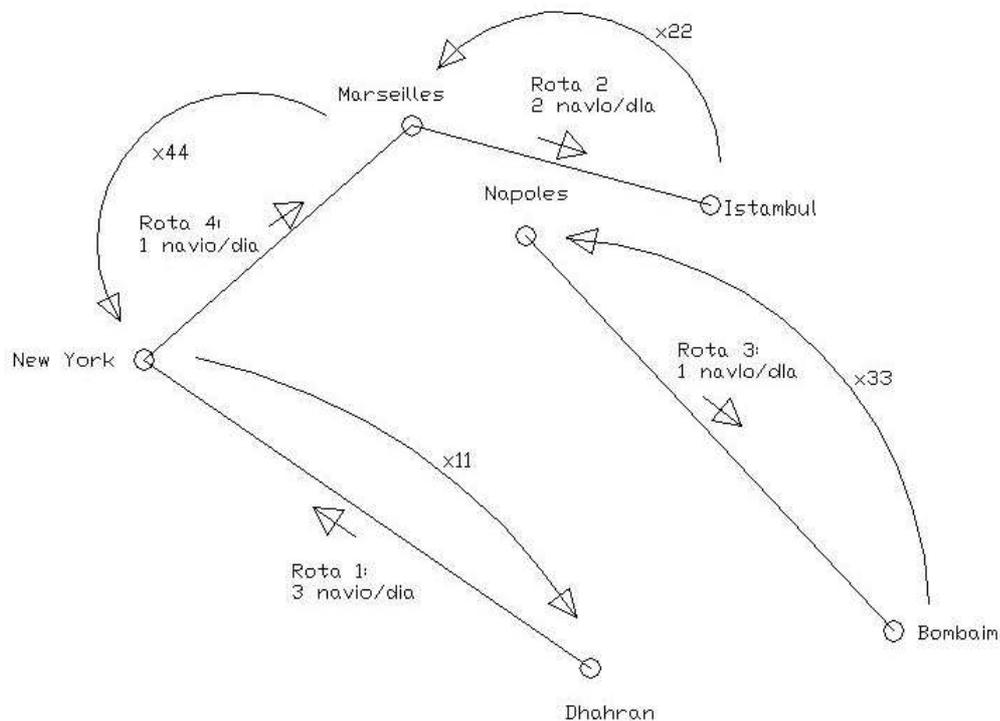


Figura 3: Representação esquemática da base inicial (rotas óbvias) do problema exemplo

Uma das grandes vantagens da programação linear é o acesso a informações extras que podem ser extraídas do modelo, tais como os preços duais e custos marginais.

### Custos reduzido

O custo reduzido de uma variável representa o crescimento ou decréscimo da função objetivo com sua entrada na base da solução. As variáveis que já estão na solução ótima irão ter custo reduzido zero. Uma interpretação matemática do custo reduzido é a razão que uma função objetivo irá se deteriorar caso uma variável não básica seja forçada na solução, isto é,  $\frac{\partial z}{\partial x_j} = z_j$ .

### Preços duais

Preços duais estão associados com cada restrição do problema primal. Eles representam a variação que a função objetivo irá ter, caso uma demanda  $b_i$  seja acrescida ou diminuída por uma pequena quantidade. Em um problema de minimizar, ao acrescentar uma demanda, o valor da função objetivo irá aumentar. A forma matemática deste fato é:  $\frac{\partial z}{\partial b_i} = w_i$ .

Neste modelo, a unidade da função objetivo é 'navio' e a unidade dos coeficientes das restrições é 'navios/dia', então a unidade do preço dual é 'dia' ( $\text{navio} \div \text{navio/tempo}$ ), ou seja o tempo de viagem. Na próxima sub-seção teremos a oportunidade de verificar o significado dos preços duais ao analisarmos o problema dual do modelo de Dantzig-Fulkerson.

A base inicial apresenta como solução 168 navios para viabilizar as demandas na configuração descrita pela figura 3. Uma das características de problemas de agendamento e roteamento é a possibilidade de haver várias soluções que alcançam o ótimo em diferentes configurações. O problema exemplo, ao ser resolvido pelo algoritmo simplex revisado, obteve a solução ótima mostrada na figura 4, com 131 navios necessários para cumprir as demandas. Na mesma figura, estão indicadas as quantidades de navios requerida para cumprimento de cada rota. O mesmo problema ao ser resolvido no programa LINGO versão 9.0 obteve uma solução alternativa com a mesma quantidade de navios, porém com um diferente roteamento. A solução alternativa é mostrada na tabela 7 e contém informações dos custos reduzidos e preços duais desta solução ótima. Uma maneira de saber sobre a existência de soluções alternativas, basta verificar se existem variáveis e seus respectivos custos reduzidos, ambos com valores iguais a zeros. Ao analisarmos a tabela 7, notamos que este problema cumpre as condições mencionadas, condições estas, também conhecidas como 'olhos da serpente' (SCHRAGE, 2003).

Tabela 7: Solução ótima da frota de navios para o problema exemplo

Variável	Valor	Custo reduzido	Restrição	Preço Dual
z	131 navios	-	-	-
x11	0	0	1 <sup>a</sup> restrição	-17
x12	1 navios/dia	0	2 <sup>a</sup> restrição	9
x13	1 navios/dia	0	3 <sup>a</sup> restrição	7
x14	1 navios/dia	0	4 <sup>a</sup> restrição	0
x21	2 navios/dia	0	5 <sup>a</sup> restrição	-19
x22	0	2	6 <sup>a</sup> restrição	-15
x23	0	0	7 <sup>a</sup> restrição	-16
x24	0	27	8 <sup>a</sup> restrição	-2
x31	1 navios/dia	0	-	-
x32	0	9	-	-
x33	0	7	-	-
x34	0	34	-	-
x41	0	4	-	-
x42	1 navios/dia	0	-	-
x43	0	0	-	-
x44	0	26	-	-

A notação negativa dos preços duais na tabela 7, indica que um aumento na demanda

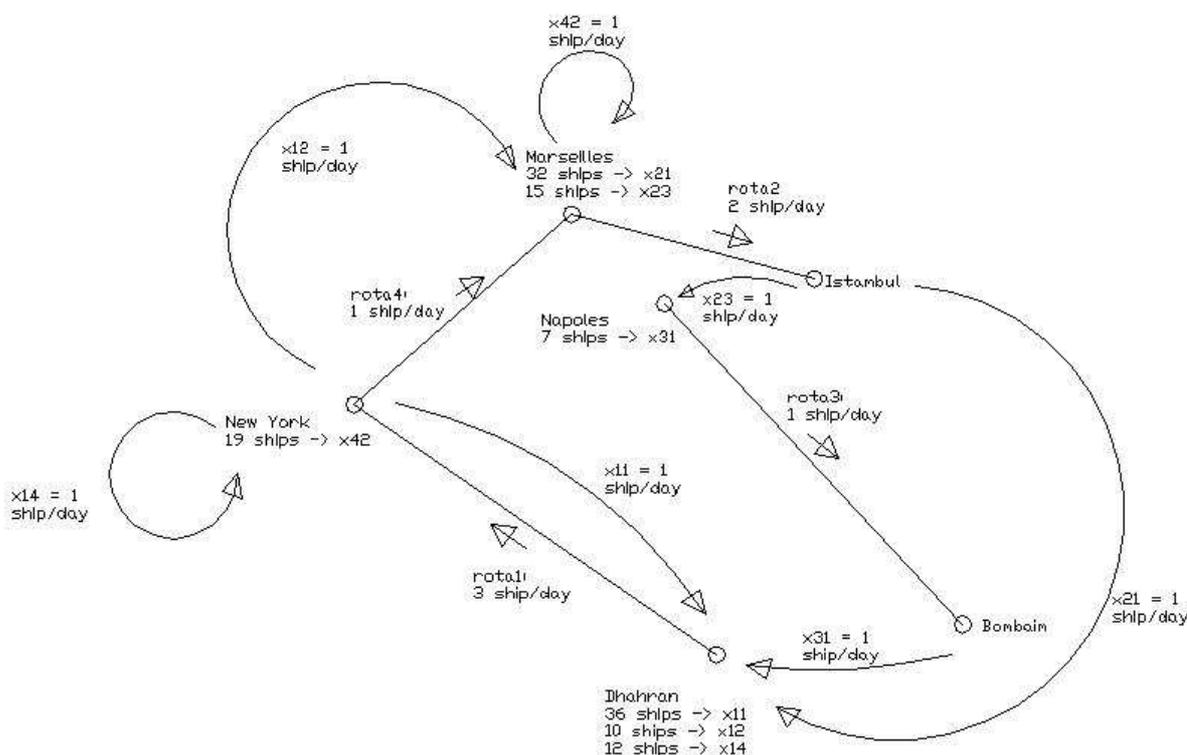


Figura 4: Solução ótima do problema exemplo de tamanho de frota e roteamento

na frequência de trânsito nas rotas 'i' irão deteriorar o valor da função objetivo, neste caso, aumentando o número de navios necessários. Caso os preços duais sejam positivos, isso indicaria um melhoramento da função objetivo, diminuindo a quantidade de navios da frota. Para fazer uma análise de sensibilidade a partir dos preços duais, neste caso, já que uma mesma variável de demanda  $b_i$  aparece em duas restrições diferentes, é necessário uma mudança desta demanda em duas restrições ao mesmo tempo. Isso implica o uso de dois preços duais para podermos avaliar como o acréscimo ou decréscimo de uma unidade na demanda que irá transformar o valor da função objetivo. A mudança de duas demandas ao mesmo tempo leva a uma mudança de base da solução ótima.

Um exemplo disso é um acréscimo de uma unidade na demandas  $b_4$  para 2 navios/dia. Esse demanda está associada com a 4ª e 8ª restrições. Analisando os preços duais para essas restrições, temos os valores de 0 dia e -2 dia, que significa para um aumento unitário na demanda em ambas as restrições uma deterioração da função objetivo por:

$0[\text{dia}] \cdot 1[\text{navio/dia}] - 2 \cdot 1[\text{navio/dia}] = -2$  navios (o sinal negativo indica deterioração da função objetivo).

Como a função objetivo era de 131 navios, espera-se que essa mudança na demanda

$b_4 = 2navios/dia$  aumente em 2 navios a frota necessária. Ao se refazer o modelo com a demanda  $b_4 = 2navios/dia$ , obtemos o resultado esperado de 133 navios e houve uma mudança de base. Quando  $b_4$  e  $b_8$  eram iguais a 1 navios/dia as variáveis com valores não nulos eram:  $x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{21}, x_{31}$  e  $x_{42}$ . Após a mudança nas demandas  $b_4$  e  $b_8$ , a base ótima mudou para:  $x_{12}, x_{14}, x_{21}, x_{31}, x_{42}, x_{43}$ .

Usando o mesmo processo na demanda  $b_2$ , aumentando em uma unidade para 3 navios/dia, com os preços duais associado às restrições 2 e 6, temos um aumento na frota igual a:

$$9[*dia*] \cdot 1[*navio/dia*] - 15 \cdot 1[*navio/dia*] = -6 \text{ navios.}$$

Logo a frota deveria ter  $131 + 6$  navios para suprir a nova demanda. Novamente o uso dos preços duais funcionou, achando o resultado de 137 navios. A tabela 8 mostra como a adição ou subtração das demandas influi no resultado, e como eles podem ser avaliados pelos preços duais.

Não está claro se tal propriedade é geral para qualquer problema que utiliza este modelo. A análise de sensibilidade, usando os preços duais, foi feita somente para este problema. Mas aqui fica claro como pode-se extrair informações importantes com o custo dual, e como analisar quais demandas podem ser aumentadas e diminuídas e ver seu impacto no tamanho da frota.

Tabela 8: Análise da variação da função objetivo pelos preços duais.

Demanda a ser alterada	Varição da demanda (navio/dia)	Preços duais associados a demanda (dia)	Mudança da função objetivo pela análise dos preços duais	Valor da função objetivo
Sem alterações	-	-	-	$z = 131$ navios
$b_1$	+ 1	- 17 e -19	+ 36 navios	$z = 167$ navios
$b_1$	- 1	- 17 e -19	- 36 navios	$z = 95$ navios
$b_2$	+ 1	9 e -15	+ 6 navios	$z = 137$ navios
$b_2$	- 1	9 e -15	- 6 navios	$z = 125$ navios
$b_3$	+ 1	7 e -16	+ 9 navios	$z = 140$ navios
$b_3$	- 1	7 e -16	- 9 navios	$z = 122$ navios
$b_4$	+ 1	0 e -2	+ 2 navios	$z = 133$ navios
$b_4$	- 1	0 e -2	- 2 navios	$z = 129$ navios

### 2.2.4 A Formulação dual do modelo de tamanho de frota de Dantzig-Fulkerson

O termo 'dual' vem da álgebra linear, já o termo 'primal' foi sugerido pelo pai de Dantzig, Tobias Dantzig (que também era matemático), como um antônimo em latim apropriado para substituir a designação "o problema original da qual este é o dual".

Para cada variável dual existe exatamente uma restrição primal e exatamente uma restrição dual para cada variável primal. A formulação dual é essencialmente a formulação primal transposta. Para que possamos formular o modelo dual, o PL primal deve estar na forma canônica e, caso o objetivo seja minimizar, ter todas as restrições com a desigualdade 'maior ou igual a' e todas as variáveis não devem ser negativas. Então para aplicarmos a definição de dualidade devemos converter o PL primal para o formato correto. As transformações para a forma canônica que possibilitam a conversão do primal para o dual são simples e estão mostradas na tabela 9 (BAZARAA; JARVIS; SHERALI, 2005).

Tabela 9: Tabela de transformações primal e dual

Problema de minimização			Problema de maximização	
Variáveis	$\geq 0$	$\iff$	$\leq$	Restrições
	$\leq 0$	$\iff$	$\geq$	
	Sem restrição	$\iff$	$=$	
Restrições	$\geq$	$\iff$	$\geq 0$	Variáveis
	$\leq$	$\iff$	$\leq 0$	
	$=$	$\iff$	Sem restrição	

Suponha que o programa linear está dado na forma canônica, como se segue:

$$\begin{aligned}
 P: \quad & \text{Minimizar} \quad c \cdot x \\
 & \text{Sujeito a:} \quad A \cdot x \geq b \\
 & \quad \quad \quad x \geq 0
 \end{aligned}$$

O PL dual é definido por:

$$\begin{aligned}
 D: \quad & \text{Maximizar} \quad w \cdot b \\
 & \text{Sujeito a:} \quad w \cdot A^T \leq c \\
 & \quad \quad \quad w \geq 0
 \end{aligned}$$

O modelo dual tenta maximizar a quantidade de demanda de navio/dia, 'b', utilizando como variáveis os tempos de viagens, 'w' (os preços duais do primal). Tais variáveis, 'w' devem conseguir se adequar aos tempos de viagens designados pelo vetor custo, 'c', que representa o tempo de viagem de cada rota.

Pela análise exposta acima, sabendo que a matriz do problema dual é a matriz do

problema primal transposta, para o problema com 4 rotas, podemos afirmar que a matriz dual terá 16 linhas de restrições (16 variáveis no primal) e 8 variáveis (8 restrições no primal).

Devido a facilidade de compreensão das unidades do modelo primal, ele foi escolhido para ser usado.

## 2.3 O problema do caixeiro viajante

O problema do caixeiro viajante (PCV) é um dos mais importantes na área de otimização combinatória, que lida com problemas de encontrar o melhor sistema possível em várias situações combinatórias e como encontrar uma árvore ótima. O problema do caixeiro viajante aparece sobre vários disfarces e possui várias aplicações. Seu nome vem da versão para o problema onde um vendedor viajante tem que visitar todas as cidades na região e aí retornar a sua casa e, obviamente, ele quer minimizar os custos de viagem. É fácil imaginar que este problema tem conexões com vários problemas de roteamentos, tais como: o design de rotas de entregas ótimas para correio, rotas ótimas para coleta de lixo, o percurso que uma máquina tem que realizar para perfurar um número de buracos em uma placa de circuito impresso e, então, retornar para o ponto inicial, etc.

O problema do caixeiro viajante é intimamente relacionado aos ciclos hamiltonianos. Um ciclo é dito hamiltoniano, quando este passa por todas os vértices de um grafo. O problema do caixeiro viajante consiste em analisar todos os ciclos hamiltonianos existentes para  $n$  pontos (VIANA, 1998). Nesse ponto, a tarefa parece trivial: simplesmente calcular o custo de cada árvore sobre esses nós e selecionar a árvore com o menor custo.

O problema é que o número de árvores a considerar é enorme: sabemos que o número de árvores rotuladas sobre  $n$  nós é  $n^{n-2}$ . Portanto, para 10 cidades teríamos que olhar para  $10^8$  (cem milhões) de árvores possíveis; para 20 cidades, o número é astronômico (mais de  $10^{20}$ ) (LOVÁSZ; PELIKÁN; VESZTERGOMBI, 2003).

Agora iremos formular o problema do caixeiro viajante. Começando de sua casa, um vendedor deseja visitar cada uma das  $(n - 1)$  cidades e retornar para casa com um custo mínimo. Ele precisa visitar cada uma das cidades pelo menos uma vez e os custos de viagem de uma cidade 'i' até a cidade 'j' são representados pela variável  $c_{ij}$ . Que rota ele deve selecionar?

Iremos formular esse problema como um problema de designação:

$$\text{Minimizar } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot x_{ij} \quad (2.10)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall j \in N. \quad (2.11)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall i \in N. \quad (2.12)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in N. \quad (2.13)$$

As restrições fazem com que o vendedor passe em cada cidade exatamente uma vez. Infelizmente o modelo de designação pode gerar soluções inviáveis. É possível em um problema de 6 cidades, por exemplo, soluções com designações de rotas para o vendedor através de duas circulações separadas de cidades (subtours), ao invés de uma única circulação, veja figura 5. Conseqüentemente, a adição de restrições, que eliminam circulações múltiplas, é necessária. Existem vários métodos de se obter isso. Neste exemplo, para evitarmos soluções com circulações múltiplas da figura 5 podemos incluir a restrição:

$$x_{14} + x_{15} + x_{16} + x_{24} + x_{25} + x_{26} + x_{34} + x_{35} + x_{36} \geq 1. \quad (2.14)$$

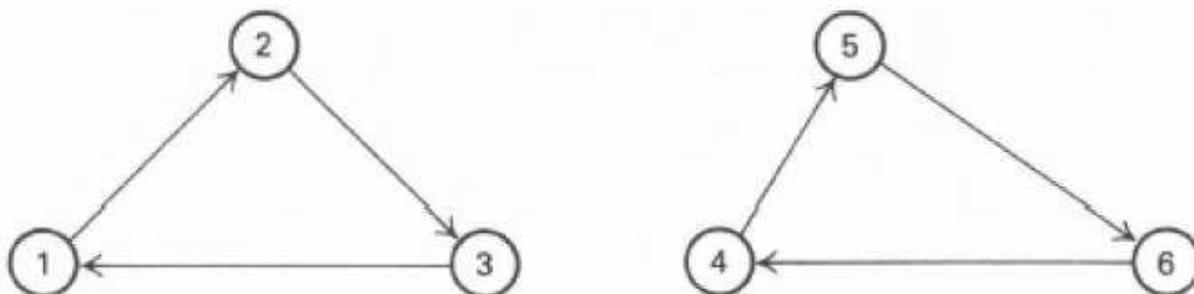


Figura 5: Circulação múltipla para um problema de 6 cidades do caixeiro viajante

Essa desigualdade assegura que, pelo menos uma via do tour, conecte as cidades 1, 2 e 3 com as cidades 4, 5 e 6. Em geral, se uma restrição desse tipo for incluída para cada caminho na qual as cidades podem ser divididas em dois grupos, então qualquer circulação

múltipla pode ser eliminada. O problema com essa abordagem é que, um problema com  $n$  cidades,  $(2^n - 1)$  restrições dessa natureza precisam ser adicionadas, logo a formulação se torna muito extensa para problemas de programação inteira de grande escala. É por essa e outras razões que os problemas do caixeiro viajante são considerados extremamente difíceis quando há muitas cidades (PANAGIOTIS, 2005).

A restrição que evita a formação de subtour pode ser expressa de maneira geral como mostrado a seguir:

$$\sum_{i \in S_t} \sum_{j \in \bar{S}_t} x_{ij} \geq 1 \quad \forall S_t \subset N. \quad (2.15)$$

Onde  $\bar{S}_t = N - |S_t|$  é a cardinalidade de  $S_t$  e  $\chi(S_t)$  é a família de todos os circuitos hamiltonianos do subgrafo induzido  $\langle S_t \rangle$  definido pelo conjunto vertex  $S_t$ .

Seja  $K_t \equiv (S_t, \bar{S}_t)$  o conjunto de arcos  $(i,j)$  com  $i \in S_t$  e  $j \in \bar{S}_t$ .  $K_t$  será referido como sendo um corte de arco do conjunto  $G$ .

A restrição 2.15 expressa o fato que pelo menos um arco no tour do PCV precisa pertencer a qualquer arco de corte do conjunto  $K_t$  de  $G$  (CHRISTOFIDES et al., 1978).

O modelo do caixeiro viajante é usado como um componente central dos modelos de roteamento e agendamento. Podemos ver pela equação 2.10 que ele usa a mesma estrutura para a função objetivo que o modelo de tamanho de frota e roteamento de Dantzig e Fulkerson. Suas restrições, também, são semelhantes, quanto a forma como as variáveis são apresentadas e também a demanda (neste caso a demanda  $b_i$  é fixa ao valor 1). O modelo de Dantzig e Fulkerson pode ser considerado como um problema de múltiplos caixeiro viajantes, e também incorpora a propriedade da ocorrência de subtours. Porém, diferentemente do problema do caixeiro viajante, o modelo de Dantzig-Fulkerson aceita subtours, pois diferentes navios podem trafegar rotas individuais não conectadas entre si.

Uma das primeiras publicações de Ray Fulkerson e uma de suas melhores contribuições foi seu trabalho do problema do caixeiro viajante, na qual o vendedor viajava através das capitais de 48 estados norte-americanos e Washington, DC. Em Dantzig, Fulkerson e Johnson (1954), eles foram capazes de achar uma circulação e estabelecer sua otimalidade, usando o método simplex de Dantzig e técnicas de planos de corte, uma nova técnica desenvolvida, especificamente, para esse propósito. Sua aproximação geral, na qual engendravam a área de poliedros combinatórios, foi altamente inovativa: consideram

um poliedro convexo de pontos inteiros na região viável do que atualmente chamamos de relaxação do programa linear para o PCV. Eles inventaram o que agora é conhecido como restrições para eliminação de circulações múltiplas (ver 2.14), gerando tais restrições apenas quando necessário, a fim de se determinar nas vizinhanças do poliedro convexo uma solução inteira ótima. Note que as restrições para eliminação de circulações múltiplas não eram fortes o suficiente para determinar uma solução inteira ótima para o problema de 49 cidades, então eles usaram outro método, que hoje essencialmente conhecemos como branch-and-bound (BLAND; ORLIN, 2005).

## 2.4 Formulação MIP do problema de tamanho ideal de frota naval e roteamento

Para se melhorar o modelo de tamanho ideal de frota e roteamento, ele foi formulado pelo autor como um MIP, isto é programa inteiro misto. Todas as expressões são lineares, sendo que um subconjunto das variáveis é restrito a valores inteiros e os restantes são variáveis lineares limitadas por fronteiras.

Como no modelo original de Dantzig-Fulkerson, este modelo, também, cresce com o quadrado do número de rotas. Mas como as várias constantes se tornaram variáveis e com a adição de novas variáveis, o modelo é mais complexo, porém é capaz de gerar mais informações que o modelo original.

As variáveis de decisão do modelo de Dantzig-Fulkerson que dão o número de navios que operam na rota 'i' e são designados para a rota 'j' é  $c_{ij} \cdot x_{ij}$ . Nessa formulação, qualquer tentativa de mudar o valor das demandas  $b_i$  para qualquer valor fracionário iria resultar em um  $x_{ij}$  com valor, também, fracionário, o que implica em valores fracionários de navios. Porém ao se colocar valores fracionários às demandas  $b_i$ , podemos formular demandas mais realistas usadas na navegação marítima, tais como viagens semanais ou mensais. Para que a formulação das variáveis de decisão possuam valores inteiros, devemos criar uma nova variável que possua as propriedades das variáveis anteriores. Isso pode ser feito da seguinte maneira:

$$x_{ij} = c_{ij} \cdot x_{ij}', \text{ com } x_{ij} \in \mathbb{N} \quad (2.16)$$

Onde  $x_{ij}'$  são as antigas variáveis do modelo de Dantzig-Fulkerson e  $x_{ij}$  é uma variável natural inteira.

Utilizando 2.16 para substituir as variáveis da função objetivo 2.5, nós podemos escrever uma nova função objetivo:

$$\text{Minimizar } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ij} \quad (2.17)$$

Essa nova função objetivo irá ter valores inteiros, devido à restrição imposta às variáveis  $x_{ij}$  em 2.16. As variáveis nas restrições, também, devem ser convertidas para a nova variável. As variável  $x_{ij}$ ' nas restrições 2.3 e 2.4 foram multiplicadas por  $(1/c_{ij}) \cdot x_{ij}$ . Agora, os custos  $c_{ij}$  podem ter qualquer valor, o que possibilita tempos de viagens mais flexíveis.

Porém, apenas forçar as variáveis  $x_{ij}$  a serem inteiras e custos  $c_{ij}$  de viagem com valores reais, não é suficiente para garantir a viabilidade do modelo. Restrições como  $\sum_{i=1}^n \frac{1}{c_{ij}} x_{ij} = b_i$  não irão se manter verdadeiras, a não ser que  $b_i$  seja um múltiplo de  $c_{ij}$ , o que é altamente improvável de ocorrer. Para sanar esse defeito, as demandas, também, devem ser convertidas em variáveis. As demandas  $b_i$  serão definidas como sendo variáveis reais e precisarão ser limitadas (variáveis canalizadas). O limite inferior de  $b_i$  representa a frequência mínima que a rota 'i' precisa ser servida. Sem um limite inferior, as demandas  $b_i$  seriam zeradas pelo processo de otimização, pois isso possibilita achar zero navios. O limite superior é necessário apenas para limitar o processo de enumeração das rotas possíveis. O limite superior pode ser tão grande quanto se quiser, e aqui será usado como sendo 10 vezes o valor do limite inferior. O valor do limite superior não altera as soluções, desde que haja algum espaço para a demanda achar qual seu valor ótimo. As restrições 2.3 e 2.4 serão atualizadas a seguir:

A restrição que assegura que navios de uma dada rota sejam designados para uma outra rota:

$$\sum_{j=1}^n \frac{1}{c_{ij}} x_{ij} - b_i = 0, \quad i = 1, \dots, n. \quad \text{Sendo } n \text{ a última rota.} \quad (2.18)$$

Restrição que assegura que sempre cheguem navios em qualquer rota na frequência necessária:

$$\sum_{k=1}^n \frac{1}{c_{ki}} x_{ki} - (b_i + e_i) = 0, \quad i = 1, \dots, n. \quad \text{Sendo } n \text{ a última rota.} \quad (2.19)$$

As figuras 6 e 7 são representações esquemáticas do significado da primeira restrição

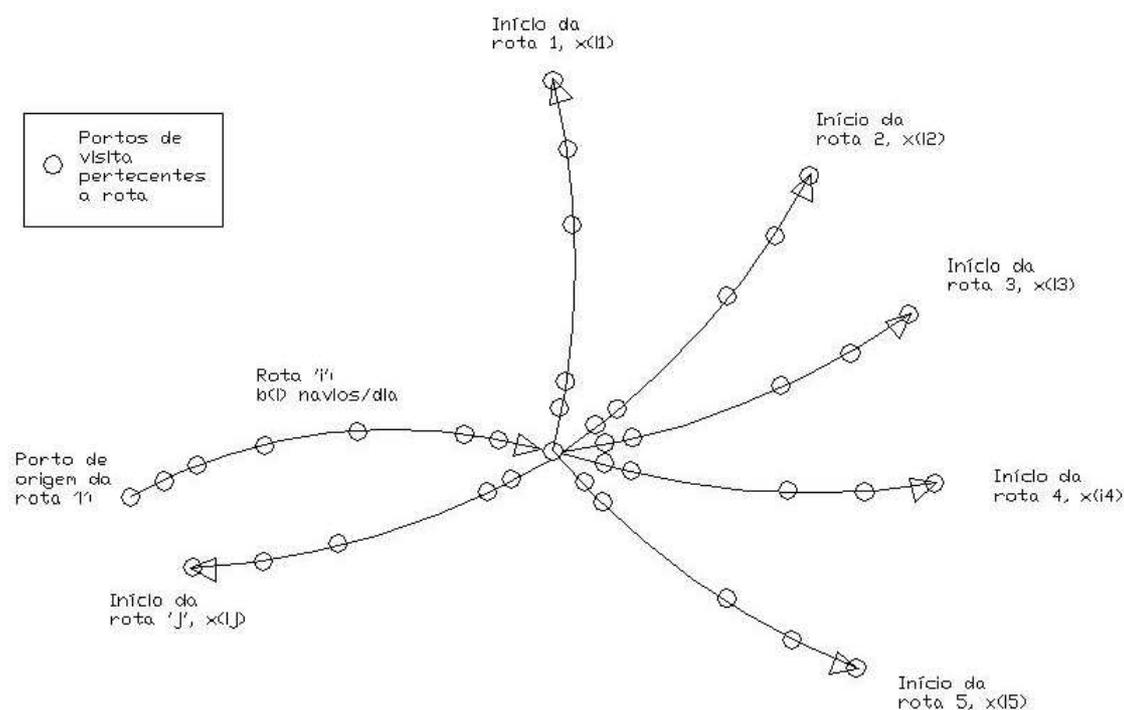


Figura 6: Representação esquemática da restrição que assegura que navios sejam designados para outras rotas após terem completados uma dada rota

2.18, e segunda restrição 2.19 do modelo de tamanho de frota ideal e roteamento.

Uma nova variável  $e_i$  foi criada na restrição de recirculação 2.19, para que ocorra o acoplamento das frequências de navio/dia, dados em  $b_i$  da restrição 2.18. O núcleo de funcionamento deste modelo é a existência do acoplamento das demandas de navios/dia que percorrem a rota 'i' e são designados para a rota 'j', seja igual à frequência de navios que estão chegando para rota 'i'. Em outras palavras, a frequência de navios que chegam em uma rota deve ser igual a frequência de navios necessários para cumpri-la. Ao forçar as variáveis de decisões a serem inteiras, bem como os custos de tempo de viagem  $c_{ij}$ , a serem livres, faz com que as frequências de trânsito dos navios em alguma rota dificilmente seja igual à frequência de navios que chegam em outra rota, mesmo que essa diferença seja mínima. Essas pequenas diferenças irão ser absorvidas pela nova variável  $e_i$ . É importante limitar a variável  $e_i$ , que agora passaremos a nos referir como variável de acoplamento de frequências (variável canalizada). A limitação da variável de acoplamento  $e_i$  é necessária, para que apenas diferenças mínimas entre as frequências de navios por dia que vão e chegam de alguma rota sejam absorvidas.

Um caso especial onde  $e_i$  é igual a zero, é o caso das rotas óbvias, nas quais os navios,

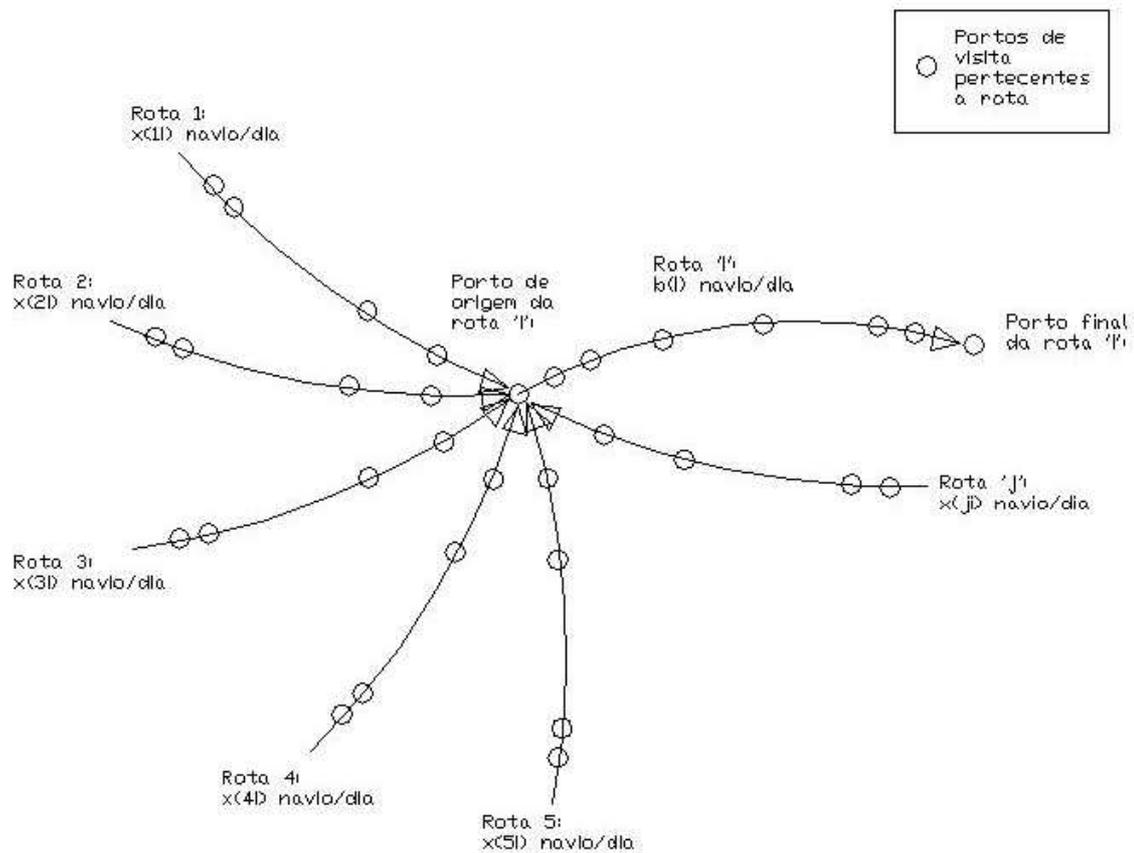


Figura 7: Representação esquemática da restrição que assegura que qualquer rota receba uma frequência de navios que possibilite seu percurso nas frequências dadas por  $b_i$

após completarem suas respectivas rotas, voltam para sua origem. O limite ideal para a variável de acoplamento de frequência,  $e_i$  é não mais que 10 % a 20 % do valor mínimo da variável de frequência,  $b_i$ . Foi escolhido tal limitação de valores para a variável de acoplamento ao perceber que os erros a serem absorvidos são dessa ordem de grandeza. A variável de acoplamento de frequência deve ser uma variável livre, isto é, pode assumir tanto valores positivos quanto negativos. A variável de acoplamento de frequência,  $e_i$  é definida a seguir:

$$-10 \% \cdot b_i \leq e_i \leq 10 \% \cdot b_i \quad (2.20)$$

No negócio marítimo, devido a fatores como mau tempo, correntes marítimas e problemas inerentes ao trabalho, faz com que navios tenham ETA, ou seja, tempo estimado de chegada. Atrasos ou adiantamentos são normais em uma viagem, logo navios chegando com uma frequência menor que a frequência requerida em alguma rota pode ser corrigido apenas ao ajustar a velocidade até que a frequência certa seja alcançada. A

variável  $e_i$  reflete essas situações e possui significado físico. A variável de acoplamento de frequência pode ser usada para estimar qual a velocidade os navios devem ter para um perfeito acoplamento de frequência, se tais embarcações devem aumentar ou diminuir sua marcha. Caso a variável de acoplamento de frequência possua valor positivo, isso indica que estão chegando mais navios que a frequência necessária na rota, e essa velocidade pode ser reduzida para economia de combustível. Caso a variável,  $e_i$  seja negativa, isso indica que a quantidade de navios/dia chegando é menor que a necessária para a rota 'i', e a velocidade precisa ser incrementada para acabar com esse atraso. Esse tipo de cálculo de velocidade é bastante simples e será mostrado e discutido no capítulo IV.

Apesar das variáveis de demanda  $b_i$  e de acoplamento de frequência  $e_i$  não estarem explicitamente na função objetivo, isso não interfere com os resultados gerados (estão na função objetivo com coeficiente igual a zero). Como o objetivo tenta minimizar o número de navios, as variáveis de demanda que são calculadas pelo modelo servem para limitar o número de navios necessários para viajar as rotas designadas.

Um segundo conjunto de restrições foi adicionado ao modelo para que haja uma convergência mais rápida da solução, mas tais restrições funcionam de maneira ambígua. A convergência mais rápida é particularmente verdadeira para problemas de grande porte que possuem grande número de variáveis inteiras ou quando as demandas de frequência são limitadas com altos valores, o que gera um número de navios grandes. Ao adicionar essas restrições extras em problemas de pequenas proporções, o modelo pode precisar de mais iterações para convergir a uma solução. Porém, o uso principal dessas restrições é possibilitar encontrar soluções alternativas para um mesmo problema.

A primeira restrição estabelece uma quantidade máxima de navios para a frota. Ele tem a mesma estrutura que a função objetivo 2.17 e está definida como se segue:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ij} \leq \text{Max. número de navios para a frota} \quad (2.21)$$

A segunda restrição estabelece uma quantidade máxima de navios por rotas. Ela pode ser escrita como se segue:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq \text{Max. número de navios por rota} \quad (2.22)$$

Onde  $i = 1, \dots, n$ . Sendo 'n' a última rota.

O número máximo de navios em cada restrição 2.21 e 2.22 podem ser avaliadas da

solução obtida nas rotas óbvias. Um valor um pouco maior que a solução das rotas óbvias, de 10% a 20% é suficiente para limitar tanto a quantidade de navios por rotas quanto a quantidade máxima de navios da frota.

Com o uso de combinações dessas restrições pode-se achar até 4 soluções alternativas para um mesmo problema. A primeira solução com o modelo sem as restrições 2.21 e 2.22, a segunda solução, usando apenas a restrição 2.21, a terceira, usando apenas a restrição 2.22, e a última solução, alternativa usando ambas.

A formulação completa do modelo, incluindo função objetivo e restrições está escrita abaixo:

$$\text{Minimizar } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ij}$$

Sujeito a:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n \frac{1}{c_{ij}} x_{ij} - b_i &= 0, \quad i = 1, \dots, n. \\ \sum_{k=1}^n \frac{1}{c_{ki}} x_{ki} - (b_i + e_i) &= 0, \quad i = 1, \dots, n. \\ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ij} &\leq \text{Max. número de navios para a frota.} \\ \sum_{j=1}^n x_{ij} &\leq \text{Max. número de navios por rota; } i = 1, \dots, n. \end{aligned} \tag{2.23}$$

Com  $x_{ij} \in \{0, 1, 2, 3, \dots, n\}$ ,  $b_{i\min} \leq b_i \leq b_{i\max}$  e  $-0,1 \cdot b_{i\min} \leq e_i \leq 0,1 \cdot b_{i\min}$ .

O formato da matriz dos coeficientes das variáveis das restrições e função objetivo para um problema de 7 rotas está indicada na figura 8. Na figura 8 podemos distinguir, na primeira linha, a função objetivo 2.17, seguido pelas restrições 2.18, 2.19, 2.21, e 2.22.

A interpretação da solução gerada por este modelo é muito simples e direta. As variáveis  $x_{ij}$  indicam o número de navios necessários para transitar a rota 'i', para então serem direcionados para a rota 'j'. A quantidade de navios dada pelas variáveis  $x_{ij}$  é o que possibilita o cumprimento das demandas de navios por dia de cada rota  $b_i$ .

### 2.4.1 Um pequeno exemplo do uso do modelo do tamanho ideal de frota

Suponha que uma empresa queira saber quantos navios containeres precisa para suprir duas rotas. A primeira rota, rota 1, conecta os portos de Belém, Dakar no Senegal e Santos, enquanto a segunda rota, rota 2, conecta os portos de Santos, Montevideú (Uruguai) e Buenos Aires (Argentina).

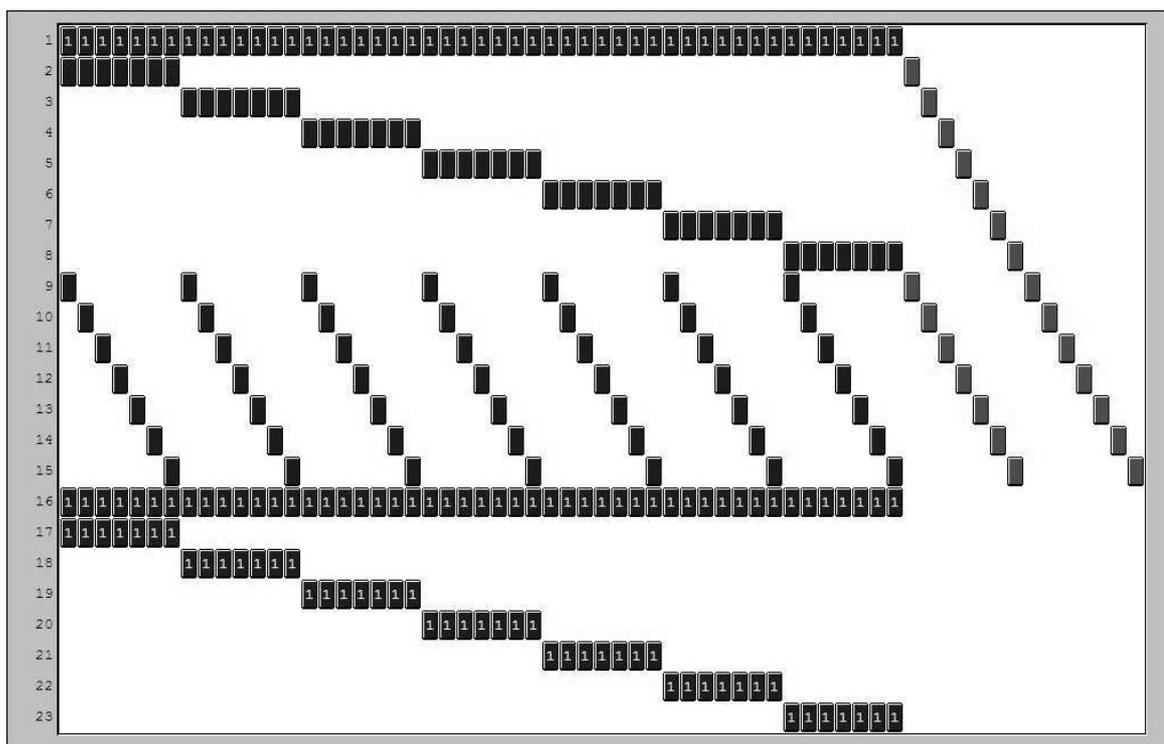


Figura 8: Coeficientes não nulos da matriz restrição e função objetivo para um problema de 7 rotas e 49 variáveis inteiras.

Para a rota 2 existem 2 possibilidades, ou ela retorna para a sua origem ou ela vai para o início da rota 1. No primeiro caso isso já ocorre, pois o porto final da rota 1, Santos é o porto inicial da rota 2. Caso a rota escolhida seja o retorno, os navios devem passar pelo porto de Salvador.

Para a rota 2, caso se faça o retorno para sua origem, o navio deve parar no porto de Rio Grande a fim de prosseguir para Santos. Caso seja escolhida ir para o início da rota 1, o navio deve seguir a seguinte rotação de portos: Rio Grande/Santos/Salvador/Belém.

A tabela 10 descreve os tempos de viagem de cada rota para um navio viajando com velocidade de avanço de 20 nós, já incluídos os tempos de estadia nos portos. Os tempos de estadia nos portos foram considerados como iguais a 1 dia, suficiente para manobras de entrada e saída nos terminais, carregamento e descarga (lembrar que somente deve ser contado uma vez o tempo nos portos).

A rota 1 tem frequência de uso de uma vez a cada 20 dias, ou seja  $1/20$  navios/dias, enquanto a rota 2 tem frequência de uma vez por semana, ou  $1/7$  navios/dias.

Vemos, na tabela 10, que não existem restrições em adicionar portos na viagem de retorno. Essa flexibilidade é muito importante na modelagem de rotas em uso, atualmente.

Tabela 10: Tabela de tempo de viagens nas rotas 1 e 2 do exemplo

Rota	Tempo de viagem//porto (dias)	Retorno	Tempo de viagem//porto (dias)	Tempo total: $c_{ij}$ (dias)
1. Belém/Dakar/Santos	10,3//3	1.Santos/Salvador/Belém	5,4//1	$c_{11} = 19,7$
1. Belém/Dakar/Santos	10,3//3	2.Santos	0,0//0	$c_{12} = 13,3$
2. Santos/Montevidéo/Buenos Aires	2,1//3	1. Buenos Aires/Rio Grande/Santos/Salvador/Belém	7,7//3	$c_{21} = 15,8$
2. Santos/Montevidéo/Buenos Aires	2,1//3	2. Buenos Aires/Rio Grande/Santos	2,3//1	$c_{22} = 8,4$

A estrutura deste problema está disposta a seguir:

$$\text{Minimizar } x_{11} + x_{12} + x_{21} + x_{22} \quad (2.24)$$

Sujeito a:

$$\begin{aligned} \frac{1}{19,7} \cdot x_{11} + \frac{1}{13,3} \cdot x_{12} - b_1 &= 0 \\ \frac{1}{15,8} \cdot x_{21} + \frac{1}{8,4} \cdot x_{22} - b_2 &= 0 \\ \frac{1}{19,7} \cdot x_{11} + \frac{1}{15,8} \cdot x_{21} - b_1 - e_1 &= 0 \\ \frac{1}{13,3} \cdot x_{12} + \frac{1}{8,4} \cdot x_{22} - b_2 - e_2 &= 0 \end{aligned} \quad (2.25)$$

Sendo  $x_{11}$ ,  $x_{12}$ ,  $x_{21}$  e  $x_{22}$  inteiros positivos;  $\frac{1}{20} \leq b_1 \leq 1$ ;  $\frac{1}{7} \leq b_2 \leq 1$ ;  $-0,005 \leq e_1 \leq 0,005$ ;  $-0,01 \leq e_2 \leq 0,01$ .

A solução deste problema está contida na tabela 11. Vemos que, nesse problema, a melhor solução foi o uso das rotas óbvias, ou seja, após completar uma determinada rota, os navios voltam para o início de suas respectivas rotas. Como foi obtido esse tipo de resultado não é necessário usar as restrições extras, 2.21 e 2.22, pois não haverá soluções alterantivas. Essa solução exemplifica bem algo já verificado por armadores. Somente quando há um maior número de rotas, é possível realizar ganho de escala e obter sinergias entre as rotas.

Os valores de  $b_1$  e  $b_2$  podem ser interpretados como sendo que a rota 1 precisa ser servida por um navio a cada 19,7 dias e a rota 2 precisa ter a frequência de um navio a cada 4,2 dias. Vemos que, em ambos, o atendimento das demandas ficou acima do limite

Tabela 11: Solução do exemplo para determinar o roteamento, frequência de tráfego e tamanho da frota homogênea.

Variáveis	$x_{11}$ (navios)	$x_{12}$ (navios)	$x_{21}$ (navios)	$x_{22}$ (navios)
Valor	1	0	2	0
Variáveis	$b_1$ (navios/dia)	$b_2$ (navios/dia)	$e_1$ (navios/dia)	$e_2$ (navios/dia)
Valor	0.05076142	0.2380952	0	0

inferior das variáveis de frequência de trânsito.

## 2.5 Como estimar as velocidades ideais para cada rota?

Estimar as velocidades de avanço ideais para trânsito de cada rota usando as variáveis de acoplamento de frequência, é muito simples. A velocidade de avanço determina o tempo que uma embarcação precisa para completar uma viagem. Devido a uma combinação de fatores físicos e econômicos, os navios, geralmente, operam bem abaixo de suas velocidades ótimas de cruzeiro. Por exemplo, estatísticas mostram que, em 1986, a frota de VLCC's tinha uma velocidade de cruzeiro ótima de 15,5 nós, mas a velocidade real em operação da frota era de cerca 11,9 nós (SOPFORD, 1988).

Os cálculos das estimativas de velocidades ideais estão divididos em duas partes. A primeira parte gera as velocidades ideais que os navios devem ter na viagem para chegar à próxima rota designada sem que haja atrasos ou adiantamentos. A segunda parte dos cálculos obtém a velocidade para transitar toda a viagem, a rota propriamente dita, mais a viagem de ida à próxima rota, a partir das velocidades de base das rotas e as velocidades de retorno encontradas na primeira parte do cálculo. Em ambos os cálculos são usadas simples proporções para se obter os resultados.

Como vimos anteriormente, a variável  $e_i$  foi usada para que ocorra o acoplamento da frequência dos navios que chegam em determinada rota e os navios que trafegam essa rota. Quando a variável  $e_i$  é positiva, ela se soma à variável de frequência de trânsito,  $b_i$ , fazendo que a frequência de chegada de navios a alguma rota seja maior do que a quantidade de navios que deve transitá-la. Assim sendo, pode-se diminuir a velocidade dos navios que usam essa viagem de re-rota para que eles possam chegar na frequência necessária e cumprir a demanda da rota 'i'. O oposto ocorre, caso a variável  $e_i$  seja negativa. Neste caso, a frequência de navios que chegam para transitar a rota é menor que o exigido, logo a velocidade destes navios deve ser elevada para que estes possam

chegar na frequência determinada.

A quantidade de aumento, ou decréscimo, que a velocidade dos navios deve ter, pode ser obtida ao medir a proporção que a variável  $e_i$  tem da frequência de navios/dia da rota 'i',  $b_i$ , e multiplicando essa proporção com a velocidade de base da rota. Chamando  $V_{re-rotas}(i)$  a velocidade ideal que os navios devem ter na viagem de ida para a rota 'i', após completarem-na (os navios completam a rota com a velocidade de base), e  $V_{base}$  a velocidade de base usada para se calcular os tempos de viagem de todas as derrotas. A equação que calcula a velocidade ideal de ida para a nova rota 'i' é:

$$V_{re-rotas}(i) = V_{base} - (e_i/b_i) \cdot V_{base} \quad (2.26)$$

Caso  $e_i$  seja negativo, a proporção irá se somar com a velocidade de base, refletindo o fato que os navios estão atrasados e devem aumentar a velocidade. Se  $e_i$  for positivo, a velocidade de base irá diminuir, pois os navios estão adiantados em relação a chegada na rota 'i' e, dessa forma, pode-se economizar o consumo de combustível.

Porém, essa velocidade somente é válida para as viagens de ida para a próxima rota. Para se calcular as velocidades ideais para a rota toda, basta fazermos uma proporção ponderada das velocidades e distâncias percorridas.

Seja  $D_{leg(i \rightarrow j)}$  a distância do trajeto do porto final da rota 'i' até o início da rota 'j'.  $D_i$  a distância do trajeto da rota 'i'.  $V_{re-rotas}(j)$  a velocidade de ida para a rota 'j', após completar a rota 'i' com a velocidade de base.

A velocidade ideal de trânsito da rota 'i' indo para a rota 'j' é:

$$V_{ideal}(ij) = \frac{D_i \cdot V_{base} + D_{leg(i \rightarrow j)} \cdot V_{re-rotas}(j)}{D_{leg(i \rightarrow j)} + D_i} \quad (2.27)$$

## 2.6 Formulação modificada para incluir o tamanho e composição ideal da frota

Por causa do uso pelas alianças de embarcações de 5000 a 6000+ TEUs (navios pós-Panamax), o número de portos servidos está cada vez sendo reduzidos. Se uma embarcação de 6000+ TEUs precisa ir para seis portos europeus para carregar e descarregar containeres e fica em cada porto por três dias, a eliminação de três portos iria gerar economias em torno de US\$ 200.000,00 a 250.000,00, sem contar com o custo de transporte das cargas

por transshipment.

O número de portos diretos feitos por embarcações pós-Panamax irão ser reduzidos, enquanto os custos adicionais para serviços alimentadores e conexões intermodais forem mais baixos que freqüentar vários portos. Essa tendência leva a uma concentração ainda maior do tráfico portuário em poucos portos. Por exemplo, a Mediterranean Shipping Company usa os portos de Felixtowe (UK) como hub de exportação europeu e o porto da Antuérpia (Bélgica) como hub de importações européias. Ele evita portos adicionais ao empregar sistemas integrados de transporte terrestre e oceânico.

O processo de concentração no transporte marítimo - maiores navios, mais fusões, e mais transshipment, alianças - tem efeitos profundos no desenvolvimento dos portos e também do tamanho e composição da frota. Analistas alertam que os portos serão negativamente afetados por esse desenvolvimento. Em um artigo na Shipping Times, foi dito que um participante de conferência estava 'reclamando' que só sobraram três grandes portos na Europa e América do Norte, e que todos os outros tinham se tornado outports (E.C.L.A.C., 1998).

Maiores navios e mais serviços de transshipment requerem investimentos adicionais nos portos e, também, na composição ideal da frota de navios. Isso porque alguns navios que fazem serviços alimentadores não fazem rotas de longo curso.

### **Como fazer com que as restrições incorporem diferentes navios?**

No modelo apresentado nesta dissertação, o tamanho da frota está ligado com uma quantidade de navios que deve suprir uma demanda de viagens por rota. Então para incorporarmos a composição de navios diferentes devemos quebrar a simetria das restrições 2.18 e 2.19, isto é, a simetria das rotas.

No problema exemplo deste capítulo, na figura 1, vemos que existe a possibilidade de qualquer navio terminar uma rota e ir para qualquer outra. Porém, em um problema que incorpore navios de diferentes tamanhos que podem fazer: ou o transporte de longo curso ou serviço alimentadores, suas rotas devem ser separadas e somente conectadas no porto que serve de *hub*. Logo as rotas dos serviços alimentadores não podem levar a rotas de longo curso. Dessa forma, ao quebrar a simetria de ligação das rotas, quando o problema for resolvido, obteremos a solução da frota ideal com uma composição homogênea múltipla de navios, uma parte da frota sendo de navios de longo curso e a outra de navios menores em rotas alimentadores.

A figura 9 exemplifica um sistema onde há uma separação completa de três rotas,

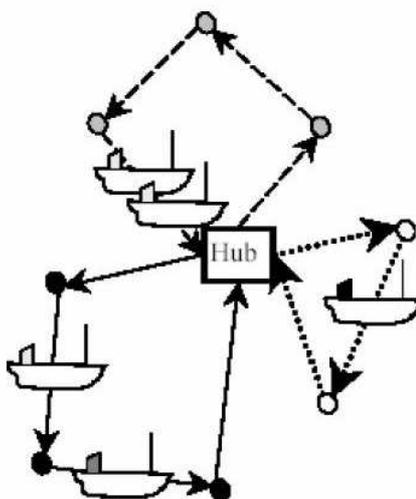


Figura 9: Esquema de um sistema de rotas independentes conectados por um hub.

conectadas por um porto hub. Os navios que trafegam na rota dos portos pretos não podem navegar em rotas das outras duas redes (portos brancos e cinzas). E essa separação é recíproca para as outras duas rotas. Apesar da figura 9 apenas conter um porto hub, poder-se-ia construir sistemas com vários portos hubs e várias rotas independentes para diferentes tipos de navios.

Veja na tabela 12 as vantagens do modelo proposto nesta dissertação com o modelo criado por Dantzig e Fulkerson.

## 2.7 Algoritmos e dificuldade computacional

Programas lineares inteiros (IP) podem ser muito difíceis de serem resolvidos. Isso é uma diferença contrastante com problemas LP. O tempo para solucionar um problema LP é razoavelmente previsível. Para um problema LP, o tempo para alcançar a solução cresce aproximadamente com o número de variáveis e com o quadrado do número das restrições. Para certos problemas IP, o tempo pode de fato decrescer com a adição de restrições. Isso foi confirmado em algumas simulações pelo modelo proposto de tamanho ideal de frota e roteamento marítimo, casos onde existem soluções com um número muito grande de navios, isto é, quando a frequência da demanda de navios/dia é muito alta, ou para problemas com muitas rotas. Caso o número de variáveis inteiras cresça muito, o tempo de solução irá crescer, dramaticamente. O modelo proposto pertence a uma classe de problemas conhecida como *NP-hard*, com NP significando 'não polinomial' (SCHRAGE,

Tabela 12: Comparação das características do modelo proposto de tamanho ótimo de frota e roteamento com o modelo de Dantzig-Fulkerson.

	Modelo Proposto	Modelo de Dantzig-Fulkerson
Tipo de formulação	MIP	PL
Função Objetivo	Minimizar n <sup>o</sup> de navios	Minimizar n <sup>o</sup> de navios
Variáveis de decisão, $x_{ij}$	Inteiras	Reais, mas assumem valores inteiros
Unidade das variáveis, $x_{ij}$	Navio	Navio/dia
Tempo de viagem	Flexível	Valores inteiros
Frequência das rotas, $b_i$	Variáveis reais (determina valor ótimo)	Coefficientes constantes com valores inteiros
Construção das rotas	Admissível portos intermediários	Sem portos intermediários
Velocidade dos navios	Estima velocidade ótima (variável $e_i$ )	Velocidade constante
Tipo de frota	Possível homogênea múltipla	Homogênea
Soluções alternativas	Possível (usando restrições extras)	Possível (usando restrições extras)

2003).

Existem duas formas gerais de resolver otimamente problemas IPs: métodos de 'planos de corte' e métodos de '*branch-and-bound*' (B&B), ambas utilizadas pelo LINGO.

O método B&B primeiro resolve o problema como um LP. Se a solução LP for inteira nas variáveis inteiras, então não é necessário fazer mais nada. Caso contrário, B&B utiliza uma procura inteligente de todas as possíveis variáveis fracionárias transformando-as para todos os possíveis valores inteiros. Cada subproblema criado corresponde com um ramo (branch) de uma árvore enumerada. A árvore pode ser criada de acordo com os seguintes dois graus de liberdade:

- A escolha do próximo nó a ser examinado, e
- A escolha de como será escolhido a divisão do nó em dois ou mais sub-nós.

As soluções LP dos subproblemas são usadas como fronteiras (bound) para limitar a busca. Se as fronteiras são pobres, muitos nós na árvore poderão ser examinados porque, apesar do nó parecer promissor, de fato, tais nós não geram bons resultados (SCHRAGE, 2003).

Métodos de planos de corte consiste em adicionar uma nova restrição ao programa linear. Essa restrição adicional deve 'cortar' a solução ótima atual não inteira do PL

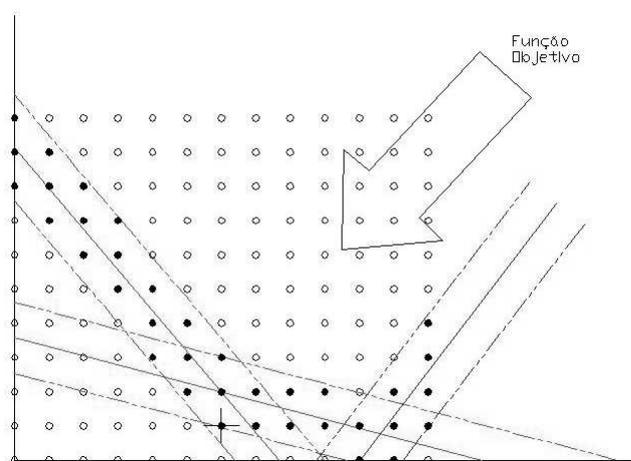


Figura 10: Esquema didático de um poliedro criado pelas restrições do modelo proposto para acomodar as soluções viáveis com valores inteiros.

sem eliminar alguma solução inteira viável. A nova solução deverá ser inteira ou não. O procedimento de adicionar restrições é repetida até que todas as soluções sejam inteiras ou ocorra inviabilidade (BAZARAA; JARVIS; SHERALI, 2005).

Para uma introdução a Programação Inteira, veja Maculan e Fampa (2004). Para um aprofundamento nas técnicas de B&B e planos de corte veja Garfinkel e Nemhauser (1972).

Como dito anteriormente, o modelo de Dantzig-Fulkerson sempre possui uma solução viável que nomeamos como sendo 'rotas óbvias'. O modelo de tamanho ideal de frota e roteamento herdou essa propriedade do modelo de Dantzig-Fulkerson e sempre possui solução viável na forma das 'rotas óbvias'. A interpretação geométrica das rotas óbvias no modelo de tamanho ideal da frota é que os hiperplanos que formam o poliedro podem se mover um pouco, devido à liberdade dada pelas variáveis  $b_i$  e  $e_i$ , para acomodar soluções inteiras. Isso é mostrado na figura 10 em exemplo bidimensional.

As soluções encontradas, neste modelo, mostraram a robustez esperada. Ao se mudar os custos de tempo de viagem levemente (os tempos de viagem,  $\frac{1}{c_{ij}}$ , foram alterados de 7 casas decimais para 5 casas decimais) não houve mudança no número de navios necessários. Um aspecto importante do modelo é que ao detalhar as informações dos custos de tempo de viagem com valores com muitas casas decimais aumenta o número de iterações necessárias para se alcançar a solução. Por exemplo, em uma viagem que leva 7 dias para se completar o arco 'ij', ao se introduzir nas restrições o valor:  $0,1428571428285714 \cdot x_{ij}$ , ou seja,  $\frac{1}{7} \cdot x_{ij}$  com 16 casas decimais, haverá mais iterações do que o mesmo problema usando 7 casas

decimais tal como  $0,1428571 \cdot x_{ij}$ . A perda de informação nessa simplificação é desprezível. Ver o modelo com os custos de tempo de viagem com 7 casas decimais no Apêndice D.

## 3 Coleta de dados

*“Conte o que é contável, meça o que é mensurável, e o que não é mensurável, torne-o mensurável.”*

*Galileo Galilei*

### 3.1 Rotas, portos e histórico da Y.S. Line

Como qualquer operadora liner, devido ao ambiente altamente competitivo, para continuar sendo competitiva, Y.S. Line teve a necessidade de investir em serviços de alta qualidade com baixo custo, equipamentos mais modernos (containeres reefer, guindastes maiores em terminais, etc) e navios mais eficientes (maiores e mais caros). A evolução da frota da Y.S. Line está mostrada na tabela 13.

Tabela 13: Evolução da frota e capacidade em TEU da Y.S Line

	1977	1980
Número de navios	9	11
Capacidade Total (TEU)	9.115	11.222
Capacidade Media do tamanho dos navios (TEU)	1.225	1.261

As possibilidades de crescimento disponível para uma empresa, simultaneamente, expandir serviços e adquirir navios mais eficientes, permitindo à empresa benefícios de economia de escala e ampliação do espectro de negócios, oferecendo serviços globais e redução dos custos operacionais, minimizar riscos financeiros - reduzir investimentos individuais de capital em embarcações, terminais, equipamentos, etc; e reduzir custos gerais - ganhar acima do custo do capital, permitindo competir com sucesso com transportadores de baixo custo, cujos serviços foram melhorados, estão contidas na tabela 14. O caminho escolhido pela Y.S. Line está traçado a seguir (extraído dos sites [www.mol.co.jp](http://www.mol.co.jp) e [www.business.com](http://www.business.com)):

**1964** A indústria de transporte marítima do Japão entra em uma fase de grande con-

Tabela 14: Resumo das escolhas estratégicas para companhias liners

Serviço oferecido	Estratégia de competição	Opção de crescimento
Serviço Global	1. Liderança de custos (menor preço). 2. Diferenciação (serviços com maior valor agregado).	(a) Acordos de uso compartilhado de malha marítima. (b) Alianças Estratégicas Globais. (c) Fusões/aquisições. (d) Crescimento interno.

solidação, criando: Mitsui O.S.K. Lines, Ltd. (MOL), Japan Line, Ltd. (JL), e Yamashita-Shinnihon Steamship Co., Ltd. (YSL) através de fusões.

**1968** Navios containers, operando pelas três maiores empresas de transporte marítimo, começam a operar na rota Japão-Califórnia – MOL's America Maru, JL's Japan Ace, and YS Line's Kashuu Maru.

**1988** É inaugurada a Nihon Liner System, através das operações liner da Japan Line e Y.S. Line.

**1989** Navix Line é estabelecida como resultado da aquisição da J.L., pela Y.S.Line.

**1995** The Global Alliance lança serviços nas rotas da Europa e América do Norte para o Extremo Oriente.

**1998** Começa o serviço The New World Alliance.

**1999** A nova Mitsui O.S.K. Lines é estabelecida através da fusão da MOL e Navix Line.

Obs.: Mitsui O.S.K. Lines é membro de ambas as alianças: The Global Alliance e The New World Alliance.

A Y.S. Line seguiu todas as possibilidades dadas pela tabela 14 para se manter no mercado, como pudemos ver em sua trajetória histórica. Para um melhor entendimento sobre a consolidação da indústria marítima e a importância de economia de escala nesse setor leia a tese de Kare V. Gregory (2000). Neste trabalho, ela relaciona a importância do ganho de escala com o aumento das fusões das companhias e o aparecimento das alianças globais, no período da década de 70 até o ano 2000.

A seguir iremos descrever as rotas, portos e navios utilizados pela Yamashita-Shinnihon Line. As informações sobre as rotas foram extraídas do caderno de serviços de container oferecidas, pela companhia, em julho de 1981 (YAMASHITA-SHINNIHON-STEAMSHIP-CO., 1981).

### 3.1.1 Rota do Sudoeste do Pacífico (rota da Califórnia)

Inaugurado em outubro de 1968 e em setembro de 1979, foi estendido, para também visitar a Coreia do Sul.

Essa rota liga os portos de Busan, Kobe, Nagoya, Shiizu e Tóquio com Los Angeles (Long Beach) e Oakland. Os navios containers viajam do Japão, uma vez a cada 4 dias, e vão para Busan, uma vez a cada 7 dias. Navios que viajam para a Coreia do Sul vão diretamente para Busan e depois de desembarcarem sua carga em Tóquio, fazem sua segunda chamada ou em Kobe, Nagoya, Shimizu ou Tóquio, enquanto os navios que viajam entre o Japão e a Califórnia, fazem de Kobe seu porto de origem e Tóquio seu último porto.

Navios que saem do Japão precisam de, aproximadamente, 10 dias para alcançar Los Angeles e navios, voltando de Oakland para o Japão, precisam de, aproximadamente, 11 dias para retornar ao Japão.

Atualmente, oito navios containers servem esta rota; 4 deles vão e voltam do Japão à Califórnia e os quatro restantes viajam entre Busan, Japão e Califórnia. Além disso, Y.S. Line tem acordos de compartilhamento de espaço de carga com a Japan Line, K line e Mitsui O.S.K. lines. Detalhes estão na tabela 15.

Tabela 15: Navios da rota da Califórnia

Nome do navio	Kashu Maru	Yamashin Maru	Japan Ace	Pacific Arrow	Golden Gate Bridge	Queen's way Bridge	Asia Maru	America Maru
Operador	Y.S. Line	Y.S. Line	Japan Line	Japan Line	K Line	K Line	Mitsui O.S.K Lines	Mitsui O.S.K Lines
Capacidade em TEU	794	1,198	818	1,441	792	1,411	1,164	791
Número de tomadas para unidades Reefer	103	126	102	110	116	122	164	106
Construído	1968	1974	1968	1973	1970	1972	1971	1968

### 3.1.2 Rota do Noroeste do Pacífico

Navios containers viajam uma vez a cada 5 dias nessa rota, que conecta ou Kobe, Nagoya, Shimizu, Tóquio ou Yokohama com os portos de Seattle, Vancouver B.C. e

Portland na costa noroeste da América do Norte. Y.S. Line oferecem serviços extras através de serviços de espaços compartilhados feitos com contratos com a Japan Line, K Line, Mitsue O.S.K Lines, NYK Line e Showa Line.

A viagem do Japão até Seattle leva aproximadamente 9 dias, enquanto as viagens de volta de Portland para os portos do Japão demoram cerca de 10 dias. Essa é servida por 6 navios containers, os detalhes estão dados na tabela 16.

Tabela 16: Navios da rota da Noroeste do Pacífico

Nome do navio	Beishu Maru	Japan Applo	Hotaka Mauru	Alaska Maru	Lions Gate Brodge	Hikawa Maru
Operador	Y.S. Line	Japan Line	NYK / Showa Line	Mitsui O.S.K Lines	K Line	NYK / Showa Line
Capacidade em TEU	1,187	1,197	977	1,183	1,441	1,277
Número de tomadas para unidades Reefer	180	206	148	150	141	156
Construído	1970	1980	1970	1973	1974	1974

### 3.1.3 Rota de Nova York

Navios containers viajam nessa rota uma vez por semana, ligando o Japão com portos da costa atlântica da América do Norte. Os portos de chamada são os seguintes:

**Japão** Tóquio, Nagoya, Kobe.

**Costa Atlântica** Nova York (uma vez por semana), Savannah (aproximadamente uma vez por semana, com uma parada em outro porto, durante a viagem), St. John (aproximadamente uma vez por semana), Baltimore (aproximadamente uma vez a cada duas semanas), Philadelphia, Norfolk (aproximadamente uma vez a cada 4 semanas), Boston (uma vez por mês), Jacksonville (uma ou duas vezes a cada dois meses).

Cada navio que serve nessa rota pára em 3 a 5 portos da costa leste citados acima. Viagens do Japão para a Costa leste Norte Americana levam 18 dias, e as viagens de retorno levam, aproximadamente, 19 dias dependendo dos portos de chamada. Além

disso, a Y.S. tem contratos de compartilhamento de espaço nas embarcações da Japan Line, K Line, Mitsui O.S.K. Lines e NYL Line. Juntos, 8 navios containers servem essa rota. Detalhes na tabela 17.

Tabela 17: Navios da rota de Nova York

Nome do navio	Tohgei Maru	Yashima Maru	Japan Ambrose	Verrazano Bridge	New York Bridge Maru	New Jersey Bridge Maru	Korobe Maru	Kiso Maru
Operador	Y.S. Line	Y.S. Line/ K Line/ Japan Line	Japan Line	K Line	Mitsui O.S.K Lines	Mitsui O.S.K Lines	Mitsui/NYK	Mitsui/NYK
Capacidade em TEU	1,728	1,730	1,569	1,908	1,884	1,887	1,826	1,826
Número de tomadas para unidades Reefer	100	100	114	118	78	78	150	150
Construído	1972	1976	1972	1973	1972	1973	1972	1973

### 3.1.4 Rota da Austrália

A rota do Japão/Austrália foi containerizada em 1969. Cinco embarcações de carga geral do tipo LO/LO (Lift on/Lift off) e 4 navios RO/RO (Roll On/Roll Off) oferecem serviços uma vez a cada 4 dias entre Yokkaichi, Nagoya, Yokohama e Osaka no Japão, e Sydney, Melbourne e Brisbane no sudeste da Austrália. Y.S. Line formou um grupo de LO/LO com a Mitsui O.S.K. Lines, NYK Line e Austrália-Japan Container Line, e um grupo de RO/RO com a Mitsui O.S.K. Lines, NYS Line, K Line e Austrália-Japan Container Line. Em ambos os grupos, as companhias membros têm acordos de compartilhamento de espaço mútuo.

As viagens entre Osaka e Sydney levam, aproximadamente, 10 dias, e as viagens dos navios que vão de Brisbane a Yokkaichi levam cerca de 9 dias. Detalhes de cada navio, servindo essa rota, estão disponíveis nas tabelas 18 e 19.

#### Serviço Coreia do Sul - Austrália

Em dezembro de 1979, foi iniciado um link direto entre a Coreia do Sul e a Austrália, na qual navios viajam de Busan com frequência aproximada de 3 vezes por mês, ou uma

Tabela 18: Navios LO/LO da rota da Austrália

Navios LO/LO					
Nome do navio	Nichigoh Maru	Canberra Maru	Hakuba Maru	Arafusa	Ariake
Operador	Y.S. Line/ NYK/Mitsui O.S.K. Lines	Mitsui O.S.K. Lines	NYK	Australian National Line	Australian National Line
Capacidade em TEU	1,588	1,570	1,584	1,200	1,748
Número de tomadas para unidades Reefer	584	602	586	380	628
Construído	1980	1979	1980	1970	1976

vez, a cada 10 dias. Além desse serviço, é oferecido um serviço de transshipment através de Osaka.

#### Serviço alimentador China - Austrália

Para suprir a expansão do volume de comércio internacional da China, a Y.S. Line começou um serviço, em 1980, que liga China e Austrália, com frequência de uma vez, a cada 30 dias. Usando navios containers próprios bem como navios de carga geral, pode ser providenciado um transporte seguro e confiável para todas as cargas. Dependendo do porto de destino na China, o transporte direto pode estar indisponível. Veja detalhes nas rotas Japão/China.

Tabela 19: Navios RO/RO da rota da Austrália

Navios RO/RO				
Nome do navio	Hyogo Maru	Australian Searoader	Australian Emblem	Australian Escort
Operador	Y.S. Line/ NYK/Mitsui O.S.K. Lines	K Lines	Australian National Line	Australian National Line
Capacidade em TEU	675	647	1,421	1,421
Número de tomadas para unidades Reefer	137	135	432	432
Construído	1973	1969	1975	1975

### 3.1.5 Rota Austrália/Extremo Oriente

Em julho de 1980, Y.S. Line junto com quatro companhias marítimas - a Austrália National Line (ANL), Ásia Austrália Express Line (AAE), Orient Overseas Container Line (OOCL) e Austrália West Pacific Line (AWPL) - estabeleceram uma rota direta servida por navios containers entre 4 portos no Extremo Oriente (Manila, Keelung, Kaoshiung e Hong Kong) com Sydney, Melbourne e Brisbane.

As viagens têm frequência de uma vez a cada 10 dias ou três vezes por mês, e os navios, servindo nessa rota, são todos navios containers com capacidade de 1000 TEU.

Veja a tabela 20 para detalhes em relação aos navios. Ocasionalmente, navios de carga geral servem nesta rota.

Tabela 20: Navios da rota da Austrália/Extremo Oriente

Nome do navio	Asian Pearl	Asian Jade	Oriental Ambassador	Oriental Expert
Operador	AAE	AAE	OOCL	OOCL
Capacidade em TEU	1,004	1,004	1,004	1,004

### 3.1.6 Rota do Oriente Médio e Golfo

O serviço foi iniciado em Novembro de 1979 e, desde então, a frota foi melhorada para melhor servi-la. Os navios viajam uma vez a cada 9 dias para ligar Kobe, Nagoya, Yokohama e Tóquio com os portos do Oriente Médio e região do Golfo (Dubai, Dammam, Kuwait, Umm Qasr, Bandar Khomeini).

São necessários 16 dias para ir do Japão a Dubai e cerca de 14 dias para a viagem de retorno, geralmente, com navios em lastro e sem carga.

Juntamente com outras 5 companhias, K Line, Mitsui O.S.K. Lines, NYK Line, Showa Line, e Overseas Containers, Ltd (O.C.L.), Y.S. Line ajuda a servir essa rota com um sistema de compartilhamento de carga, onde os cinco navios estão descritos na tabela 21.

### 3.1.7 A rota da China

O transporte de carga geral entre o Japão e China é baseado em acordos entre empresas de transporte de cada país.

Tabela 21: Navios da rota do Oriente Médio e Golfo

Nome do navio	Tohgo Maru	Australia Maru	Hakozaki Maru	Kazukawa Maru	Strathconon
Operador	Y.S. Line/	Mitsui NYK/ Mitsui O.S.K. Lines	NYK O.S.K. Lines	K Line/ Showa Line	OCL
Capacidade em TEU	1,262	1,244	1,247	1,164	1,106
Número de tomadas para unidades Reefer	50	50	50	50	50
Construído	1970	1969	1969	1970	1978

O presente estado de containerização na China, incluindo terminais e sistemas de transporte terrestre, ainda estão em fase de planejamento. Em resposta às necessidades de transporte por container da rota Japão/China, Y.S. Line designou o navio semi-container "Kaizen" (2.924 DWT com capacidade de 104 TEU) para seguir a seguinte rota:

Yokohama, Osaka  $\Rightarrow$  Dalian  $\Rightarrow$  Xingang  $\Rightarrow$  Yokohama, Osaka  $\rightarrow$  Shanghai  $\rightarrow$  Yokohama, Osaka.

Legenda:  $\Rightarrow$  aproximadamente, a cada 25 dias.  $\rightarrow$  aproximadamente, a cada 20 dias.

O serviço convencional, que usa Yokohama, Nagoya, Yokkaichi e Osaka como portos principais no Japão, envia para Tiajing, Dalian, Qingdao, Shanghai e Huangpu com freqüência de uma vez por mês.

### 3.1.8 Serviço de Container Trans-Siberiano

Esse serviço, que é operado pelo lado japonês (Y.S. Line e Iino Kaiun) e pelo lado Soviético (v/o "Sojuztransit" e Far Eastern Shipping Company), liga os portos do Japão com Nakhodka e Vostochny em cerca de 2.5 dias. Essa rota envolve, principalmente, o transporte marítimo entre os portos japoneses e soviéticos e lida com as importações/exportações de comércio entre o Japão e União Soviética, com a carga, podendo ser transportada para a Europa, via Sibéria.

No Japão os maiores portos principais são Yokohama e Kobe, mas em resposta à demanda de embarcadores, pode-se carregar em Nagoya, Shimizu, Moji, Tomakomai e Niigata. Oito navios full-containers, 4 japoneses e 4 soviéticos são necessários para providenciar 24 viagens por mês, nessa rota. Ver tabela 22.

Tabela 22: Navios da rota Trans-Siberiano

Nome do navio	Siberia Maru	Primorye Maru	Kyokuto Maru	Aurora Maru
Operador	Y.S. Line/ IINO Line	Y.S. Line/ IINO Line	Y.S. Line/ IINO Line	Y.S. Line/ IINO Line
Capacidade em TEU	322	423	445	500
Construído	1975	1977	1978	1980

### 3.1.9 Serviços Alimentadores do Extremo Oriente e Sudeste Asiático

Para cargas sendo transportadas para os países do Extremo Oriente e Sudeste Asiático por uma via e América do Norte por outra via, Y.S. Line providencia um transporte porta a porta através de seu sistema alimentador. Como foi mostrado no mapa da figura 11, a rede de serviço alimentador da Y.S. Line cobre 9 países no Extremo Oriente e Sudeste Asiático e em cada rota alimentadora, Y.S. Line estabeleceu a reputação de um serviço rápido.

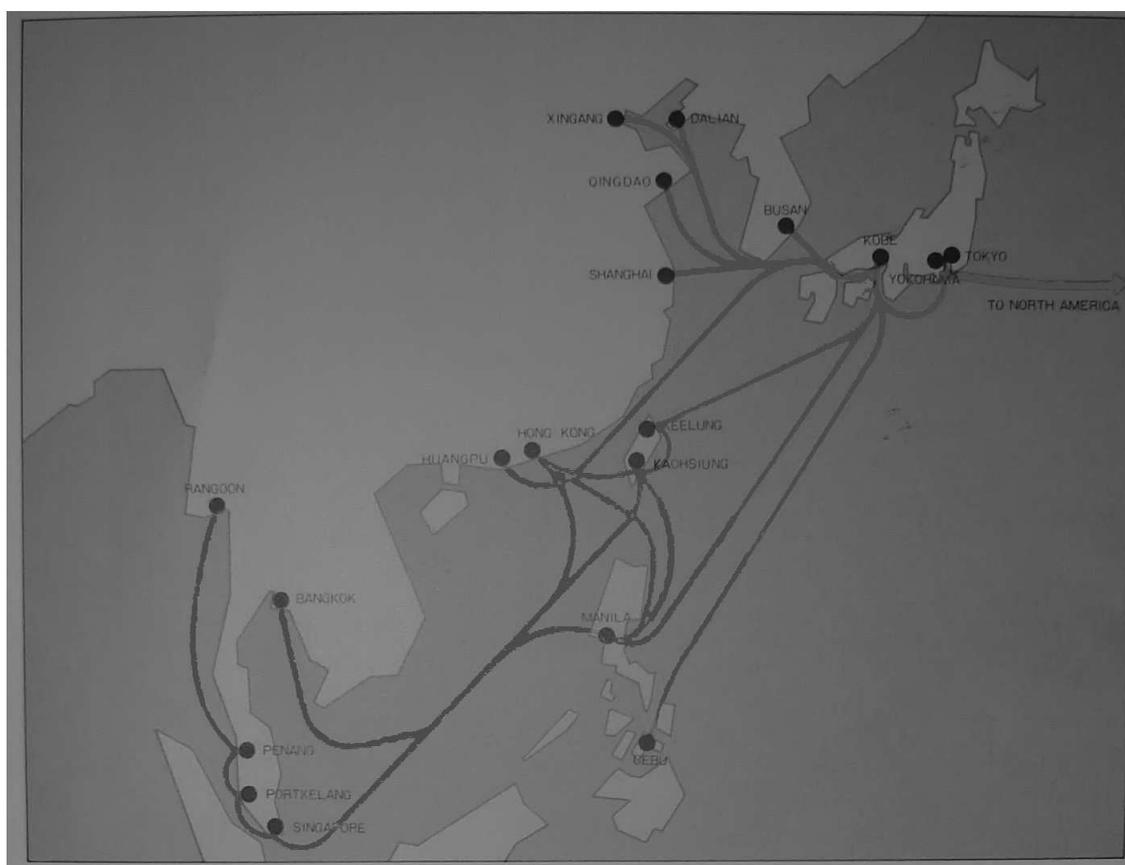


Figura 11: Rotas de alimentação do sudeste asiático

As rotas utilizadas no serviço alimentador estão dispostas na tabela 23.

Tabela 23: Descrição das rotas do sistema de serviço alimentador do sudeste asiático.

Rota	Frequência de serviços	Rotação/Portos de chamada
Korea Route	Diariamente	Kobe/Busan/Kobe
Taiwan/Hong Kong route	A cada 6 dias	Tokyo/Kobe/Keelung/ Hong Kong/Kaohsiung/Keelung/Tokyo
Manila Route	Semanalmente	Tokyo/ Kobe/Hong Kong/ Manila/Tokyo
Straits Route	Semanalmente	Tokyo/Kobe/Singapore/Port Kelang/ Penang/Sigapore/Tokyo
Cebu Route	Semanalmente	Kobe/ Cebu/ Kobe
Bangkok Route	A cada 4 dias	Yokohama ou Tokyo/Kobe/ Bangkok/Yokohama ou Tokyo
China Route	Mensalmente	Osaka ou Kobe/Shanghai/Xingang/ Qingdao/Dalian

### 3.1.10 Serviço de Container de Porto Rico

De acordo com a conclusão do acordo de conexão de transporte com Puerto Rico Maritime Shipping Authority e a Trailer Marine Transport Corp., Y.S. Line começou o serviço de transporte entre o Japão e Porto Rico em 1976. Esse serviço transporta carga do Japão/Porto Rico em, aproximadamente, 30 dias e usa os portos de Baltimore e Jacksonville, como portos de conexão (ver figura 12).

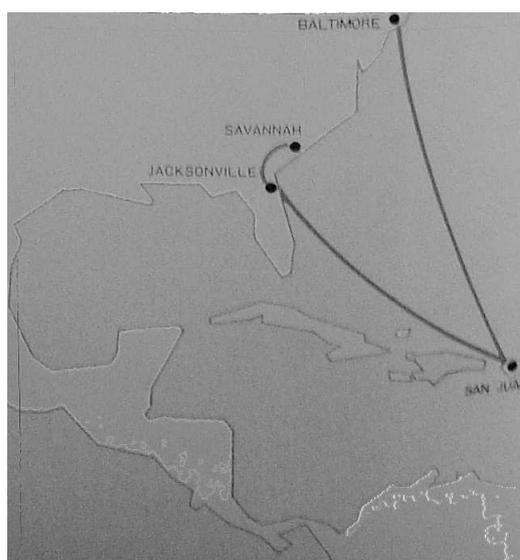


Figura 12: Rota de Porto Rico

## 3.2 Criação dos dados do modelo baseadas em rotas da Y.S. Line

Primeiramente, devemos informar que os dados contidos nesta seção não são um espelho perfeito das rotas da Y.S. Line mostradas na seção anterior. Muitos fatores contribuíram para que isso ocorresse, e para citar os mais importantes:

1. Na época em que as rotas estavam sendo construídas, não se sabia se o modelo funcionaria conforme o esperado, então foi estipulada a simplificação das rotas baseadas nas rotas da Y.S. Line (ver apêndices B e C).
2. O programa usado para solucionar o problema baseado no modelo de tamanho de frota e designação de rotas foi o LINGO estudantil - versão 9.0. Tal programa possui limitações para a resolução de problemas, no que concerne à quantidade de variáveis e restrições. Esta versão do LINGO consegue resolver problemas com, no máximo, 50 variáveis inteiras e 250 restrições.
3. Não houve tempo hábil para levantar e localizar dados sobre a eficiência dos portos e tempo médio de operações de carregamento/descarga consumido pelos navios.

Para otimizar a frota da Y.S. Line seria necessário a fabricação de uma quantidade de rotas que iria superar, em muito, a capacidade de solução do LINGO. Então foram criadas rotas baseadas nas rotas da Y.S. Line, seguindo as considerações:

1. Todas as rotas serão transitadas por navios que viajam em velocidade de cruzeiro de 15 nós. Como foi dito no capítulo 1, empresas liners empregam velocidade em torno de 20-25 nós. A redução da velocidade irá mostrar melhor a otimização do tamanho da frota, ao possibilitar uma visão ampliada da redução da quantidade de navios necessários e comprovar a qualidade do modelo.
2. Os portos das rotas são visitados uma única vez, durante seu percurso e os navios são designados diretamente para o início de outra rota, sem passar em mais nenhum outro porto.
3. A frequência de visitas em alguns portos foi alterada, para reduzir o número de rotas necessárias para sua modelagem.
4. O tempo consumido em cada porto, para carregamento e desembarque da carga, entrada e saída nos terminais, será de um dia para qualquer porto.

Com as simplificações e considerações citadas, foram construídas 16 rotas. Logo, devido à propriedade do modelo de tamanho de frota e designação de rotas, foram geradas 256 variáveis inteiras. Devido à limitação de variáveis do LINGO, para utilizar todos os dados construídos foram criados 3 problemas que utilizam as rotas, que serão descritos no final desta seção.

A notação usada para descrever as variáveis é a seguinte:  $c_i p_j$  que significa o tempo de viagem ao percorrer a rota 'i' e ir para o início da rota 'j'.

A seguir, iremos descrever os custos de tempo de viagem do modelo que representam as rotas e os portos de visita de cada rota. As rotas foram criadas com o programa com base em cartas piloto, Visual Passage Planner versão 2.0. Ele permite a criação de rotas ortodrômicas e mostra as principais características das correntes oceânicas e outros elementos importantes que devem ser considerados na navegação marítima. Para uma visão mais detalhada de como os custos de tempo de viagem foram criados e as características de cada rota, veja os apêndices B e C.

### 3.2.1 Rota 1.1: Rota do Sudoeste do Pacífico (rota da Califórnia)

Rota1.1: Kobe ou Nagoya ou Shimizu ou Tóquio → Oakland → Los Angeles.

Frequência de percurso da rota: uma vez a cada 4 dias.

A rota completa está separada em dois componentes. A primeira parte mostra as características da rota em si e a segunda mostra a viagem em lastro do navio para início da próxima rota.

Para que a rota seja flexível o suficiente para poder começar de qualquer porto inicial (Kobe, Nagoya, Shimizu, Tóquio), a composição das variáveis de custo foi feita para o pior caso, isto é, o caso no qual o tempo de viagem é maior. Com isso se possibilita que, durante o percurso da rota, qualquer um dos portos iniciais possa ser usado. As diferenças de tempo entre os portos são desprezíveis em relação à duração total da viagem e não influem nos resultados. O mesmo procedimento é usado para obter o tempo de viagem de qual será o porto, dentre muitos portos iniciais, designado para a próxima rota. Os custos das demais rotas foram montados como explicado acima.

A rota 1.1, passando por Kobe, Oakland, Los Angeles, nos dá o maior tempo de passagem, com 14,2 dias. 3 portos são visitados, o que consome 3 dias para carga/descarga.

Somando o tempo de viagem da primeira componente da rota 1.1 (17,2 dias) com o tempo de viagem que liga para a próxima rota, obteremos as variáveis de custo da rota 1.1 mostrada na tabela 24.

Tabela 24: Coeficiente de custo da rota 1.1.

Rota1.1: Kobe ou Nagoya ou Shimizu ou Tóquio → Oakland → Los Angeles.		
Coeficiente de custo de viagem	Valor (dias)	Rota designada
C1.1p1.1	32,5	Rota 1.1
C1.1p1.2	31,4	Rota 1.2
C1.1p2	32,5	Rota 2
C1.1p3	32,5	Rota 3
C1.1p4.1	32,5	Rota 4.1
C1.1p4.2	32,4	Rota 4.2
C1.1p5	36,3	Rota 5
C1.1p6	32,4	Rota 6
C1.1p7	32,5	Rota 7
C1.1p8	31,4	Rota 8
C1.1p9	33,2	Rota 9
C1.1p10.1	32,4	Rota 10.1
C1.1p10.2	31,4	Rota 10.2
C1.1p10.3	31,4	Rota 10.3
C1.1p10.4	32,5	Rota 10.4
C1.1p10.5	35,1	Rota 10.5

### 3.2.2 Rota 1.2: Rota do Sudoeste do Pacífico (rota da Califórnia)

Rota1.2: Tóquio → Busan.

Frequência de percurso da rota: uma vez a cada 7 dias.

Essa rota, junto com a rota 10.1, representa o transporte marítimo por transshipment da Coreia do Sul para a costa oeste americana, passando pelo Japão através do porto de Kobe.

Para a primeira componente da rota 1.2, com dois portos visitados, temos o tempo de viagem igual a 4,2 dias. Somando o tempo de viagem da primeira componente com a segunda parte da viagem, na qual o navio viaja em lastro para início da próxima rota, obteremos as variáveis de custo da rota 1.2 mostrada na tabela 25.

Tabela 25: Coeficiente de custo da rota 1.2.

Rota1.2: Tóquio → Busan.		
Coeficiente de custo de viagem	Valor (dias)	Rota designada
C1.2p1.1	6,2	Rota 1.1
C1.2p1.2	6,2	Rota 1.2
C1.2p2	6,2	Rota 2
C1.2p3	6,2	Rota 3
C1.2p4.1	6,1	Rota 4.1
C1.2p4.2	4,2	Rota 4.2
C1.2p5	8,1	Rota 5
C1.2p6	4,2	Rota 6
C1.2p7	6,1	Rota 7
C1.2p8	6,1	Rota 8
C1.2p9	32,8	Rota 9
C1.2p10.1	4,2	Rota 10.1
C1.2p10.2	6,2	Rota 10.2
C1.2p10.3	6,2	Rota 10.3
C1.2p10.4	5,4	Rota 10.4
C1.2p10.5	6,1	Rota 10.5

### 3.2.3 Rota 2: Rota do Noroeste do Pacífico

Rota 2: Kobe ou Nagoya ou Shimizu ou Tóquio ou Yokohama → Prince Rupert → Vancouver → Seattle → Portland.

Frequência de percurso da rota: uma vez a cada 5 dias.

A rota 2 passa por 5 portos, sendo a rota com Kobe como o primeiro porto, a rota com o maior tempo de passagem, temos um tempo de viagem da primeira componente da rota 2 de 19,3 dias. Somando o tempo de viagem da primeira componente com a segunda parte da viagem, onde navio viaja em lastro para início da próxima rota, obteremos as variáveis de custo da rota 2, mostradas na tabela 26.

### 3.2.4 Rota 3: Rota de Nova York

Rota 3: Tóquio ou Nagoya ou Kobe → St. John → Boston → Nova York → Philadelphia → Baltimore → Norfolk → Savannah → Jacksonville

Frequência de percurso da rota: uma vez a cada 7 dias.

Essa rota teve a frequência de visita dos portos modificada para serem incluídos em uma única rota. A modificação foi feita para se aproximar o máximo das frequências de visita de cada porto. Para maiores detalhes na construção destas aproximações, ver

Tabela 26: Coeficiente de custo da rota 2.

Rota 2: Kobe ou Nagoya ou Shimizu ou Tóquio ou Yokohama → Prince Rupert → Vancouver → Seattle → Portland.		
Coeficiente de custo de viagem	Valor (dias)	Rota designada
C2p1.1	32,9	Rota 1.1
C2p1.2	31,9	Rota 1.2
C2p2	32,9	Rota 2
C2p3	32,9	Rota 3
C2p4.1	32,9	Rota 4.1
C2p4.2	32,9	Rota 4.2
C2p5	36,7	Rota 5
C2p6	32,9	Rota 6
C2p7	32,9	Rota 7
C2p8	31,9	Rota 8
C2p9	37,1	Rota 9
C2p10.1	32,9	Rota 10.1
C2p10.2	31,9	Rota 10.2
C2p10.3	31,9	Rota 10.3
C2p10.4	32,9	Rota 10.4
C2p10.5	35,5	Rota 10.5

apêndice B.

Para que as demandas dos portos fossem atendidas, individualmente, nos cálculos dos custos de tempo, deveria ser feito um balanceamento proporcional de tempo e uma divisão desta rota em várias rotas que atendem o mesmo conjunto de portos. Nesta modelagem os portos de Baltimore, Savannah e Jacksonville deveriam incluir, também, a rota de Porto Rico.

Portos com frequências diferentes: 1 a cada semana, 1 a cada 2 semanas e 1 a cada mês, seriam divididos em 4 rotas distintas, cada uma, com frequência de 1 a cada mês. Os portos com frequência de 1 a cada semana apareceriam nas 4 rotas, resultando em uma frequência semanal. Os portos com frequência de 1 a cada 2 semanas apareceriam em 2 rotas, resultando em uma frequência bissemanal e os portos com frequências mensais apareceriam em somente uma rota.

A seguir, a tabela 27, contem as informações das variáveis de custo da rota 3.

### 3.2.5 Rota 4.1: Rota da Austrália - Japão-Austrália

Rota 4.1: Yokkaichi ou Nagoya ou Yokohama ou Osaka → Brisbane → Sydney → Melbourne → Adelaide.

Tabela 27: Coeficiente de custo da rota 3.

Rota 3: Tóquio ou Nagoya ou Kobe → St. John → Boston → Nova York → Philadelphia → Baltimore → Norfolk → Savannah → Jacksonville		
Coeficiente de custo de viagem	Valor (dias)	Rota designada
C3p1.1	69,2	Rota 1.1
C3p1.2	68,4	Rota 1.2
C3p2	68,4	Rota 2
C3p3	68,4	Rota 3
C3p4.1	68,4	Rota 4.1
C3p4.2	70,4	Rota 4.2
C3p5	71,6	Rota 5
C3p6	70,4	Rota 6
C3p7	68,4	Rota 7
C3p8	68,4	Rota 8
C3p9	42,8	Rota 9
C3p10.1	70,4	Rota 10.1
C3p10.2	68,4	Rota 10.2
C3p10.3	68,4	Rota 10.3
C3p10.4	69,2	Rota 10.4
C3p10.5	70,5	Rota 10.5

Frequência de percurso da rota: uma vez a cada 4 dias.

Esta rota foi baseada no serviço de transporte que liga diretamente o Japão com a Austrália. A tabela 28, contém as informações das variáveis de custo da rota 4.1.

### 3.2.6 Rota4.2: Rota da Austrália - Coréia-Austrália

Rota 4.2: Busan → Brisbane → Sydney → Melbourne → Adelaide.

Frequência de percurso da rota: uma vez a cada 10 dias.

Esta rota foi baseada no serviço de transporte que liga diretamente a Coréia do Sul com a Austrália, através do porto de Busan. A tabela 29 contém as informações das variáveis de custo da rota 4.2.

### 3.2.7 Rota 5: Rota Austrália/Extremo Oriente

Rota 5: Manila → Keelung → Kaohsiung → Hong Kong → Bangkok → Brisbane → Sydney → Melbourne.

Frequência de percurso da rota: uma vez a cada 10 dias.

Tabela 28: Coeficiente de custo da rota 4.1.

Rota 4.1: Yokkaichi ou Nagoya ou Yokohama ou Osaka → Brisbane → Sydney → Melbourne → Adelaide.		
Coeficiente de custo de viagem	Valor (dias)	Rota designada
C4.1p1.1	36,3	Rota 1.1
C4.1p1.2	35,8	Rota 1.2
C4.1p2	36,3	Rota 2
C4.1p3	36,3	Rota 3
C4.1p4.1	36,3	Rota 4.1
C4.1p4.2	36,6	Rota 4.2
C4.1p5	32,8	Rota 5
C4.1p6	36,6	Rota 6
C4.1p7	36,3	Rota 7
C4.1p8	35,8	Rota 8
C4.1p9	50,6	Rota 9
C4.1p10.1	36,6	Rota 10.1
C4.1p10.2	35,8	Rota 10.2
C4.1p10.3	35,8	Rota 10.3
C4.1p10.4	36,2	Rota 10.4
C4.1p10.5	34,7	Rota 10.5

Tabela 29: Coeficiente de custo da rota 4.2.

Rota 4.2: Busan → Brisbane → Sydney → Melbourne → Adelaide		
Coeficiente de custo de viagem	Valor (dias)	Rota designada
C4.2p1.1	36,9	Rota 1.1
C4.2p1.2	36,4	Rota 1.2
C4.2p2	36,9	Rota 2
C4.2p3	36,9	Rota 3
C4.2p4.1	36,9	Rota 4.1
C4.2p4.2	37,2	Rota 4.2
C4.2p5	33,4	Rota 5
C4.2p6	37,2	Rota 6
C4.2p7	36,9	Rota 7
C4.2p8	36,4	Rota 8
C4.2p9	51,2	Rota 9
C4.2p10.1	37,2	Rota 10.1
C4.2p10.2	36,4	Rota 10.2
C4.2p10.3	36,4	Rota 10.3
C4.2p10.4	36,8	Rota 10.4
C4.2p10.5	35,3	Rota 10.5

Tabela 30: Coeficiente de custo da rota 5.

Rota 5: Manila → Keelung → Kaohsiung → Hong Kong → Bangkok → Brisbane → Sydney → Melbourne.		
Coeficiente de custo de viagem	Valor (dias)	Rota designada
C5p1.1	46,1	Rota 1.1
C5p1.2	45,6	Rota 1.2
C5p2	46,1	Rota 2
C5p3	46,1	Rota 3
C5p4.1	46,1	Rota 4.1
C5p4.2	46,3	Rota 4.2
C5p5	44,7	Rota 5
C5p6	46,3	Rota 6
C5p7	46,0	Rota 7
C5p8	45,6	Rota 8
C5p9	60,3	Rota 9
C5p10.1	46,3	Rota 10.1
C5p10.2	45,6	Rota 10.2
C5p10.3	45,6	Rota 10.3
C5p10.4	46,0	Rota 10.4
C5p10.5	45,7	Rota 10.5

Esta rota foi baseada no serviço de transporte que liga 4 portos no Extremo Oriente (Manila, Keelung, Kaohsiung e Hong Kong) com Sydney, Melbourne e Brisbane. A tabela 30 contém as informações das variáveis de custo da rota 5.

### 3.2.8 Rota 6: Rota do Oriente Médio e Golfo

Rota 6: Busan → Yokohama ou Tóquio → Shanghai → Hong Kong → Singapura → Dubai → Dammam → Kuwait → Umm Qasr → Bandar Khomeini.

Frequência de percurso da rota: 0,09 navios/dia ou aproximadamente uma vez a cada 11,11 dias. Essa frequência foi estimada para que 5 a 6 navios, trafegando na rota óbvia possam ser suficiente para suprir a demanda.

Essa rota passa por uma extensa quantidade de portos, 10 no total, o que consome 10 dias para carga/descarga. Com o maior tempo de viagem da rota é de 22,3 dias, sem considerar o tempo de viagem a próxima rota. Isso faz com que a primeira componente do custo de viagem seja de 32,3 dias.

A seguir, a tabela 31, mostra as informações das variáveis de custo de viagem para a rota 6.

Tabela 31: Coeficiente de custo da rota 6.

Rota 6: Busan → Yokohama ou Tóquio → Shanghai → Hong Kong → Singapura → Dubai → Dammam → Kuwait → Umm Qasr → Bandar Khomeini.		
Coeficiente de custo de viagem	Valor (dias)	Rota designada
C6p1.1	53,4	Rota 1.1
C6p1.2	53,4	Rota 1.2
C6p2	53,4	Rota 2
C6p3	53,4	Rota 3
C6p4.1	53,4	Rota 4.1
C6p4.2	52,3	Rota 4.2
C6p5	48,7	Rota 5
C6p6	52,3	Rota 6
C6p7	53,4	Rota 7
C6p8	53,4	Rota 8
C6p9	58,2	Rota 9
C6p10.1	52,3	Rota 10.1
C6p10.2	53,4	Rota 10.2
C6p10.3	53,4	Rota 10.3
C6p10.4	52,9	Rota 10.4
C6p10.5	50,4	Rota 10.5

### 3.2.9 Rota 7: Rota da China

Rota 7: Yokohama ou Osaka → Dalian → Xingang → Qingdao → Shanghai → Huangpu

Frequência de percurso da rota: uma vez a cada 30 dias.

Apesar da rota descrita pela Y.S. Line demorar 35 dias, aproximadamente, para ser completada, o tempo médio modelado aqui foi de 20 dias, de acordo com as considerações já citadas (estamos considerando esta rota como containerizada). A discrepância entre o tempo de viagem realizado pela Y.S. Line e o tempo modelado aqui se deve ao fato que os navios utilizados pela Y.S. Line, nesta rota, são de carga geral e não de containeres. O carregamento e descarregamento de navios de carga geral é muito mais trabalhoso e pode necessitar de vários dias para ser efetuado.

A seguir, a tabela 32 mostra as informações das variáveis de custo de viagem para a rota 7.

Tabela 32: Coeficiente de custo da rota 7.

Rota 7: Yokohama ou Osaka → Dalian → Xingang → Qingdao → Shanghai → Huangpu		
Coeficiente de custo de viagem	Valor (dias)	Rota designada
C7p1.1	20,2	Rota 1.1
C7p1.2	20,2	Rota 1.2
C7p2	20,2	Rota 2
C7p3	20,2	Rota 3
C7p4.1	20,0	Rota 4.1
C7p4.2	18,8	Rota 4.2
C7p5	17,0	Rota 5
C7p6	18,8	Rota 6
C7p7	20,2	Rota 7
C7p8	20,2	Rota 8
C7p9	49,4	Rota 9
C7p10.1	18,8	Rota 10.1
C7p10.2	20,2	Rota 10.2
C7p10.3	20,2	Rota 10.3
C7p10.4	19,9	Rota 10.4
C7p10.5	16,9	Rota 10.5

### 3.2.10 Rota 8: Serviço de Container Trans-Siberiano

Rota8: Tomakoma → Yokohama → Shimizu → Nagoya → Kobe → Moji → Niigata → Nakhodka → Vostochny.

Frequência de percurso da rota: 24 viagens a cada 30 dias.

Os portos iniciais desta rota foram todos modificados para dar maior impacto na quantidade de navios necessária. A rota original possui como portos de embarque, Yokohama e Kobe, e estes poderiam ser substituídos pelos portos de Tomakoma, Nagoya, Shimizu, Moji e Niigata. Todos esses portos foram incluídos, sendo este o pior caso para esta rota.

Apesar de Tomakoma ser um porto pequeno, ele foi escolhido como porto de início, por oferecer o melhor trajeto dentre os outros possíveis portos iniciais (Kobe, Nagoya, Shimizu, Moji, Yokohama e Niigata). Assim, existe a possibilidade de folga para os navios que fazem essa rota iniciarem suas operações dentro de qualquer porto citado.

A seguir, a tabela 33, mostra as informações das variáveis de custo de viagem para a rota 8.

Tabela 33: Coeficiente de custo da rota 8.

Rota8: Tomakoma → Yokohama → Shimizu → Nagoya → Kobe → Moji → Niigata → Nakhodka → Vostochny.		
Coeficiente de custo de viagem	Valor (dias)	Rota designada
C8p1.1	19,0	Rota 1.1
C8p1.2	19,0	Rota 1.2
C8p2	19,0	Rota 2
C8p3	19,0	Rota 3
C8p4.1	18,9	Rota 4.1
C8p4.2	17,4	Rota 4.2
C8p5	21,6	Rota 5
C8p6	17,4	Rota 6
C8p7	18,9	Rota 7
C8p8	18,9	Rota 8
C8p9	44,9	Rota 9
C8p10.1	17,4	Rota 10.1
C8p10.2	19,0	Rota 10.2
C8p10.3	19,0	Rota 10.3
C8p10.4	18,5	Rota 10.4
C8p10.5	19,3	Rota 10.5

### 3.2.11 Rota 9: Serviço de Container de Porto Rico

Rota9: Baltimore → San Juan → Savannah → Jacksonville.

Frequência de percurso da rota: uma vez a cada 30 dias.

A princípio, se pensou em incluir essa rota juntamente com a rota de Nova York. Porém, devido às limitações da versão em uso do LINGO, a construção foi postergada. A inclusão da rota de Porto Rico na rota de Nova York iria resultar em 4 novas rotas, como explicado anteriormente. A solução será discutida no próximo capítulo.

A seguir, a tabela 34, mostra as informações das variáveis de custo de viagem para a rota 9.

### 3.2.12 Rota 10.1: Rota da Coréia

Rota10.1: Busan → Kobe

Frequência de percurso da rota: uma vez por dia.

Essa rota, junto com a rota 1.2, representa o transshipment da Coréia do Sul para a costa oeste americana que passa pelo Japão, na rota da Califórnia. A tabela 35 mostra as informações das variáveis de custo de viagem para a rota 10.1.

Tabela 34: Coeficiente de custo da rota 9.

Rota9: Baltimore → San Juan → Savannah → Jacksonville.		
Coeficiente de custo de viagem	Valor (dias)	Rota designada
C9p1.1	39,4	Rota 1.1
C9p1.2	38,6	Rota 1.2
C9p2	39,4	Rota 2
C9p3	39,4	Rota 3
C9p4.1	39,4	Rota 4.1
C9p4.2	40,6	Rota 4.2
C9p5	41,8	Rota 5
C9p6	40,6	Rota 6
C9p7	39,4	Rota 7
C9p8	38,6	Rota 8
C9p9	13,0	Rota 9
C9p10.1	40,6	Rota 10.1
C9p10.2	38,6	Rota 10.2
C9p10.3	38,6	Rota 10.3
C9p10.4	39,4	Rota 10.4
C9p10.5	40,7	Rota 10.5

Tabela 35: Coeficiente de custo da rota 10.1.

Rota10.1: Busan → Kobe		
Coeficiente de custo de viagem	Valor (dias)	Rota designada
C10.1p1.1	4,2	Rota 1.1
C10.1p1.2	4,2	Rota 1.2
C10.1p2	4,2	Rota 2
C10.1p3	4,2	Rota 3
C10.1p4.1	4,2	Rota 4.1
C10.1p4.2	4,5	Rota 4.2
C10.1p5	8,0	Rota 5
C10.1p6	4,5	Rota 6
C10.1p7	4,2	Rota 7
C10.1p8	4,2	Rota 8
C10.1p9	32,3	Rota 9
C10.1p10.1	4,5	Rota 10.1
C10.1p10.2	4,2	Rota 10.2
C10.1p10.3	4,2	Rota 10.3
C10.1p10.4	3,2	Rota 10.4
C10.1p10.5	6,1	Rota 10.5

### 3.2.13 Rota 10.2: Rota Taiwan-Hong Kong

Rota10.2: Tóquio → Kobe → Keelung → Hong Kong

Frequência de percurso da rota: uma vez a cada 6 dias.

A tabela 36 mostra as informações das variáveis de custo de viagem para a rota 10.2.

Tabela 36: Coeficiente de custo da rota 10.2.

Rota10.2: Tóquio → Kobe → Keelung → Hong Kong		
Coeficiente de custo de viagem	Valor (dias)	Rota designada
C10.2p1.1	14,5	Rota 1.1
C10.2p1.2	14,5	Rota 1.2
C10.2p2	14,5	Rota 2
C10.2p3	14,5	Rota 3
C10.2p4.1	14,5	Rota 4.1
C10.2p4.2	12,8	Rota 4.2
C10.2p5	11,2	Rota 5
C10.2p6	12,8	Rota 6
C10.2p7	14,5	Rota 7
C10.2p8	14,5	Rota 8
C10.2p9	41,9	Rota 9
C10.2p10.1	12,8	Rota 10.1
C10.2p10.2	14,5	Rota 10.2
C10.2p10.3	14,5	Rota 10.3
C10.2p10.4	14,1	Rota 10.4
C10.2p10.5	10,9	Rota 10.5

### 3.2.14 Rota 10.3: Rota dos Straits

Rota10.3: Tóquio → Kobe → Cingapura → Port Kelang → Penang → Rangoon → Cingapura.

Frequência de percurso da rota: uma vez a cada 7 dias.

A tabela 37 mostra as informações das variáveis de custo de viagem para a rota 10.3.

### 3.2.15 Rota 10.4: Rota de Cebu

Rota10.4: Kobe → Cebu

Frequência de percurso da rota: uma vez a cada 7 dias.

A tabela 38 mostra as informações das variáveis de custo de viagem para a rota 10.4.

Tabela 37: Coeficiente de custo da rota 10.3.

Rota10.3: Tóquio → Kobe → Cingapura → Port Kelang → Penang → Rangoon → Cingapura.		
Coeficiente de custo de viagem	Valor (dias)	Rota designada
C10.3p1.1	30,3	Rota 1.1
C10.3p1.2	30,3	Rota 1.2
C10.3p2	30,3	Rota 2
C10.3p3	30,3	Rota 3
C10.3p4.1	30,2	Rota 4.1
C10.3p4.2	29,1	Rota 4.2
C10.3p5	25,5	Rota 5
C10.3p6	29,1	Rota 6
C10.3p7	30,2	Rota 7
C10.3p8	30,2	Rota 8
C10.3p9	57,5	Rota 9
C10.3p10.1	29,1	Rota 10.1
C10.3p10.2	30,3	Rota 10.2
C10.3p10.3	30,3	Rota 10.3
C10.3p10.4	29,9	Rota 10.4
C10.3p10.5	27,2	Rota 10.5

Tabela 38: Coeficiente de custo da rota 10.4.

Rota10.4: Kobe → Cebu		
Coeficiente de custo de viagem	Valor (dias)	Rota designada
C10.4p1.1	12,1	Rota 1.1
C10.4p1.2	12,1	Rota 1.2
C10.4p2	12,1	Rota 2
C10.4p3	12,1	Rota 3
C10.4p4.1	12,0	Rota 4.1
C10.4p4.2	11,6	Rota 4.2
C10.4p5	8,0	Rota 5
C10.4p6	11,6	Rota 6
C10.4p7	12,0	Rota 7
C10.4p8	12,0	Rota 8
C10.4p9	39,1	Rota 9
C10.4p10.1	11,6	Rota 10.1
C10.4p10.2	12,1	Rota 10.2
C10.4p10.3	12,1	Rota 10.3
C10.4p10.4	11,6	Rota 10.4
C10.4p10.5	10,1	Rota 10.5

### 3.2.16 Rota 10.5: Rota de Bangkok

Rota10.5: Keelung  $\rightarrow$  Kaohsiung  $\rightarrow$  Manila  $\rightarrow$  Bangkok.

Frequência de percurso da rota: uma vez a cada 4 dias.

A tabela 39 mostra as informações das variáveis de custo de viagem para a rota 10.5.

Tabela 39: Coeficiente de custo da rota 10.5.

Rota10.5: Keelung $\rightarrow$ Kaohsiung $\rightarrow$ Manila $\rightarrow$ Bangkok.		
Coefficiente de custo de viagem	Valor (dias)	Rota designada
C10.5p1.1	19,5	Rota 1.1
C10.5p1.2	19,5	Rota 1.2
C10.5p2	19,5	Rota 2
C10.5p3	19,5	Rota 3
C10.5p4.1	19,4	Rota 4.1
C10.5p4.2	18,4	Rota 4.2
C10.5p5	14,9	Rota 5
C10.5p6	18,4	Rota 6
C10.5p7	19,4	Rota 7
C10.5p8	19,4	Rota 8
C10.5p9	47,2	Rota 9
C10.5p10.1	18,4	Rota 10.1
C10.5p10.2	19,5	Rota 10.2
C10.5p10.3	19,5	Rota 10.3
C10.5p10.4	19,1	Rota 10.4
C10.5p10.5	16,4	Rota 10.5

## 3.3 Modelagem dos problemas

Veja, na tabela 40, os valores mínimos das demandas de navios/dia por rota.

Tabela 40: Demanda de navios por dia baseada na frequência usada pela Y.S. Line.

Variável	$b_{1.1}$	$b_{1.2}$	$b_2$	$b_3$	$b_{4.1}$	$b_{4.2}$	$b_5$	$b_6$
navio/dia	1/4	1/7	1/5	1/7	1/4	1/10	1/10	0,09
Variável	$b_7$	$b_8$	$b_9$	$b_{10.1}$	$b_{10.2}$	$b_{10.3}$	$b_{10.4}$	$b_{10.5}$
navio/dia	1/30	24/30	1/30	1	1/6	1/7	1/7	1/4

Como dito, anteriormente, as rotas foram usadas para criar 3 problemas diferentes. O primeiro problema utiliza as rotas: 1.1, 2, 4.2, 5, 7, 8 e 10.2. O segundo problema utiliza as rotas: 1.1, 1.2, 2, 3, 4.1, 9, e 10.1. E, finalmente, o terceiro problema utiliza as rotas: 5, 6, 10.1, 10.2, 10.3, 10.4 e 10.5.

Os modelos dos problemas, formulados na linguagem do programa LINGO, estão expostos no apêndice C.

## 4 *Resultados*

*“Só é útil o conhecimento que nos torna melhores.”*

*Sócrates*

### 4.1 Introdução

Este capítulo está organizado da seguinte maneira: na seção 4.2, iremos apresentar a solução das 'rotas óbvias' dos três problemas gerados a partir das rotas da Y.S. Line. Este tipo de solução era o mais usado pelas empresas que não utilizam suas redes de serviços otimizadas, servindo como uma ótima base para comparar com as soluções otimizadas. A solução óbvia para a maioria dos problemas de pequena escala é a melhor solução, como ficou demonstrado no capítulo 2. Somente com o aumento do tamanho da rede de rotas é possível conseguir ganho de sinergia entre as rotas e, conseqüentemente, aumento da produtividade e melhor uso da frota.

A seguir, iremos apresentar as quatro soluções alternativas geradas pelo modelo para cada um dos problemas, discutindo suas diferenças com a solução óbvia apresentada. Finalmente, após a solução final ter sido discutida e analisada, iremos escolher uma das soluções apresentadas, e, usando a variável de acoplamento de frequência  $b_i$ , iremos mostrar como estimar as velocidades ideais para transitar cada rota.

Todas as soluções contidas neste capítulo foram obtidas através do programa LINGO versão estudantil em um *laptop* Toshiba com 1,3 GHz de *clock* e 512 Mb de memória RAM.

### 4.2 Soluções triviais do problema

As tabelas a seguir contêm a solução trivial dos problemas 1, 2 e 3. Para o problema 1, é necessário uma frota de 45 navios para atender às rotas com uso do seqüenciamento

das rotas óbvias. A tabela 41 mostra a quantidade de navios necessários em cada rota, bem como as frequências de navios por dia necessários para cumprimento da demanda das rotas.

Tabela 41: Quantidade de navios por rota do problema 1, utilizando o seqüenciamento das rotas óbvias. 45 Navios são necessários.

Rota 1.1	Rota 2	Rota 4.2	Rota 5	Rota 7	Rota 8	Rota 10.2
x1.1p1.1 navio	x2p2 navio	x4.2p4.2 navio	x5p5 navio	x7p7 navio	x8p8 navio	x10.2p10.2 navio
9	7	4	5	1	16	3
b1.1 navio/dia	b2 navio/dia	b4.2 navio/dia	b5 navio/dia	b7 navio/dia	b8 navio/dia	b10.2 navio/dia
0,2769228	0,2127657	0,1075268	0,1118565	0,0495049	0,84656	0,2068965
ou 1 navio a cada 3,61 dias	ou 1 navio a cada 4,70 dias	ou 1 navio a cada 9,30 dias	ou 1 navio a cada 8,94 dias	ou 1 navio a cada 20,20 dias	ou 1 navio a cada 1,18 dias	ou 1 navio a cada 4,83 dias
e1.1 navio/dia	e2 navio/dia	e4.2 navio/dia	e5 navio/dia	e7 navio/dia	e8 navio/dia	e10.2 navio/dia
0	0	0	0	0	0	0

Na solução do problema 1, todas as variáveis de frequência por rota,  $b_i$ , estão acima do valor mínimo necessário para cumprir as rotas. Notamos que em praticamente todas as rotas houveram aumentos consideráveis nas frequências.

**Frequências mínimas de trânsito do problema 1:**  $b_{1.1} = 1/4$ ,  $b_2 = 1/7$ ,  $b_{4.2} = 1/10$ ,  $b_5 = 1/10$ ,  $b_7 = 1/30$ ,  $b_8 = 24/30$  ou 0,80 (1 a cada 1,25 dias),  $b_{10.2} = 1/6$ .

As tabelas 42 e 43 mostram a solução dos problemas 2 e 3 que utilizam as rotas óbvias. A quantidade de navios necessários para os problemas 2 e 3 utilizando as rotas óbvias, respectivamente, são 43 e 30 navios. Para termos uma noção de comparação dos resultados obtidos, as frequências de trânsito para os problemas 2 e 3 estão dispostas abaixo:

**Frequências mínimas de trânsito do problema 2:**  $b_{1.1} = 1/4$ ,  $b_{1.2} = 1/7$ ,  $b_2 = 1/5$ ,  $b_3 = 1/7$ ,  $b_{4.1} = 1/4$ ,  $b_9 = 1/30$ ,  $b_{10.1} = 1$ .

**Frequências mínimas de trânsito do problema 3:**  $b_6 = 0,09$ ,  $b_7 = 1/30$ ,  $b_{10.1} = 1$ ,  $b_{10.2} = 1/6$ ,  $b_{10.3} = 1/7$ ,  $b_{10.4} = 1/7$ ,  $b_{10.5} = 1/4$ .

Na próxima seção, iremos apresentar os resultados otimizados dos problemas e compará-los com suas respectivas soluções triviais das rotas óbvias.

Tabela 42: Quantidade de navios por rota do problema 2, utilizando o seqüenciamento das rotas óbvias. 43 Navios são necessários.

Rota 1.1	Rota 1.2	Rota 2	Rota 3	Rota 4.1	Rota 9	Rota 10.1
x1.1p1.1 navio	x1.2p1.2 navio	x2p2 navio	x3p3 navio	x4.1p4.1 navio	x9p9 navio	x10.1p10.1 navio
9	1	7	10	10	1	5
b1.1 navio/dia	b1.2 navio/dia	b2 navio/dia	b3 navio/dia	b4.1 navio/dia	b9 navio/dia	b10.1 navio/dia
0,2769228	0,1612903	0,2127657	0,1461988	0,2754820	0,0769230	1,111111
ou 1 navio a cada 3,61 dias	ou 1 navio a cada 6,2 dias	ou 1 navio a cada 4,7 dias	ou 1 navio a cada 6,84 dias	ou 1 navio a cada 3,63 dias	ou 1 navio a cada 13 dias	ou 1 navio a cada 0,9 dias
e1.1 navio/dia	e1.2 navio/dia	e2 navio/dia	e3 navio/dia	e4.1 navio/dia	e9 navio/dia	e10.1 navio/dia
0	0	0	0	0	0	0

Tabela 43: Quantidade de navios por rota do problema 3, utilizando o seqüenciamento das rotas óbvias. 30 Navios são necessários.

Rota 5	Rota 6	Rota 10.1	Rota 10.2	Rota 10.3	Rota 10.4	Rota 10.5
x5p5 navio	x6p6 navio	x10.1p10.1 navio	x10.2p10.2 navio	x10.3p10.3 navio	x10.4p10.4 navio	x10.5p10.5 navio
5	5	5	3	5	2	5
b5 navio/dia	b6 navio/dia	b10.1 navio/dia	b10.2 navio/dia	b10.3 navio/dia	b10.4 navio/dia	b10.5 navio/dia
0,1118565	0,0956020	1,111111	0,2068965	0,1650165	0,1724136	0,3048780
ou 1 navio a cada 8,94 dias	ou 1 navio a cada 10,46 dias	ou 1 navio a cada 0,9 dias	ou 1 navio a cada 4,83 dias	ou 1 navio a cada 6,06 dias	ou 1 navio a cada 5,8 dias	ou 1 navio a cada 3,28 dias
e5 navio/dia	e6 navio/dia	e10.1 navio/dia	e10.2 navio/dia	e10.3 navio/dia	e10.4 navio/dia	e10.5 navio/dia
0	0	0	0	0	0	0

## 4.3 Soluções otimizadas dos problemas

As soluções otimizadas dos problemas estarão nas 3 subseções seguintes. Em cada subseção, as 4 soluções possíveis de cada problema estarão distribuídas da seguinte maneira:

**Solução A:** Solução do problema, utilizando todas as restrições adicionais (restrições 2.21 e 2.22).

**Solução B:** Solução do problema, utilizando apenas a restrição de número máximo de navios da frota (restrição 2.21).

**Solução C:** Solução do problema, utilizando apenas a restrição de número máximo de navios por rota (restrição 2.22).

**Solução D:** Solução do problema, sem utilizar as restrições extras.

Também serão apresentada a quantidade de iterações necessárias para se obter a solução ótima de cada problema. Oingo expressa o número de iterações para problemas inteiros em duas categorias: (1) *Extended solver steps* e (2) *Total solver iterations*. O primeiro mostra o número de iterações usada pelas ferramentas específicas para resolução de problemas inteiros, tais como: B&B e planos de corte. O segundo mostra a quantidade total de iterações necessárias até se alcançar a solução.

### 4.3.1 Solução do problema 1

As tabelas 44, 45, 46 e 47, a seguir, mostram respectivamente as soluções A, B, C e D. O problema 1 obteve a solução com uma frota de 43 navios, 2 navios a menos que a solução trivial, um ganho significativo de produtividade.

Iremos, primeiramente, discutir as mudanças nas frequências de trânsito das rotas. Na rota 1.1, a solução óbvia obteve a frequência de um navio a cada 3.61 dias. Nas soluções otimizadas, houve uma pequena diminuição nesta frequência, variando de 1 navio a cada 3,93 dias até um navio a cada 4 dias, sendo esta a frequência mínima para trânsito, nesta rota, de um navio a cada 4 dias.

Na rota 2, o valor mínimo para trânsito é de um navio a cada 7 dias. Em todas as soluções otimizadas, bem como na solução trivial, foi obtido valores de partida dos navios

que variavam entre 4,6 a 4,7 dias. Uma redução de mais de 2 dias no período, aumentando a frequência de visitas aos portos desta rota.

Na rota 4.2 ocorreu um aumento na frequência de trânsito da rota com a redução do período em torno de um dia. O valor mínimo para percorrer esta rota é de uma viagem a cada 10 dias e as soluções otimizadas obtiveram um período de visita que varia de 8,9 a 9,1. O mesmo ocorreu para a rota 5, cujo valor mínimo de trânsito é igual ao da rota 4.2, uma viagem a cada 10 dias. Neste caso, o período de viagem ocorre em valores em torno de 9,1 dias.

Para a rota 7, todas as soluções convergiram para uma viagem a cada 20,2 dias. Um aumento de frequência devido a redução de 10 dias no período de viagem, se comparado com a frequência mínima da rota, que é de uma viagem a cada mês.

Os valores de frequência das soluções para a rota 8 foram uma viagem a cada 1,18 dias ou 1,25 dias, sendo que a frequência mínima é de 24 viagens a cada 30 dias (ou 1/1,25 de viagem/dias).

A rota 10.2 foi uma rota que obteve um ganho de mais de 1 dia, dependendo da solução, na frequência de visita. As soluções flutuam entre a frequência de 1/4,4 de viagem/dias a 1/4,83 de viagem/dias. A solução C do problema 1 foi a única solução que obteve uma frequência praticamente igual ao mínimo desta rota, com solução igual a uma viagem a cada 5,97 (a frequência mínima desta rota é 1/6 viagem/dias)

Agora, iremos analisar aonde houve ganho de sinergia entre as rotas, para que seja possível uma diminuição da frota e, conseqüentemente, melhor aproveitamento dos navios. Como dito anteriormente, este problema conseguiu a solução ótima de 43 navios, ao reduzir em dois navios da sua solução trivial. Um ganho que não é aparente, mas muito importante, é o uso dos navios para transitar diferentes rotas. Esse tipo de roteamento permite o aumento da produtividade dos navios, possibilitando que cargas possam ser transportadas diretamente para outras rotas, conectadas pelo trânsito eficiente dos navios.

Vendo as soluções A, B, C e D nas tabelas 44, 45, 46 e 47, notamos que o ganho de sinergia das rotas e, conseqüentemente, a diminuição da frota necessária, ocorreu nas rotas 1.1, 8 e 10.2. Em todas as soluções, a rota 1.1 precisa de 8 navios para transitá-la. A designação da próxima rota foi uma combinação de ir para a rota 8, rota 10.2, ou voltar para a própria rota 1.1, dependendo da solução.

As soluções A, B e D encontraram sinergia na rota 8, diminuindo de 16 para 15 navios necessários. As rotas apontadas, a partir desta rota, foram bastante amplas: uma

Tabela 44: Solução A do problema 1 (utiliza o modelo com todas as restrições). São necessários 43 navios para cumprir as demandas.

Variáveis de decisão: $x_{ij}$ (navios)						
x1.1p8	x1.1p10.2	<u>Rota 1.1</u>	x2p1.1	x2p2	x2p10.2	<u>Rota 2</u>
7	1	8	2	1	4	7
x4.2p2	<u>Rota 4.2</u>	x5p1.1	x5p5	x5p10.2	<u>Rota 5</u>	x7p1.1
4	4	1	1	3	5	1
<u>Rota 7</u>	x8p1.1	x8p4.2	x8p7	x8p8	<u>Rota 8</u>	x10.2p1.1
1	1	2	1	11	15	1
x10.2p2	x10.2p5	<u>Rota 10.2</u>	-	-	-	-
1	1	3				
Variáveis de decisão: $b_i$ e $e_i$ (navios/dia)						
$b_{1.1}$	$b_2$	$b_{4.2}$	$b_5$	$b_7$	$b_8$	$b_{10.2}$
0,2537938	0,2165769	0,10989	0,1098526	0,0495049	0,8024939	0,2272167
1 navio a cada 3,94 dias	1 navio a cada 4,62 dias	1 navio a cada 9,1 dias	1 navio a cada 9,1 dias	1 navio a cada 20,2 dias	1 navio a cada 1,25 dias	1 navio a cada 4,4 dias
$e_{1.1}$	$e_2$	$e_{4.2}$	$e_5$	$e_7$	$e_8$	$e_{10.2}$
-0,0002098	-0,0073263	-0,0073263	0,0018044	0,0034051	0,0024458	-0,0051716

Tabela 45: Solução B do problema 1 (utiliza o modelo com a restrição adicional de tamanho máximo da frota). São necessários 43 navios para cumprir as demandas.

Variáveis de decisão: $x_{ij}$ (navios)						
x1.1p1.1	x1.1p8	<u>Rota 1.1</u>	x2p2	x2p10.2	<u>Rota 2</u>	x4.2p2
4	4	8	2	5	7	3
x4.2p5	<u>Rota 4.2</u>	x5p8	x5p10.2	<u>Rota 5</u>	x7p1.1	<u>Rota 7</u>
1	4	2	3	5	1	1
x8p4.2	x8p7	x8p8	<u>Rota 8</u>	x10.2p1.1	x10.2p2	x10.2p5
2	1	12	15	1	1	1
<u>Rota 10.2</u>	-	-	-	-	-	-
3						
Variáveis de decisão: $b_i$ e $e_i$ (navios/dia)						
$b_{1.1}$	$b_2$	$b_{4.2}$	$b_5$	$b_7$	$b_8$	$b_{10.2}$
0,2504652	0,2175297	0,1123576	0,1096490	0,0495049	0,8027724	0,2272167
1 navio a cada 4 dias	1 navio a cada 4,6 dias	1 navio a cada 8,9 dias	1 navio a cada 9,12 dias	1 navio a cada 20,2 dias	1 navio a cada 1,25 dias	1 navio a cada 4,40 dias
$e_{1.1}$	$e_2$	$e_{4.2}$	$e_5$	$e_7$	$e_8$	$e_{10.2}$
-0,0089180	-0,0053565	0,0025848	0,0095768	0,0034051	0,0033956	-0,0046878

Tabela 46: Solução C do problema 1 (utiliza o modelo com a restrição adicional de número máximo de navios por rotas). São necessários 43 navios para cumprir as demandas.

Variáveis de decisão: $x_{ij}$ (navios)						
x1.1p8	<u>Rota 1.1</u>	x2p2	x2p10.2	<u>Rota 2</u>	x4.2p2	x4.2p4.2
8	8	5	2	7	2	1
x4.2p5	<u>Rota 4.2</u>	x5p10.2	<u>Rota 5</u>	x7p1.1	<u>Rota 7</u>	x8p1.1
1	4	5	5	1	1	4
x8p7	x8p8	<u>Rota 8</u>	x10.2p4.2	x10.2p5	<u>Rota 10.2</u>	-
1	11	16	1	1	2	
Variáveis de decisão: $b_i$ e $e_i$ (navios/dia)						
$b_{1.1}$	$b_2$	$b_{4.2}$	$b_5$	$b_7$	$b_8$	$b_{10.2}$
0,2547768	0,2146713	0,1117668	0,1096490	0,0495049	0,8454460	0,1674107
1 navio a cada 3,93 dias	1 navio a cada 4,66 dias	1 navio a cada 8,95 dias	1 navio a cada 9,12 dias	1 navio a cada 20,2 dias	1 navio a cada 1,18 dias	1 navio a cada 5,97 dias
$e_{1.1}$	$e_2$	$e_{4.2}$	$e_5$	$e_7$	$e_8$	$e_{10.2}$
0,0052541	-0,0077508	-0,0067601	0,0095768	0,0034051	-0,0086592	0,0049341

Tabela 47: Solução D do problema 1 (utiliza o modelo sem restrições adicionais). São necessários 43 navios para cumprir as demandas.

Variáveis de decisão: $x_{ij}$ (navios)						
x1.1p1.1	x1.1p8	<u>Rota 1.1</u>	x2p1.1	x2p2	x2p8	<u>Rota 2</u>
4	4	8	1	5	1	7
x4.2p5	x4.2p10.2	<u>Rota 4.2</u>	x5p8	<u>Rota 5</u>	x7p7	<u>Rota 7</u>
1	3	4	5	5	1	1
x8p1.1	x8p2	x8p4.2	x8p8	<u>Rota 8</u>	x10.2p5	x10.2p1.2
2	1	2	10	15	1	2
<u>Rota 10.2</u>	-	-	-	-	-	-
3						
Variáveis de decisão: $b_i$ e $e_i$ (navios/dia)						
$b_{1.1}$	$b_2$	$b_{4.2}$	$b_5$	$b_7$	$b_8$	$b_{10.2}$
0,2504652	0,2137185	0,1123576	0,1096490	0,0495049	0,8019369	0,2272167
1 navio a cada 4 dias	1 navio a cada 4,68 dias	1 navio a cada 8,9 dias	1 navio a cada 9,12 dias	1 navio a cada 20,2 dias	1 navio a cada 1,25 dias	1 navio a cada 4,40 dias
$e_{1.1}$	$e_2$	$e_{4.2}$	$e_5$	$e_7$	$e_8$	$e_{10.2}$
0,0082697	-0,0091115	0,0025848	0,0095768	0	-0,0044516	-0,0068682

combinação das rotas: 1.1, 2, 4.2, 7 e o próprio retorno para a rota 8.

A solução C encontrou na rota 10.2, uma forma de diminuir a frota, ao possibilitar que apenas 2 navios sejam suficientes para cumprir a demanda desta rota, sendo estes designados para as rotas 4.2 e 5. A solução trivial para a rota 10.2 foi de 3 navios.

Em todos os outros casos, não houve mudança no número de navios necessários para cumprimento das demandas de frequências das rotas. Porém, como foi explicado anteriormente, o maior número de mudanças de rotas possibilita um melhor aproveitamento dos navios e da rede marítima. Neste caso, a solução que conseguiu o melhor aproveitamento das rotas foi a solução B, com 14 designações para rotas diferentes. A solução A obteve 12 apontamentos para rotas diferentes, e as soluções C e D, respectivamente, 10 e 11 apontamentos para outras rotas. Veja na figura 13 a seqüência de rotas encontradas na solução B do problema 1.

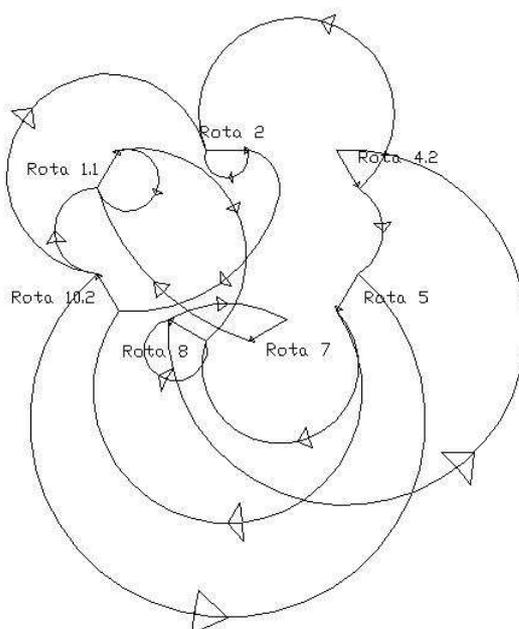


Figura 13: Seqüência de rotas para a solução 1-B.

A quantidade de iterações necessárias para se obter as soluções A, B, C e D do problema 1, bem como o tempo de processamento estão expostas a seguir:

Solução A (menos de 1 seg):

**Extended solver steps:** 9

**Total solver iterations:** 395

Solução B (4 seg):

***Extended solver steps:*** 9529

***Total solver iterations:*** 37996

Solução C (menos de 1 seg):

***Extended solver steps:*** 520

***Total solver iterations:*** 15985

Solução D (menos de 1 seg):

***Extended solver steps:*** 821

***Total solver iterations:*** 3688

### 4.3.2 Solução do problema 2

As tabelas 48, 49, 50 e 51 mostram, respectivamente, as soluções A, B, C e D do problema 2. Aqui a solução ótima foi atingida com uma frota de 42 navios. Um navio a menos que a solução óbvia.

Como no problema 1, as frequências para a rota 1.1 foram pouco alteradas, com uma viagem variando a cada 3,61 a 4 dias. E lembrando que esta rota possui a frequência mínima de 1/4 de viagem/dias.

Para a rota 1.2, todas as soluções otimizadas encontraram a frequência de viagem de 1/4,2 viagem/dias. Um aumento de quase 3 dias da frequência mínima que é 1/7. Na rota 2, também, todas as soluções convergiram para a frequência de uma viagem a cada 4,7 dias. Um valor próximo da frequência mínima da rota 2, que é 1/5 de viagem/dias.

A rota 3 tem como valor mínimo de trânsito uma viagem por semana (1/7). As soluções otimizadas obtiveram valores variados, com frequências, variando de 1/6,71 de viagem/dias a 1/6,98, praticamente, uma viagem por semana. Na rota 4.1, houve uma pequena flutuação entre as frequências de trânsito achadas, com valores em torno de uma viagem a cada 3,61 dias. O valor mínimo desta rota é de uma viagem a cada 4 dias.

A rota 9 obteve dois valores distintos de frequência. As soluções A, B e D obtiveram a frequência para trânsito, nesta rota de uma viagem a cada 19,7 dias. Um ganho de 10 dias

Tabela 48: Solução A do problema 2. São necessários 42 navios.

Variáveis de decisão: $x_{ij}$ (navios)						
x1.1p1.2	x1.1p2	x1.1p3	<u>Rota 1.1</u>	x1.2p10.1	<u>Rota 1.2</u>	x2p1.1
4	3	1	8	1	1	6
x2p2	<u>Rota 2</u>	x3p2	x3p3	x3p9	<u>Rota 3</u>	x4.1p1.1
1	7	3	4	2	9	1
x4.1p1.2	x4.1p2	x4.1p3	x4.1p4.1	<u>Rota 4.1</u>	x9p1.1	x9p3
4	2	1	2	10	1	1
<u>Rota 9</u>	x10.1p4.1	x10.1p10.1	<u>Rota 10.1</u>	-	-	-
2	1	4	5			
Variáveis de decisão: $b_i$ e $e_i$ (navios/dia)						
$b_{1.1}$	$b_{1.2}$	$b_2$	$b_3$	$b_{4.1}$	$b_9$	$b_{10.1}$
0,2504652	0,2380952	0,2127657	0,1490680	0,2770208	0,0507614	1,126984
1 navio a cada 4 dias	1 navio a cada 4,2 dias	1 navio a cada 4,7 dias	1 navio a cada 6,71 dias	1 navio a cada 3,61 dias	1 navio a cada 19,7 dias	1 navio a cada 0,89 dias
$e_{1.1}$	$e_{1.2}$	$e_2$	$e_3$	$e_{4.1}$	$e_9$	$e_{10.1}$
-0,0151657	0,0010248	0,00889304	-0,00689034	0,0161708	-0,0040326	0

em relação à frequência original, que é de 1/30 viagem/dias. A solução C do problema 2 obteve a frequência de 1/13,53 de viagem/dias. Um impressionante ganho de frequência de quase 17 dias em relação à frequência original. Mas, analisar o ganho somente sob este ângulo pode ser enganoso. Esta rota não possui muita demanda de carga e frequentá-la, muitas vezes, pode causar prejuízo ao armador, com encargos portuários que não serão cobertos pela quantidade de carga transportada.

A rota 10.1 tem a frequência mínima de um navio por dia. Os valores encontrados nas soluções ficam em torno de uma viagem a cada 0,9 dias.

A minimização de navios, nesta rota, foi de - 1 navio em relação às rotas triviais. O ganho de sinergia que possibilitou a redução da frota ocorreu na rota 1.1, onde foi diminuído de 9 para 8 navios necessários.

Apesar de apenas um navio ter sido retirado, o ganho de sinergia entre as rotas foi grande. Um caso especial foi a sinergia entre as rotas 3 e rota 9, que se complementaram. Tais rotas foram construídas dessa forma para se verificar se, realmente, o modelo conseguiria unificá-las. É importante verificar se o modelo funciona perfeitamente com rotas mais fragmentadas e se ele consegue encontrar sistemas de rotas mais eficientes a partir desses fragmentos. Dessa forma, como foi explicado no capítulo 3, deduziu-se que para modelar a rota de Nova York de forma mais realista, é necessário quebrá-la em 4 rotas distintas, sendo que uma delas incluiria a rota de Porto Rico.

Tabela 49: Solução B do problema 2. São necessários 42 navios.

Variáveis de decisão: $x_{ij}$ (navios)						
x1.1p1.2	x1.1p3	x1.1p4.1	<u>Rota 1.1</u>	x1.1p10.1	<u>Rota 1.2</u>	x2p3
6	1	1	8	1	1	1
x2p4.1	<u>Rota 2</u>	x3p2	x3p3	x3p9	<u>Rota 3</u>	x4.1p1.2
6	7	6	1	2	9	2
x4.1p2	x4.1p3	x4.1p4.1	<u>Rota 4.1</u>	x9p2	<u>Rota 9</u>	x10.1p1.1
3	3	2	10	2	2	1
x10.1p10.1	<u>Rota 10.1</u>	-	-	-	-	-
4	5					
Variáveis de decisão: $b_i$ e $e_i$ (navios/dia)						
$b_{1.1}$	$b_{1.2}$	$b_2$	$b_3$	$b_{4.1}$	$b_9$	$b_{10.1}$
0,2526210	0,2380952	0,2127657	0,1490680	0,2762514	0,0507614	1,126984
1 navio a cada 3,96 dias	1 navio a cada 4,2 dias	1 navio a cada 4,7 dias	1 navio a cada 6,71 dias	1 navio a cada 3,62 dias	1 navio a cada 19,7 dias	1 navio a cada 0.89 dias
$e_{1.1}$	$e_{1.2}$	$e_2$	$e_3$	$e_{4.1}$	$e_9$	$e_{10.1}$
-0,0145258	0,0088532	0,00835958	0,00936082	-0,0080152	-0,0040326	0

Tabela 50: Solução C do problema 2. São necessários 42 navios.

Variáveis de decisão: $x_{ij}$ (navios)						
x1.1p1.1	x1.1p1.2	x1.1p3	<u>Rota 1.1</u>	x1.2p10.1	<u>Rota 1.2</u>	x2p2
1	4	3	8	1	1	2
x2p3	x2p10.1	<u>Rota 2</u>	x3p2	x3p4.1	x3p9	<u>Rota 3</u>
1	4	7	2	3	3	8
x4.1p1.2	x4.1p2	x4.1p3	<u>Rota 4.1</u>	x9p10.1	<u>Rota 9</u>	x10.1p1.1
4	5	1	10	3	3	1
x10.1p4.1	x10.1p10.1	<u>Rota 10.1</u>	-	-	-	-
1	3	5				
Variáveis de decisão: $b_i$ e $e_i$ (navios/dia)						
$b_{1.1}$	$b_{1.2}$	$b_2$	$b_3$	$b_{4.1}$	$b_9$	$b_{10.1}$
0,2504652	0,2380952	0,2127657	0,1431926	0,2770208	0,0738915	1,142857
1 navio a cada 4 dias	1 navio a cada 4,2 dias	1 navio a cada 4,7 dias	1 navio a cada 6,98 dias	1 navio a cada 3,61 dias	1 navio a cada 13,53 dias	1 navio a cada 0,88 dias
$e_{1.1}$	$e_{1.2}$	$e_2$	$e_3$	$e_{4.1}$	$e_9$	$e_{10.1}$
0,0183992	0,0010248	0,01500526	0,0070583	0,00493404	-0,0037983	-0,0426233

Tabela 51: Solução D do problema 2. São necessários 42 navios.

Variáveis de decisão: $x_{ij}$ (navios)						
x1.1p1.2	x1.1p10.1	<u>Rota 1.1</u>	x1.2p10.1	<u>Rota 1.2</u>	x2p3	x2p10.1
4	4	8	1	1	3	4
<u>Rota 2</u>	x3p2	x3p3	x3p9	<u>Rota 3</u>	x4.1p1.1	x4.1p1.2
7	4	3	2	9	1	3
x4.1p2	x4.1p3	<u>Rota 4.1</u>	x9p1.2	x9p4.1	<u>Rota 9</u>	x10.1p1.1
5	1	10	1	1	2	1
x10.1p4.1	x10.1p10.1	<u>Rota 10.1</u>	-	-	-	-
1	3	5				
Variáveis de decisão: $b_i$ e $e_i$ (navios/dia)						
$b_{1.1}$	$b_{1.2}$	$b_2$	$b_3$	$b_{4.1}$	$b_9$	$b_{10.1}$
0,2508448	0,2380952	0,2127657	0,1490680	0,2766361	0,0512874	1,142857
1 navio a cada 3,99 dias	1 navio a cada 4,2 dias	1 navio a cada 4,7 dias	1 navio a cada 6,71 dias	1 navio a cada 3,61 dias	1 navio a cada 19,5 dias	1 navio a cada 0,88 dias
$e_{1.1}$	$e_{1.2}$	$e_2$	$e_3$	$e_{4.1}$	$e_9$	$e_{10.1}$
0,0147986	-0,0010014	-0,01654518	0,01352518	-0,0131602	-0,0045586	0,0069416

Das soluções alternativas, a solução D possui 15 designações para rotas diferentes, aproveitando melhor esta rede marítima. As soluções A e C obtiveram 14 designações para outras rotas e a solução B teve 13. Veja na figura 14 a seqüência de rotas encontradas na solução D do problema 2.

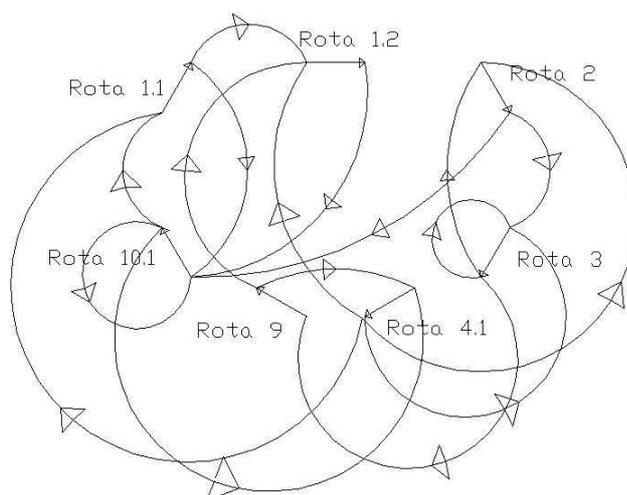


Figura 14: Seqüência de rotas para a solução 2-D.

A quantidade de iterações necessárias para se obter as soluções A, B, C e D do problema 2, bem como o tempo de processamento estão expostas a seguir:

Solução A (menos de 1 seg):

**Extended solver steps:** 0

**Total solver iterations:** 277

Solução B (menos de 1 seg):

**Extended solver steps:** 119

**Total solver iterations:** 820

Solução C (menos de 1 seg):

**Extended solver steps:** 3

**Total solver iterations:** 285

Solução D (5 seg):

**Extended solver steps:** 8985

**Total solver iterations:** 37046

### 4.3.3 Solução do problema 3

As tabelas 52, 53, 54 e 55 mostram, respectivamente, as soluções A, B, C e D do problema 3. Este problema é composto do sistema de alimentação do transporte marítimo do sudeste asiático, mais as rotas 5 e 6, respectivamente, que conectam o Extremo Oriente com a Austrália e o Oriente Médio. A solução ótima obteve uma frota ótima de 28 navios para cumprir as rotas deste sistema, 2 navios a menos que a solução obtida pelas rotas óbvias.

As frequências da rota 5 variaram em torno de uma viagem a cada 9,1 dia. Quase um dia da frequência mínima do rota 5, 1/10 viagens por dia. A rota 6 obteve frequências em torno de uma viagem a cada 10,50 dias, sendo que o valor estipulado para ser a frequência mínima da rota 6 foi uma viagem a cada 11,1 dia.

Todas as soluções da rota 10.1 foram uma viagem a cada 0,9 dias, sendo que o limite inferior da frequência desta rota é um navio por dia. A frequência mínima do rota 10.2 é de um navio a cada 6 dias. As soluções A, B e D obtiveram a frequência de 1/5,45 de

Tabela 52: Solução A do problema 3. São necessários 28 navios.

Variáveis de decisão: $x_{ij}$ (navios)						
x5p10.2	x5p10.4	x5p10.5	<u>Rota 5</u>	x6p6	x6p10.2	x6p10.3
1	3	1	5	2	1	2
<u>Rota 6</u>	x10.1p10.1	<u>Rota 10.1</u>	x10.2p10.5	<u>Rota 10.2</u>	x10.3p5	x10.3p10.3
5	5	5	2	2	3	1
<u>Rota 10.3</u>	x10.4p10.2	x10.4p10.3	<u>Rota 10.4</u>	x10.5p6	x10.5p10.2	x10.5p10.4
4	1	1	2	1	1	2
x10.5p10.5	<u>Rota 10.5</u>	-	-	-	-	-
1	5					
Variáveis de decisão: $b_i$ e $e_i$ (navios/dia)						
$b_5$	$b_6$	$b_{10.1}$	$b_{10.2}$	$b_{10.3}$	$b_{10.4}$	$b_{10.5}$
0,1090289	0,0944203	1,111111	0,1834862	0,1506501	0,1652892	0,2713174
1 navio a cada 9,17 dias	1 navio a cada 10,59 dias	1 navio a cada 0,9 dias	1 navio a cada 5,45 dias	1 navio a cada 6,64 dias	1 navio a cada 6,05 dias	1 navio a cada 3,69 dias
$e_5$	$e_6$	$e_{10.1}$	$e_{10.2}$	$e_{10.3}$	$e_{10.4}$	$e_{10.5}$
0,0086179	-0,0018317	0	-0,0089033	0,0024508	0,0046401	-0,0049738

viagem/dia, enquanto a solução C obteve uma solução próxima de uma viagem a cada 5,52 dias.

Os valores das soluções da rota 10.3 foram mais diversos, variando entre 1/6,58 a 1/6,98 viagem por dia, próximo do valor mínimo desta rota, que é uma viagem por semana. A rota 10.4 possui o mesmo valor mínimo de frequência que a rota 10.3, 1/7 e suas soluções A, B e D foram iguais a 1/6,05 viagens por dia, um ganho de quase um dia. A solução C desta rota foi de 1/5,8 viagens por dia, um pouco maior que as outras soluções, mas nada significativo.

A rota 10.5 também obteve pouco ganho na frequência de trânsito, com partidas nesta rota variando de 3,48 a 3,72 dias.

Neste problema, as rotas em que houve redução do número de navios foram as rotas 10.2 e 10.3, com redução de uma embarcação em cada rota. No caso da rota 10.2, em todas as soluções, a rota designada a seguir foi a rota 10.5, sendo que no caso da solução C, a rota 5, também, foi designada como a próxima rota. Já no caso da rota 10.3 cada solução obteve um roteamento diferente para maximizar a eficiência das rotas.

A solução que obteve melhor aproveitamento da rede de designações para outras rotas foi a solução B, com 12 apontamentos. As soluções A e C designam 11 rotas diferentes para seus navios, e a solução D, apenas 9 apontamentos. Veja na figura 15 a seqüência

Tabela 53: Solução B do problema 3. São necessários 28 navios.

Variáveis de decisão: $x_{ij}$ (navios)						
x5p10.3	x5p10.4	<u>Rota 5</u>	x6p10.2	x6p10.3	<u>Rota 6</u>	x10.1p10.1
2	3	5	1	4	5	5
<u>Rota 10.1</u>	x10.2p10.5	<u>Rota 10.2</u>	x10.3p5	x10.3p6	x10.3p10.3	x10.3p10.5
5	2	2	1	1	1	1
<u>Rota 10.3</u>	x10.4p10.2	<u>Rota 10.4</u>	x10.5p5	x10.5p6	x10.5p10.4	x10.5p10.5
4	2	2	1	1	2	1
<u>Rota 10.5</u>	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-
Variáveis de decisão: $b_i$ e $e_i$ (navios/dia)						
$b_5$	$b_6$	$b_{10.1}$	$b_{10.2}$	$b_{10.3}$	$b_{10.4}$	$b_{10.5}$
0,1090769	0,0936325	1,111111	0,1834862	0,1433478	0,1652892	0,2871494
1 navio a cada 9,17 dias	1 navio a cada 10,68 dias	1 navio a cada 0,9 dias	1 navio a cada 5,45 dias	1 navio a cada 6,98 dias	1 navio a cada 6,05 dias	1 navio a cada 3,48 dias
$e_5$	$e_6$	$e_{10.1}$	$e_{10.2}$	$e_{10.3}$	$e_{10.4}$	$e_{10.5}$
-0,0027473	-0,0049205	0	0,0005295	0,0084211	0,0046401	-0,0059229

Tabela 54: Solução C do problema 3. São necessários 28 navios.

Variáveis de decisão: $x_{ij}$ (navios)						
x5p10.2	x5p10.3	<u>Rota 5</u>	x6p5	x6p10.3	<u>Rota 6</u>	x10.1p10.1
4	1	5	1	4	5	5
<u>Rota 10.1</u>	x10.2p5	x10.2p10.5	<u>Rota 10.2</u>	x10.3p6	x10.3p10.5	<u>Rota 10.3</u>
5	1	1	2	1	3	4
x10.4p10.4	<u>Rota 10.4</u>	x10.5p6	x10.5p10.2	x10.5p10.3	x10.5p10.5	<u>Rota 10.5</u>
2	2	1	2	1	1	5
Variáveis de decisão: $b_i$ e $e_i$ (navios/dia)						
$b_5$	$b_6$	$b_{10.1}$	$b_{10.2}$	$b_{10.3}$	$b_{10.4}$	$b_{10.5}$
0,1096490	0,0954398	1,111111	0,1810288	0,1446583	0,1724136	0,2691694
1 navio a cada 9,12 dias	1 navio a cada 10,48 dias	1 navio a cada 0,9 dias	1 navio a cada 5,52 dias	1 navio a cada 6,91 dias	1 navio a cada 5,8 dias	1 navio a cada 3,72 dias
$e_5$	$e_6$	$e_{10.1}$	$e_{10.2}$	$e_{10.3}$	$e_{10.4}$	$e_{10.5}$
0,0001705	-0,0067278	0	0,0092544	0,0034595	0	-0,0061566

Tabela 55: Solução D do problema 3. São necessários 28 navios.

Variáveis de decisão: $x_{ij}$ (navios)						
x5p10.4	Rota 5	x6p10.4	x6p10.5	Rota 6	x10.1p10.1	Rota 10.1
5	5	3	1	5	5	5
x10.2p10.5	Rota 10.2	x10.3p5	x10.3p6	Rota 10.3	x10.4p10.2	Rota 10.4
2	2	3	1	4	2	2
x10.5p6	x10.5p10.3	x10.5p10.5	Rota 10.5	-	-	-
1	3	1	5			
Variáveis de decisão: $b_i$ e $e_i$ (navios/dia)						
$b_5$	$b_6$	$b_{10.1}$	$b_{10.2}$	$b_{10.3}$	$b_{10.4}$	$b_{10.5}$
0,1086955	0,0952782	1,111111	0,1834862	0,1520110	0,1652892	0,2691694
1 navio a cada 9,2 dias	1 navio a cada 10,50 dias	1 navio a cada 0,9 dias	1 navio a cada 5,45 dias	1 navio a cada 6,58 dias	1 navio a cada 6,05 dias	1 navio a cada 3,72 dias
$e_5$	$e_6$	$e_{10.1}$	$e_{10.2}$	$e_{10.3}$	$e_{10.4}$	$e_{10.5}$
0,0089513	-0,0065662	0	0,0005295	0,0018350	0,0001168	-0,0048664

de rotas encontradas na solução B do problema 3.

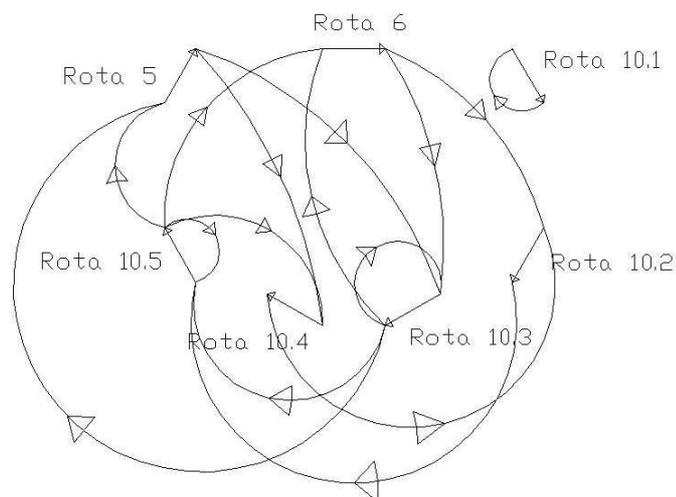


Figura 15: Sequência de rotas para a solução 3-B.

A quantidade de iterações necessárias para se obter as soluções A, B, C e D do problema 3, bem como o tempo de processamento estão expostas a seguir:

Solução A (menos de 1 seg):

**Extended solver steps:** 57

**Total solver iterations:** 2277

Solução B (menos de 1 seg):

**Extended solver steps:** 369

**Total solver iterations:** 2942

Solução C (2 seg):

**Extended solver steps:** 1617

**Total solver iterations:** 12406

Solução D (5 seg):

**Extended solver steps:** 6917

**Total solver iterations:** 43495

A seguir, na próxima seção, iremos explicar como estimar as velocidades ideais para cada rota, usando as variáveis de acoplamento de frequência,  $b_i$ .

## 4.4 As velocidades ideais para cada rota

A tabela 56 mostra as velocidades de re-rotas calculadas para as soluções: B do problema 1, D do problema 2 e B do problema 3.

Notamos que as soluções mostradas na tabela 56 têm variações pequenas nas velocidades de -1 a +1,3 nós. Isso pode indicar que o limite imposto às variáveis  $e_i$  pode ser relaxado muito mais e, talvez, até mesmo abolido, deixando tais variáveis livres. Isso porque o valor das velocidades ideais para transitar as rotas no arco 'ij' completo será menor

Tabela 56: Velocidades ideais de roteamento para ir à rota 'j', após completar uma determinada rota.

Velocidade em nós das re-rotas para Solução B do problema 1						
$V_r(1.1)$	$V_{re-rota}(2)$	$V_r(4.2)$	$V_r(5)$	$V_r(7)$	$V_r(8)$	$V_r(10.2)$
15,1	15,4	15,4	13,7	14,0	15,0	15,3
Velocidade em nós das re-rotas para Solução D do problema 2						
$V_r(1.1)$	$V_r(1.2)$	$V_r(2)$	$V_r(3)$	$V_r(4.1)$	$V_{re-rota}(9)$	$V_r(10.1)$
14,1	15,1	16,2	13,7	15,7	16,3	14,9
Velocidade em nós das re-rotas para Solução B do problema 3						
$V_r(5)$	$V_r(6)$	$V_r(10.1)$	$V_r(10.2)$	$V_r(10.3)$	$V_r(10.4)$	$V_r(10.5)$
15,4	15,8	15	15	14,2	14,6	15,3

que as velocidades de re-rotas. Essa sugestão ficará registrada para pesquisas futuras na conclusão.

As velocidade ideais para transitar as rotas no arco 'ij' estão dispostas na tabela 57.

Tabela 57: Velocidades ideais para trânsito das rotas compostos pelos arcos 'ij'.

Velocidade ideal em nós para Solução B do problema 1				
$V_{ideal}(1.1p8)$	$V_{ideal}(2p10.2)$	$V_{ideal}(4.2p2)$	$V_{ideal}(4.2p5)$	$V_{ideal}(5p8)$
15	15.2	15.2	14.5	15
$V_{ideal}(5p10.2)$	$V_{ideal}(7p1.1)$	$V_{ideal}(8p4.2)$	$V_{ideal}(8p7)$	$V_{ideal}(10.2p1.1)$
15.1	15	15	14.7	15.1
$V_{ideal}(10.2p2)$	$V_{ideal}(10.2p5)$	-	-	-
15.2	14.7			
Velocidade ideal em nós para Solução D do problema 2				
$V_{ideal}(1.1p1.2)$	$V_{ideal}(1.1p10.1)$	$V_{ideal}(1.2p10.1)$	$V_{ideal}(2p3)$	$V_{ideal}(2p10.1)$
15.1	15	15	14.4	15
$V_{ideal}(3p2)$	$V_{ideal}(3p9)$	$V_{ideal}(4.1p1.1)$	$V_{ideal}(4.1p1.2)$	$V_{ideal}(4.1p2)$
15.5	15.1	14.6	15.1	15.6
$V_{ideal}(4.1p3)$	$V_{ideal}(9p1.2)$	$V_{ideal}(9p4.1)$	$V_{ideal}(10.1p1.1)$	$V_{ideal}(10.1p4.1)$
14.4	15.1	15.6	14.6	15.3
Velocidade ideal em nós para Solução B do problema 3				
$V_{ideal}(5p10.3)$	$V_{ideal}(5p10.4)$	$V_{ideal}(6p10.2)$	$V_{ideal}(6p10.3)$	$V_{ideal}(10.2p10.5)$
14.7	14.9	15	14.6	15.1
$V_{ideal}(10.3p5)$	$V_{ideal}(10.3p6)$	$V_{ideal}(10.3p10.5)$	$V_{ideal}(10.4p10.2)$	$V_{ideal}(10.5p5)$
15.1	15.3	15.1	15	15.2
$V_{ideal}(10.5p6)$	$V_{ideal}(10.5p10.4)$	-	-	-
15.4	14.8			

Lembrando que as velocidades da tabela 57 são referentes à solução B do problema 1, D do problema 2 e B do problema 3. As distâncias usadas para fazer os cálculos das velocidades ideais estão contidas no apêndice B, e os pares de portos para re-locação das rotas estão contidos no apêndice C. Lembrando que os navios que fazem suas rotas óbvias têm a velocidade ideal igual a velocidade de base, neste caso: 15 nós.

## *Conclusões e recomendações para futuras pesquisas*

O transporte marítimo é o maior meio de transporte do mundo, logo deve possuir uma rede marítima eficiente e confiável. O agendamento e roteamento de navios é a parte mais elaborada e significativa do gerenciamento e planejamento da frota em qualquer sistema de transporte marítimo. Nesse processo, deve-se designar o itinerário de viagem para cada navio e decidir as rotas que estes devem cumprir. Além disso, é necessário determinar de modo eficiente o tamanho do navio, velocidade, tamanho da frota, número de navios extras alugados (time-chartered), número de espaço de carga alugado em navios de outras companhias (spot-chartered), se é lucrativo ou não alugar um navio ou não.

A literatura levantada nos sistemas de transporte marítimo indica que existe uma escassez de pesquisa em problemas de tamanho de frota e roteamento. Vários são os elementos que contribuem para essa escassez, mas a complexidade desses problemas contribui fortemente. A complexidade pode ser atribuída a fatores, tais como: (1) os problemas de roteamento ou agendamento de frota envolvem uma grande variedade de estruturas e condições operacionais, (2) e como esses problemas de roteamento de navios envolve a seleção de rotas, agendar e determinar o número de navios necessários para cumprir determinadas demandas, as formulações desses problemas são feitas com modelos de programação inteira mista, que são notoriamente difíceis, e além disso, (3) os roteamento e agendamentos de navios possuem uma alto grau de incerteza, como por exemplo, condições meteorológicas severas e problemas mecânicos.

Esta pesquisa foi realizada para se iniciar os estudos na otimização marítima em relação ao problema de tamanho de frota e roteamento eficiente de rotas para os navios. Este problema é clássico e tem grande significativo econômico, no que concerne a avaliação do uso eficaz da frota e verificação da saturação de rotas reais, ao comparar o sistema real com este modelo simplificado. Este modelo foi formulado como um programa inteiro misto e leva em consideração o roteamento de uma frota homogênea de navios, a quantidade mínima de navios para cumprir a frequência de tráfego em determinada rota, qual deve ser a frequência de trânsito e em qual velocidade.

A eficácia do modelo foi obtida, ao resolver 3 problemas baseados nas rotas da antiga companhia, Y.S. Line. As soluções foram obtidas ao resolver o modelo em um pacote comercial, com a formulação dos problemas sendo de pequena escala, com 7 rotas apenas. Foi notada que mesmo nesses pequenos problemas, caso as restrições das variáveis não sejam bem feitas, a resolução do modelo pode demorar a convergir.

O modelo proposto obtém resultados de qualidade no que se propõe, e mais pesquisas para melhorar o desempenho dos sistemas marítimo devem ser construídos, mais breve do que se imagina, caso a demanda por eficiência no setor cresça.

### **Pesquisa futura e recomendações.**

Este modelo pode incorporar características para formação de frota composta de navios, como sugerido no capítulo 2. Recomenda-se testar o modelo proposto, incorporando o roteamento para frotas homogêneas múltiplas.

Naquele mesmo capítulo foi usado uma análise de sensibilidade pelos preços duais no modelo original de Dantzig e Fulkerson. Sugere-se verificar se este tipo de análise é sempre verdadeiro para qualquer problema formulado pelo modelo original de Dantzig-Fulkerson.

Outra recomendação importante é construir um modelo de grande escala, sem as simplificações feitas neste trabalho e comparar se as rotas da antiga Y.S. Line podiam ser melhoradas. Esta nova formulação do problema da Y.S. Line deve considerar o tempo real gasto nos portos, de acordo com sua eficiência na época e incorporar as características de frota mista, separando o tráfego containerizado, do de carga geral e sistemas alimentadores. Como o tamanho do modelo irá aumentar, um algoritmo dedicado para sua resolução pode ser construído.

E finalmente sugere-se verificar a sensibilidade de limitar muito ou pouco as variáveis,  $e_i$ , podendo até mesmo deixá-las como variáveis livres sem a restrição de variáveis canalizadas.

## *Referências*

- AL-YAKOOB, S. M. *Mixed-Integer Mathematical Programming Optimization Models And Algorithms For An Oil Tanker Routing And Scheduling Problem*. Tese (Doutorado) — Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 1997.
- BAZARAA, M. S.; JARVIS, J. J.; SHERALI, H. D. *Linear Programming and Network flows*. 3ª edição. ed. [S.l.]: Wiley Interscience, 2005. ISBN 0-471-48599-3.
- BENDALL, H. B.; STENT, A. F. A scheduling model for a high speed containership service: A hub and spoke short-sea application. *International Journal of Maritime Economics*, v. 3, n. 3, p. 262–277, 2001.
- BLAND, R. G.; ORLIN, J. B. IFORS' Operational Research Hall of Fame Delbert Ray Fulkerson. *International Transactions in Operational Research*, n. 12, p. 367–372, 2005.
- BREMER, W. M.; PERAKIS, N. An operational tanker scheduling optimization system: Model implementation, results and possible extensions. *Maritime Policy and Management*, v. 3, n. 19, p. 189–199, 1992.
- BRISKIN, L. E. Selecting delivery dates in the tanker scheduling problem. *Management Science*, n. 12B, p. 224–233, 1966.
- BROWN, G. G.; GRAVES, G. W.; RONEN, D. Scheduling ocean transportation of crude oil. *Management Science*, v. 3, n. 33, p. 335–346, 1987.
- BUTCHERS, E. R. et al. Optimized crew scheduling at air new zealand. *Interfaces*, v. 1, n. 31, p. 30–56, 2001.
- CHO, S. C.; PERAKIS, A. N. Optimal liner fleet routeing strategies. *Maritime Policy and Management*, v. 3, n. 23, p. 249–259, 1996.
- CHO, S. C.; PERAKIS, A. N. An improved formulation for bulk cargo ship scheduling with a single loading port. *Maritime Policy and Management*, v. 4, n. 28, p. 339–345, 2001.
- CHRISTIANSEN, M.; FAGERHOLT, K. Robust ship scheduling with multiple time windows. *Naval Research Logistic*, v. 6, n. 49, p. 611–625, 2002.
- CHRISTIANSEN, M.; FAGERHOLT, K.; RONEN, D. Ship routing and scheduling - status and perspectives. *Transportation Science*, v. 38, n. 1, p. 1–18, February 2004.
- CHRISTOFIDES, N. et al. *Combinatorial Optimization*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1978.
- CHRZANOWSKI, I. *An Introduction to Shipping Economics*. [S.l.]: Fairplay Publication, 1985.

- CRARY, M.; NOZICK, L. K.; WHITAKER, L. R. Sizing the U.S. destroyer fleet. *European Journal of Operational Research*, v. 136, n. 680-695, 2002.
- DANTZIG, G. B.; FULKERSON, D. R. Minimizing the number of tankers to meet a fixed schedule. *Naval Research Logistics Quarterly*, n. 1, p. 217–222, 1954.
- DANTZIG, G. B.; FULKERSON, D. R.; JOHNSON, S. Solution of a large-scale traveling salesman problem. *Operations Research*, n. 2, p. 393–410, 1954.
- E.C.L.A.C. *Concentration in Liner Shipping. Its causes and impacts for ports and shipping services in Developing Regions*. [S.l.], 20 de maio 1998.
- FAGERHOLT, k. Optimal fleet design in a ship routing problem. *International Transportation Operation Research*, v. 5, n. 6, p. 453–464, 1999.
- FAGERHOLT, K. Ship scheduling with soft time windows - na optimisation based approach. *European Journal of Operational Research*, n. 131, p. 559–571, 2001.
- FAGERHOLT, K.; CHRISTIANSEN, M. A combined ship scheduling and allocation problem. *Journal of Operational Research Society*, v. 7, n. 51, p. 834–842, 2000–A.
- FAGERHOLT, K.; CHRISTIANSEN, M. A traveling salesman problem with allocation, time window and precedence constraints - an application to ship scheduling. *International Transactions in Operational Research*, v. 3, n. 7, p. 231–244, 2000–B.
- FAGERHOLT, K.; LINDSTAD, H. Optimal policies for maintaining a supply service in the norwegian sea. *OMEGA*, n. 28, p. 269–275, 2000.
- FAGERHOLT, K.; RYGH, B. Design of a sea-borne system for fresh water transport - a simulation analysis. *Belgian Journal of Operation Research and Statistic Computational Science*, v. 3-4, n. 40, p. 137–146, 2002.
- GARFINKEL, R. S.; NEMHAUSER, G. L. *Integer Programming*. New York: John Wiley & Sons, 1972.
- GREGORY, K. V. *Economies of scale in international liner shipping and ongoing industry consolidation: an application of Stigler's survivorship principle*. Dissertação (Marter of arts in Economics) — Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 2000.
- HARALAMBIDES, H.; VEENSTRA, A. W. Modeling performance in liner shipping. *Handbook of Transport Modeling*, 2000.
- HTTP://WWW.BUSINESS.COM. *Navix Line, Ltd. Information*. [http://www.business.com/directory/ ... /navix\\_line,\\_ltd/](http://www.business.com/directory/.../navix_line,_ltd/). Página da internet, acessado dia 12 de julho de 2006.
- HTTP://WWW.MOL.CO.JP. *Mitsui O.S.K. Lines: about MOL. History*. <http://www.mol.co.jp/history.shtml>. Página da internet, acessado dia 12 de julho de 2006.
- IMAI, A.; RIVERA, F. Strategic fleet size planning for maritime refrigerated containers. *Maritime Policy and Management*, v. 4, n. 28, p. 361–374, 2001.

- I.S.L. *Shipping Statistics and Market Review*. Bremen, Germany, 2001.
- JANSON, J. O.; SHNEERSON, D. The optimal ship size. *Journal of Transport Economics and Policy*, v. 3, n. 16, p. 217–238, 1982.
- JARAMILLO, D. I.; PERAKIS, A. N. Fleet deployment optimization for liner shipping, part 2: Implementation and results. *Maritime Policy and Management*, v. 4, n. 18, p. 235–262, 1991.
- JEROSLOW, R. G. et al. Gainfree leontief substitution flow problems. *Mathematical Programming*, v. 57, p. 375–414, 1992.
- LADERMAN, J.; GLEIBERMAN, L.; EGAN, J. F. Vessel allocation by linear programming. *Naval Research Logistics Quarterly*, n. 12, p. 315–320, 1966.
- LARSON, R. C. Transporting sludge to the 106-mile site: An inventory/routing model for fleet sizing and logistics system design. *Transportation Science*, v. 3, n. 22, p. 186–198, 1988.
- LEVY, V. D.; LVOV, S. P.; LOVETSKY, S. E. Man-machine systems for merchant fleet operation scheduling. In: INSTITUTE FOR SYSTEM SCIENCE RESEARCH. *Proc. 7th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*. [S.l.], 1977. p. 823–836.
- LOBO, P. R. V.; SOARES, C. A. *Meteorologia e Oceanografia. Usuário Navegante*. [S.l.]: Diretoria de Portos e Costas, 1999.
- LOVÁSZ, L.; PELIKÁN, J.; VESZTERGOMBI, K. *Matemática discreta*. Primeira edição. [S.l.]: Sociedade brasileira de matemática, 2003. Tradução: Ruy de Queiros (UFPe). ISBN 85-85818-28-X.
- MACULAN, N.; FAMPA, M. *Otimização Linear*. [S.l.]: UnB, 2006.
- MEHREZ, A.; HUNG, M. S.; AHN, B. H. An industrial ocean-cargo shipping problem. *Decision Science*, v. 3, n. 26, p. 395–423, 1995.
- MIGUENS, A. P. *Navegação Costeira e Estimada - A ciência e a arte*. [S.l.]: Marinha do Brasil, Hidrografia e Navegação, 1993.
- PANAGIOTIS, T. *A multi-stage decision support methodology for the optimization-based liner-network design*. June 2005. Dissertação de graduação em Arquitetura naval e Engenharia marítima da Escola naval de Arquitetura e Engenharia Marinha da Universidade Nacional Técnica de Atenas.
- PERAKIS, A. N.; JARAMILLO, D. I. Fleet deployment optimization for liner shipping, part 1: Background, problem formulation and solution approaches. *Maritime Policy and Management*, v. 3, n. 18, p. 183–200, 1991.
- PERAKIS, N.; BREMER, W. M. An operational tanker scheduling optimization system: Background, current practice and model formulation. *Maritime Policy and Management*, v. 4, n. 19, p. 177–187, 1992.

- PESENTI, R. Hierarchical resource planning for shipping companies. *Europe Journal of Operational Research*, n. 86, p. 91–102, 1995.
- POWEL, B. J.; PERAKIS, A. N. Fleet deployment optimization for liner shipping: An integer programming model. *Maritime Policy and Management*, v. 2, n. 24, p. 183–192, 1997.
- RAO, M. R.; ZIONTS, S. Allocation of transportation units to alternative trips, a column generation scheme with out-of-kilter subproblems. *Operations Research*, n. 16, p. 52–63, 1968.
- RICHETTA, O.; LARSON, R. C. Modeling the increased complexity of new york city's refuse marine transport system. *Transportation Science*, v. 3, n. 31, p. 272–293, 1997.
- RONEN, D. Cargo ships routing and scheduling: Survey of models and problems. *European Journal of Operational Research*, n. 12, p. 119–126, 1983.
- RONEN, D. Short-term scheduling of vessels for shipping bulk or semi-bulk commodities originating in a single area. *Operational Research*, v. 1, n. 34, p. 164–173, 1986.
- RONEN, D. Ship scheduling: The last decade. *European Journal of Operational Research*, n. 71, p. 325–333, 1993.
- SALDANHA, J.; GRAY, R. The potential for british coastal shipping in a multimodal chain. *Maritime Policy and Management*, v. 1, n. 29, p. 77–92, 2002.
- SCHRAGE, L. *Optimization Modeling with LINGO*. 5ª edição. ed. [S.l.]: Lindo Systems Inc., 2003. ISBN 1-893355-00-4.
- SOPFORD, M. *Maritime Economics*. [S.l.]: UNWIN HYMAN, 1988.
- VIANA, V. *Meta-Heurísticas e Programação paralela em Otimização Combinatória*. Primeira edição. [S.l.]: UFC Edições, 1998. ISBN 85-7282-039-6.
- XINLIAN, X.; TANGFEI, W.; DAISONG, C. A dynamic model and algorithm for fleet planning. *Maritime Policy and Management*, v. 1, n. 27, p. 53–63, 2000.
- YAMASHITA-SHINNIHON-STEAMSHIP-CO. *Y S Line - Container Service*. Julho 1981. Services provided in July, 1981.

## 5 *Apêndice A - Visão geral do meio marítimo.*

Este apêndice contém grande parte da sua informação extraída dos seguintes livros: *An Introduction to Shipping Economics* (CHRZANOWSKI, 1985) e *Maritime Economics* (SOPFORD, 1988).

O transporte marítimo é o maior meio de transporte de carga e atende grande parte do comércio mundial. Mais de 75 % de todas as cargas exportadas, no mundo, são através do mar. Esse percentual mostra claramente a significância do transporte pelo mar como o mais importante meio de transporte. Qualquer mudança de direção nesse comércio repercute no transporte marítimo e portos. Contudo, o contrário é também verdade: qualquer desenvolvimento nas operações marítimas e *design* dos navios influenciam o movimento de bens pelo mar no curto ou longo prazo. A relação entre o transporte marítimo e o comércio mundial é crucial e precisa sempre ser lembrado em qualquer análise econômica dessas duas facetas do mundo econômico (CHRZANOWSKI, 1985).

Apesar de recessões ocasionais, o comércio marítimo continua em ascensão. Em 1980 o volume de carga transportada foi quase 3 vezes maior do que em 1962. Contudo a estagnação continuada da economia mundial, durante a década de 70, fez cair o volume de comércio mundial de aproximadamente 3,8 bilhões de toneladas em 1979 para 3,2 bilhões de toneladas em 1982, algo em torno de 16 %. Mas em 1991, o comércio marítimo cresceu 11 % sobre o período de 1980 (RONEN, 1993).

O transporte marítimo não é homogêneo e existem vários tipos de classificação de operações marítimas. Contudo, uma classificação mais clássica e criteriosa é quanto ao tipo de operação de transporte. Podemos dividir os serviços de transporte em quatro categorias principais:

- Transporte de passageiros
- Serviços *tramp* (ou irregular)

- Transporte industrial
- Transporte liner (ou regular)

O transporte de passageiros pode ser tanto o de linha ou de cruzeiro. É um tipo especial de transporte, onde os objetos a serem transportados são passageiros (CHRZANOWSKI, 1985).

*Tramp* ou transporte irregular é a forma mais antiga de transporte marítimo, pois no passado não havia outra forma de empregar os navios, que eram dependentes das forças da natureza (ventos, correntes, etc). Embarcações a vela não podiam manter horários agendados e eram irregulares por sua própria natureza (CHRZANOWSKI, 1985).

Com a introdução da propulsão a vapor, uma navegação mais confiável foi possível. Navios podiam, agora, definir itinerários e fazer chamadas com intervalos regulares. Serviços regulares para um conjunto de portos se tornou possível. Certamente, os primeiros navios a vapor não eram perfeitos e, por um longo período, navios a vela eram mais velozes e mais confiáveis. Contudo, no final do século XIX, o vapor já era o tipo predominante de propulsão para a marinha mercante. O serviço de transporte *tramp* lembra um serviço de táxi, no qual os navios são enviados para onde a carga está disponível (CHRZANOWSKI, 1985).

Transporte industrial ou especial é aquele que utiliza navios especializados tais como navios tanques, transportadores de gás liquefeito, transportadores minerais, etc. Esses navios podem ser pertencentes à própria companhia ou são fretados por grandes organizações industriais e operados por grandes períodos regulares. É por essa razão que o transporte industrial possui certa semelhança com serviços liner. Porém, não é um transporte normal, pois não possui o agendamento e regularidade típica das transportadoras liners (CHRZANOWSKI, 1985).

O termo "transporte liner" é, geralmente, usado para descrever a forma de operação marítima de trânsito de rotas regulares, entre os mesmos portos, seguindo o mesmo itinerário indicado em uma publicação das listas de viagem (agendamento). Essas conexões possuem uma frequência fixa, independente do fator de carga dos navios empregados. Ao contrário do transporte *tramp*, que geralmente, transporta cargas de *commodities* homogêneas, os navios empregados no transporte liner carregam carga geral. O frete é calculado de acordo com conferências de tarifas, que serão abordadas posteriormente, neste apêndice.

Dentro do termo carga geral estão inclusas todas as cargas embaladas ou não, tendo

várias formas e propriedades, que podem ser transportadas em pequenos lotes ou separadamente. Existem dois tipos básicos de carga geral (CHRZANOWSKI, 1985):

- 1.Carga mista, isto é, pacotes de diferentes tamanhos e formas, vindos de diferentes embarcadores.
- 2.Cargas homogêneas transportadas em grandes quantidades, algumas vezes preenchendo completamente os porões do navio, sendo embaladas uniformemente. A forma mais comum de homogeneização da carga é a sua unitarização em forma de containers, pallets e trailers que são transportados por navios *roll-on roll-off*. Com o aumento da importância da containerização, passou-se a diferenciar carga geral da carga containerizada.

Uma empresa liner pode ser, também, classificada pelo alcance do seu serviço. Existem três tipos de serviços no transporte liner (CHRZANOWSKI, 1985):

- 1.Linhas Oceânicas: por exemplo, entre a Europa e América do Norte, Europa e Extremo Oriente, etc.
- 2.Linhas de médio alcance: por exemplo, entre os portos britânicos e o mediterrâneo.
- 3.Linhas curtas entre portos de um país ou portos em países vizinhos (cabotagem).

## 5.1 As maiores linhas oceânicas

O maior volume de comércio está nas rotas que ligam os três maiores centros industriais do mundo, América do Norte, Europa ocidental e o leste asiático. Existem 3 grandes rotas comerciais (SOPFORD, 1988):

- A rota entre Atlântico norte, que cobre o comércio entre a Europa ocidental e a costa leste do Canadá e Estados Unidos.
- América do Norte e Extremo Oriente, cobrindo o comércio entre o leste asiático e a costa oeste da América do norte, se estendendo do Japão até Singapura.
- Europa Ocidental e Extremo Oriente, cobrindo o comércio entre a Europa Ocidental e os países do Extremo Oriente, principalmente China, Coréia e Japão.

		<i>000 TEU per annum</i>	<i>% World trade</i>	<i>Biggest trade</i>	<i>Trade imbalance</i>
<b>East-West trades</b>					
Trans Pacific		7,470	20	Eastbound	22%
Trans Atlantic		3,030	8	Westbound	18%
Europe-Far East		4,895	13	Westbound	12%
Europe-Mid East		645	2	Eastbound	88%
N. America-Mid East		205	1	Eastbound	72%
Far East-Mid East		255	1	Westbound	66%
Total		16,500	44		22%
<b>North-South trades</b>					
Europe to	L. America	1,150	3	Southbound	17%
	S. Asia	475	1	Northbound	27%
	Africa	950	3	Southbound	35%
	Australasia	400	1	Southbound	40%
	Total	2,975	8		28%
N.America to	L. America	2,000	5	Southbound	26%
	S. Asia	250	1	Northbound	44%
	Africa	100	0	Southbound	33%
	Australasia	275	1	Southbound	47%
	Total	2,625	7		30%
Far East to	L. America	725	2	Southbound	55%
	S. Asia	425	1	Northbound	11%
	Africa	425	1	Southbound	45%
	Australasia	875	2	Northbound	16%
	Total	2,450	7		32%
Total North-South trades		8,050	22		30%
<b>Intra-Regional</b>					
Asia		6,750	18		
Europe		4,250	11		
N.America		1,250	3		
Other		300	1		
Total intra regional		12,550	34		
Total container trade		37,100	100		25%

Source: Drewry Shipping Consultants (1996) various tables

Figura 16: As maiores rotas marítimas e o desbalanço no comércio mundial

Veja na figura 16 a importância das grandes rotas em relação ao comércio mundial e a quantidade de containeres movimentados e direção do comércio (SOPFORD, 1988).

A seguir maiores detalhes sobre a rota da América do Norte e Extremo Oriente. Tal rota é de importância para a dissertação e merece um enfoque de suas características.

## 5.2 Comércio entre a América do Norte e o Extremo Oriente

A maior rota oceânica é o comércio trans-Pacífico entre a América do Norte e o Extremo oriente. O serviço opera entre os portos norte americanos da costa leste, o golfo e a costa oeste, até o centro industrial do Japão e extremo oriente, com alguns serviços

se estendendo para o oriente médio (SOPFORD, 1988).

A containerização da carga começou na rota do extremo oriente em dezembro de 1968, quando Sea-Land introduziu o serviço de container de Seattle até Yokohama e as companhias marítimas japonesas introduziram seis navios container de 700/800 TEU para serviço entre a Califórnia e Japão. Uma viagem de ida e volta consome em torno de sessenta a setenta dias; logo, para fornecer viagens semanais são necessários de oito a dez navios, dependendo da velocidade e itinerário dos portos em cada viagem (SOPFORD, 1988).

Em alguns casos, o transporte de containers para a costa leste dos Estados Unidos é feito através de serviço de "minibridge", onde o container é transportado por terra da costa oeste até a costa leste americana por trem e vice-versa, evitando assim o trânsito no canal do Panamá. Todos os serviços, nessa rota agora, são containerizados (SOPFORD, 1988).

### 5.3 A frota liner

Como em outros setores do mercado de transporte marítimo, a frota de navios não está em sua eficiência ótima. Isso se deve a 20 ou 30 anos de decisões de investimentos em diferentes situações econômicas. Apesar de muitos tipos de embarcações na frota agora estarem obsoletos de uma maneira ou outra, o fato de eles ainda estarem em operação, evidencia que ainda possuem valor econômico (PANAGIOTIS, 2005).

A frota de navios, operando atualmente nas grandes linhas de comércio, consiste de 6 diferentes tipos de navio mostrada na figura 17:

- Navios Containers: Navios containeres celulares 'lift on lift off' são atualmente os maiores e a parte mais moderna da frota liner. Todos os navios, nessa frota, têm em seus porões cell guides (separação no porão do navio específico para estiva do container) e são fabricados, exclusivamente, para carregar containers.
- Embarcação multi-propósito: Esses navios são desenvolvidos para serem velozes, possuem boa capacidade de transporte de container e a habilidade de carregar carga geral e outras cargas unitarizadas. Eles foram construídos principalmente durante os primeiros anos da containerização, quando operadores ainda utilizavam um misto de carga geral e containerizada. A maioria tem porões sem cell guides e geralmente incorporam um deck duplo.

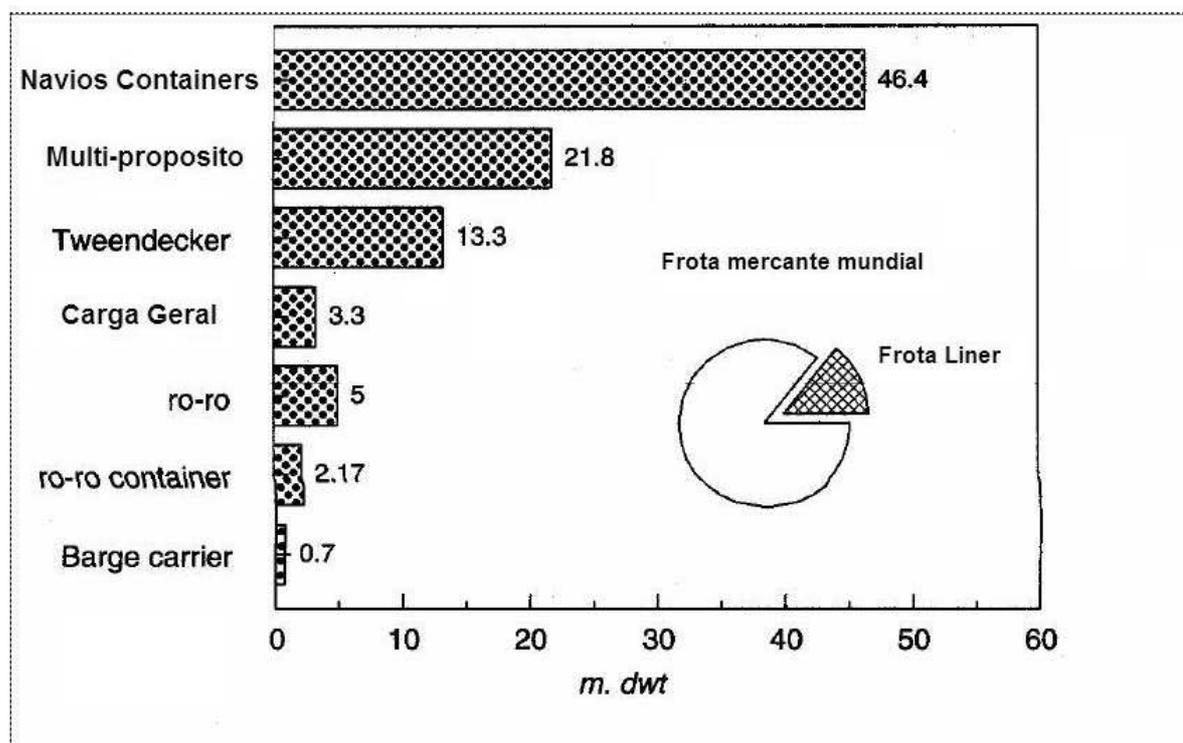


Figura 17: Composição da frota liner por tipos de navios. Fonte: Clarkson research Studies.

- Tweendeckers: São navios tramp flexíveis que continuaram a ser construídos até 1980. Tweendeckers possuem dois conveses, escotilhas estreitas, velocidade econômica, capacidade de transportar containeres limitada e podem possuir seu próprio guindaste.
- Ro-ros: Embarcações com conveses múltiplos nas quais os porões são acessíveis por rampas na proa, popa, ou nos bordos. Apesar de algumas vezes possuírem um design similar ao de car ferries, eles não possuem acomodações ou áreas públicas e são desenvolvidos com o objetivo de carregar carga rolante em rotas oceânicas de longo curso.

O número de navios containeres cresceu de 750 em 1980 para 2094 em 1997, e agora eles dominam a frota liner, com 50 % da capacidade total de transporte em dwt. A quantidade de carga que um navio container é medida em TEU ("twenty foot equivalent units", isto é, container de 20 pés). Os navios têm escotilhas largas desenvolvidas para comportar as dimensões do container e alguns navios possuem cell guides (estrutura que permite a melhor estivagem dos containeres), nos porões e conveses. Existe uma correlação entre tamanho e velocidade nesse tipo de navio. Os pequenos navios alimentadores de 100-299 TEU possuem uma velocidade média de 13,8 nós, devido ao fato que tais navios, geral-

mente, operam em rotas curtas onde a alta velocidade traz poucos benefícios econômicos. Entretanto, um grande navio com mais de 4000 TEU pode ter uma velocidade de cruzeiro superior a 22 nós, bastante grande, se comparada aos 14 nós já citados, mas bem mais lento que os 25-27 nós de velocidade de cruzeiro praticados nos dias anteriores à crise do petróleo da década de 70 (PANAGIOTIS, 2005).

Veja o crescimento do número de navios containeres e evolução da composição da frota na figura 18:

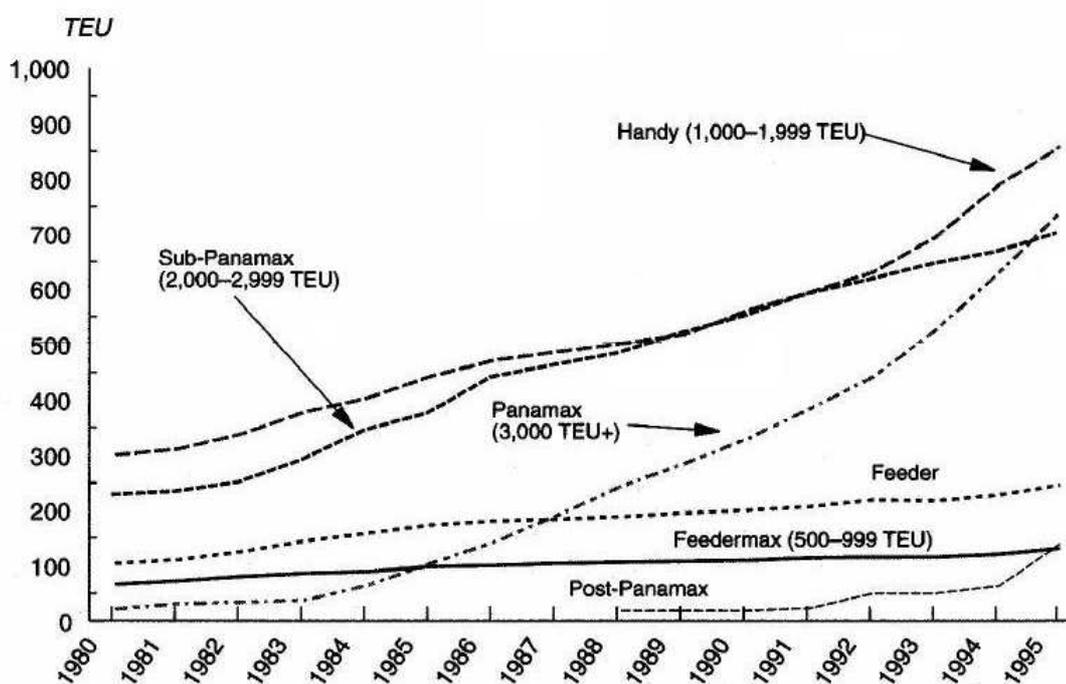


Figura 18: Frota de navios containeres: 1980-96. Fonte: Clarkson research Studies

## 5.4 Regularidade e frequência das viagens

Informações sobre as partidas e chegadas dos navios é dada em uma lista de viagem (agenda de viagem). As datas são aproximações estimadas e os armadores, normalmente, indicam que "todos os dados estão sujeitos à alteração sem aviso". Mesmo assim, as companhias liners tentam evitar mudanças frequentes nas datas de partidas, a fim de manter a confiança dos clientes em seus serviços. A regularidade das viagens é de importância primária para as companhias liners, sendo que uma certa frequência constante de viagem deve ser mantida. Frequência, nesse caso, é o número de partidas de um dado porto(s) por semana ou por mês. Tal frequência depende da oferta de carga a ser transportada, distância da viagem e tamanho e número de navios empregados em dada rota. Geralmente,

a amplitude da frequência varia de uma viagem a cada mês para linhas intercontinentais a várias viagens por semana, no caso, de linhas de curta distância. Quanto maior a frequência, maior o número de navios necessários e, conseqüentemente, maior o custo de investimento. Porém, isso pode ser mitigado por uma velocidade maior de trânsito nas rotas, com o efeito negativo de elevar os custos de combustível.

## 5.5 Organização do sistema de conferências liners

O sistema de conferência que podem ser estendido a acordos de *joint-venture*, conhecidos como alianças. Foi desenvolvido por armadores como meio de lidar com ciclos na indústria marítima. Com o tempo, as conferências ganharam o apoio dos embarcadores, pois membros das conferências garantem serviços estáveis e taxa de frete fixa. Por volta da década de 70, existiam mais de 360 conferências com membros, variando de 2 a 40 empresas liners (SOPFORD, 1988).

A organização das conferências varia enormemente, mas a maior distinção é entre conferências abertas, fechadas e *outsiders*. Os respectivos atributos dessas organizações serão brevemente resumidas a seguir (SOPFORD, 1988).

### Conferência fechadas

O mais comum acordo é a conferência fechada, que restringe os membros, regula as taxas de frete para os conferencistas e, geralmente, oferece partes fixas no comércio em certas rotas para cada membro da conferência. Isso permite aos membros da conferência ajustar sua capacidade com a demanda e evitar duplicação ineficiente das chamadas dos portos. Em algumas conferências, a integração das operações é levada a um passo além e custos e renovações de contratos, também, são compartilhados. Ao longo dos anos, conferências fechadas têm sido sujeitas a muitas críticas por causa dos seguintes fatores (SOPFORD, 1988):

- Eles podem explorar uma posição semimonopolista.
- Partes fixas de comércio podem remover incentivos para melhorar o serviço.
- Burocracia, um requerimento inevitável das conferências, implica que as conferências irão responder lentamente a mudanças no ambiente comercial.
- Conferências estão sujeitas a interferência política e pressões de ordem não comercial.

- Os arranjos das conferências podem ser muito obscuros.

Pelo lado positivo, foi argumentado que as conferências fornecem um serviço estável para o embarcador e a capacidade para planejar e coordenar os serviços de transporte para o comércio como um todo. Com tantas conferências em operação no mundo é difícil generalizar, mas como a competição externa sempre esteve presente com mais de um século de existência continuada das conferências fechadas, sugere que elas são uma necessidade genuína, no transporte liner, e não representam uma ameaça à competição (SOPFORD, 1988).

### **Conferências abertas**

Uma conferência que ajusta taxas de frete sem restrição de membros é conhecida como conferência aberta. Qualquer armador pode se juntar a uma conferência aberta, logo, não há controle sobre o volume das operações de transporte em determinada rota. Nessas circunstâncias, a companhia liner garante uma taxa de renovação de acordo com a conferência, mas como não há controle sobre as partes do comércio ou sobre o número de navios em serviço, conferências abertas são vulneráveis a excesso de oferta (SOPFORD, 1988).

Conferências abertas são usadas principalmente no comércio dos Estados Unidos, particularmente nas importantes rotas do Pacífico e Atlântico. A razão para isso é que, devido às leis anti-trust norte-americanas, acordos que restringem competição são ilegais. Contudo, a lei US Shipping Act (1984) oferece às companhias liners alguma imunidade das leis anti-trust, permitindo a existência de certos acordos operacionais e joint ventures (SOPFORD, 1988).

### **Outsiders**

Essas são as companhias que fazem serviços de linha em rotas sem se juntar a alguma conferência. Em anos recentes a parte correspondente dos outsiders em algumas rotas, tais como Europa-Extremo Oriente, cresceu vertiginosamente (SOPFORD, 1988).

## 5.6 Cobertura de serviços oferecidos por uma companhia liner

A cobertura geográfica das conferências em operação evoluiu, desde que o sistema original inaugurado no século XIX. Esta evolução ocorreu em resposta a mudanças nas condições do comércio. As conferências desenvolveram diferentes níveis de serviços que se aplicam a diferentes portos, a seguir (SOPFORD, 1988):

- Portos base: têm um serviço regular com freqüentes carregamentos e descarregamento de carga. Em outras palavras, o embarcador tem garantias de um serviço regular com tarifas fixas de qualquer porto base.
- Portos diretos: são portos menores onde a conferência se preparou para oferecer um serviço, caso haja carga suficiente para justificar o transporte. A taxa seria normalmente de uma tarifa normal mais um custo adicional, se transshipment for necessário.
- Outports: Alguns portos não estão incluídos no serviço normal dos membros conferencistas devido ao pouco custo/benefício e pouca demanda. Contudo, para cumprir com o dever e alcançar a concorrência, membros conferencistas podem aceitar carga em outports e arranjar transshipment, cobrando uma taxa apropriada.

Como em muitas outras áreas, o crescimento da containerização teve um profundo impacto na natureza do serviço oferecido pelas companhias liners. Antes da containerização, a maioria das companhias via seu negócio como tarefas complexas de transporte de carga entre portos base. O problema de organizar, manejar e estivar carga geral em uma liner tradicional era trabalho integral. As empresas achavam que o serviço acabava quando a carga deixava o navio e mesmo o transshipment da carga até outports era considerado como um trabalho extra ao invés de uma parte intrínseca do negócio (SOPFORD, 1988).

Com a containerização tudo mudou. As operações de transporte marítimo se tornaram uma simples função de lidar com unidades e, mesmo envolvendo uma boa parte de habilidade em manter o agendamento, essas habilidades estão disponíveis no mercado aberto. Resumindo, as operações de transporte marítimo foram simplificadas, removendo uma grande barreira para entrada de novos participantes. Isso resultou que as conferências liners no comércio de container estão encontrando uma crescente competição de outsiders. Sem possibilidade de obter um desconto por volume suficiente das conferências

liners, os embarcadores começaram a arranjar navios com operadores não conferencistas (SOPFORD, 1988).

A intensa competição desse tipo mudou a ênfase no transporte liner para a melhora da qualidade dos serviços oferecidos e, em particular, no market de um serviço completo de transporte porta a porta. Nesse novo regime, as companhias estabelecidas usam sua habilidade organizacional para oferecer através do serviço de transporte porta a porta, algo que os operadores não conferencistas não têm recursos para igualar (SOPFORD, 1988).

## 5.7 Conceitos Básicos de Navegação

A seguir, iremos listar os principais conceitos que serão necessários para a compreensão da navegação e entendimento da construção de rotas (os conceitos contidos nesta seção foram extraídos do livro *Navegação Costeira e Estimada - A ciência e a arte - Vol I*, de Miguens, 1993).

**Círculo Máximo:** é a linha que resulta da interseção com a superfície terrestre de um plano que contenha o centro da Terra.

**Latitude de um Lugar:** é o arco de meridiano compreendido entre o Equador e o paralelo do lugar. Conta-se de  $0^\circ$  a  $90^\circ$  para o Norte e para o Sul do Equador.

**Longitude de um Lugar:** é o arco do Equador, ou o ângulo no Pólo, compreendido entre o Meridiano de Greenwich e o Meridiano Do Lugar. Conta-se de  $0^\circ$  a  $180^\circ$ , para Leste ou para Oeste de Greenwich.

**Meridiano de Greenwich** serve de referência para contagem das longitudes, é denominado Primeiro Meridiano.

**Milhas Náuticas (ou Milha Marítima):** é o comprimento do arco de 1 minuto de Latitude. Contudo, o comprimento do arco de meridiano correspondente a um ângulo de  $1'$  varia ligeiramente com o lugar, uma vez que a Terra não é perfeitamente esférica. Dado, porém, o interesse de uma unidade de valor constante, fixou-se, por um Acordo Internacional (1929), o valor da milha náutica em 1852 metros, independentemente da latitude do lugar. Pode-se, então, definir uma Milha Náutica como o comprimento do arco de um minuto de meridiano terrestre cujo valor é de 1852 metros.

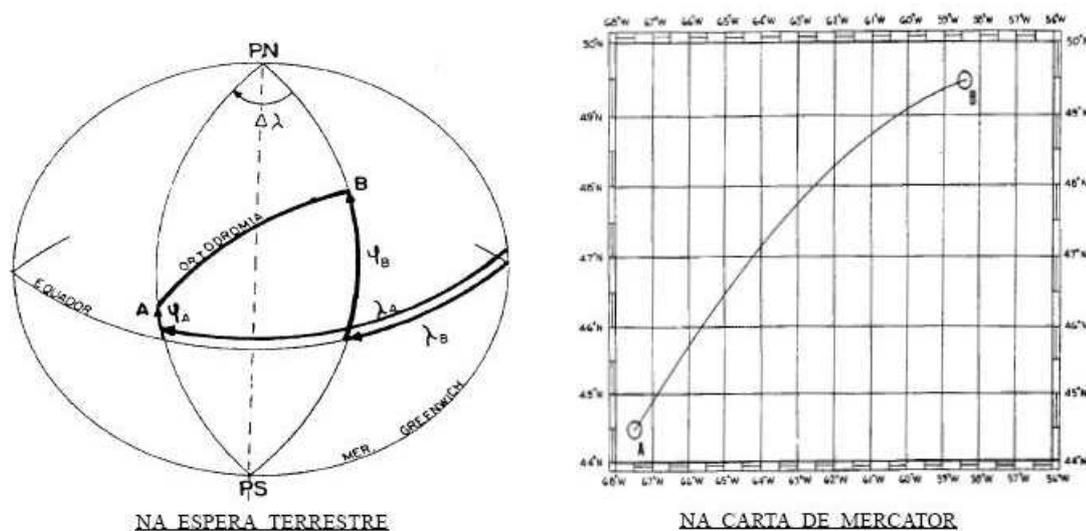


Figura 19: Ortodromia (arco de círculo máximo). Fonte: Navegação Costeira e Estimada - A ciência e a arte.

**Ortodromia:** é qualquer segmento de um círculo máximo da esfera terrestre. É, assim, a menor distância entre dois pontos na superfície da Terra. A ortodromia (círculo máximo) representa a menor distância entre os referidos pontos, mas faz com os sucessivos meridianos ângulos diferentes. Além disso, na Projeção de Mercator, utilizada na maioria das Cartas Náuticas, a ortodromia é representada por uma linha curva (ver figura 19).

**Loxodromia ou Linha de Rumor:** é a linha que intercepta os vários meridianos segundo um ângulo constante. Na superfície da Terra, a loxodromia apresenta-se como uma espiral que tende para o Pólo, como mostra a figura 20.

Embora a menor distância entre dois pontos na superfície da Terra seja uma ortodromia, isto é, o arco do círculo máximo que passe pelos dois pontos, em navegação é quase sempre mais conveniente navegar por uma loxodromia, isto é, por uma linha de rumor, indicada pela Agulha (bússola), na qual a direção da proa do navio corta todos os meridianos sob um mesmo ângulo. Para pequenas distâncias, a loxodromia e a ortodromia praticamente se confundem. Assim, para uma pernada de 750 milhas na Latitude média de  $40^\circ$ , por exemplo, a diferença entre a ortodromia e a loxodromia é de apenas  $1,5'$ . Entretanto, para grandes travessias, principalmente em Latitudes elevadas, a diferença entre a derrota ortodrômica e a derrota loxodrômica pode ser significativa.

Por isso, para grandes travessias deverá ser considerado o uso de derrota ortodrômica (decomposta em arcos de loxodromia) ou de uma derrota mista (derrota composta de

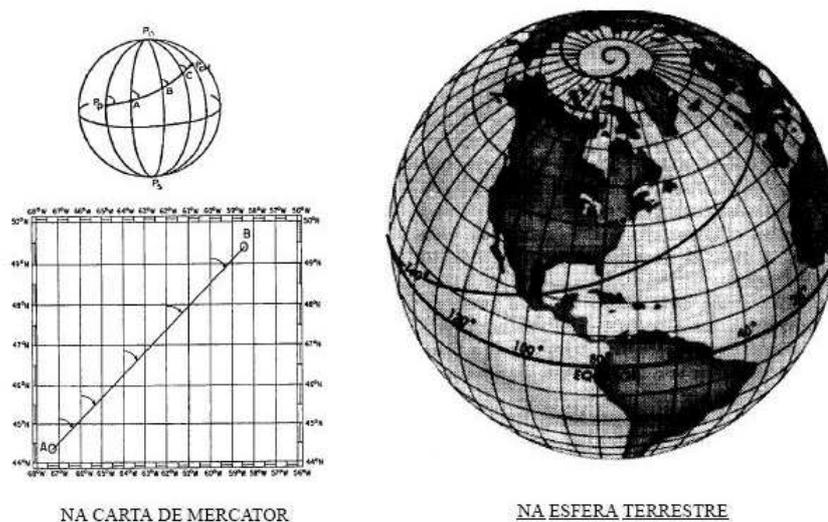


Figura 20: Linha de rumo ou loxodromia. Fonte: Navegação Costeira e Estimada - A ciência e a arte.

arcos ortodrômicos e rumos loxodrômicos).

**Velocidade:** em navegação, a unidade de velocidade comumente utilizada é o Nó, que corresponde à velocidade de uma milha náutica por hora.

A velocidade de Avanço (SOA, do inglês "Speed Of Advance") é a expressão usada para indicar a velocidade com que se pretende progredir ao longo da derrota planejada. É um importante dado de planejamento, com base no qual são calculados os ETA ("Estimated Time of Arrival" ou Hora Estimada de Chegada) e os ETD ("Estimated Time of Departure" ou Hora Estimada de Partida) aos diversos pontos e portos da derrota planejada.

**Cartas Piloto:** apresentam informações meteorológicas e oceanográficas de fundamental importância para o navegante, tanto na fase de planejamento, como na de execução da derrota.

O Atlas de Cartas Piloto é constituído por 12 cartas, na Projeção de Mercator, escala 1:10.000.000, sendo uma para cada mês do ano. Para a navegação, as principais informações das Cartas Piloto referem-se a ventos e correntes marítimas. Entretanto, as cartas apresentam, ainda, informações sobre declinação magnética (mostrando linhas isogônicas e linhas de mesma variação anual da declinação), temperatura do ar e temperatura da

água do mar. Ademais, no verso das Cartas Piloto também constam informações sobre nevoeiro, visibilidade, temperatura, vento médio e ocorrência de ventos fortes nos principais portos e ilhas.

### 5.7.1 Interferências oceanográficas e meteorológicas

Um dos fatores que afetam o movimento do navio em grandes travessias é a existência de Correntes Oceânicas Superficiais, que se adicionarão naturalmente ao deslocamento esperado pelo navio, resultando numa discrepância entre o rumo e velocidade estimados e o rumo e velocidade reais. O conhecimento dos elementos das correntes oceânicas predominantes é importante para o navegante, tanto na fase de planejamento, como na fase de execução da derrota.

As correntes oceânicas são constituídas do resultado do efeito combinado dos ventos e das variações de densidade. Nos dois casos, os deslocamentos prosseguem muito além da região de origem.

As circulações das grandes áreas oceânicas mostram semelhanças notáveis. Na camada superior, existe circulação no sentido dos ponteiros do relógio, tanto no Atlântico Norte, como no Pacífico Norte; e no sentido oposto (sinistrógiro) no Atlântico Sul, Pacífico Sul e Índico Sul.

O padrão básico das correntes oceânicas é um sistema quase fechado chamado "Giro". Cada oceano apresenta um grande 'Giro de Correntes' centrado, aproximadamente, nas regiões subtropicais (cerca de 30° N e 30° S) de ambos os Hemisférios. No Atlântico Norte e no Pacífico Norte há, também, um 'Giro de Corrente' de sentido oposto no oceano Subpolar Ártico (centrado aproximadamente nos 50° N / 60° N) conforme mostrado na Figura 21. No Hemisfério Sul, a grande Corrente de Deriva Ocidental (ou Deriva do Vento Oeste), que circunda a Antártida, põe em comunicação os sistemas de correntes de cada um dos três oceanos. A figura 21 mostra, de forma simplificada, a circulação superficial conjunta de todos os oceanos.

O planejamento da derrota mais adequada, também, deve levar em conta condições meteorológicas adversas, pois desprezá-las pode significar avarias na embarcação ou na carga. Sabe-se que os problemas oriundos de uma passagem de furacão ou tufão ou ciclone tropical são por demais desastrosas e com isto prejuízos amargos são consolidados. O planejamento das rotas deve sempre incluir ocasionais ocorrências de mau tempo. Na tabela 58 estão dispostos os períodos de pico e de ocorrência provável dos fenômenos

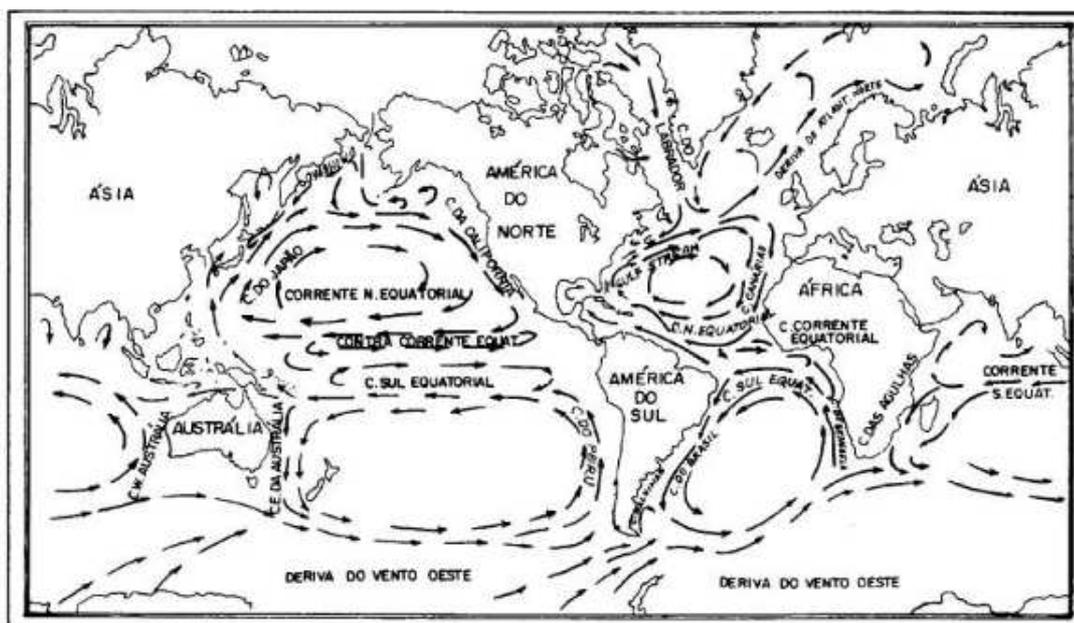


Figura 21: Principais Correntes Oceânicas. Fonte: Navegação Costeira e Estimada - A ciência e a arte.

meteorológicos que afetam a navegação (LOBO; SOARES, 1999).

Tabela 58: Eventos Meteorológicos e Oceanográficos. Fonte: (LOBO; SOARES, 1999).

Eventos	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Monção de NW Mar do sul da China e mar arábico e costa leste da África	PI	PI	OC	OC						OC	OC	PI
Monção de SW Mar do sul da China e Baía de Bengala					OC	OC	PI	PI	OC	OC		
Monção de SW Mar Arábico e costa W da Índia						OC	PI	PI	OC			
Ciclone tropical Baía de Bengala				OC	OC	OC	PI	PI	PI	PI	PI	OC
Ciclone tropical Mar Arábico					OC	OC				OC	OC	PI
Ciclone tropical SW do Oceano Índico	OC	OC	OC	PI	PI						PI	PI
Ciclone tropical W da Austrália	OC	OC	OC	PI	PI						PI	PI
Ciclone tropical E da Austrália	OC	OC	OC	PI								PI
Tufão - SW do Pacífico Norte					OC	OC	PI	PI	PI	PI	OC	
Furacão - SE do Pacífico Norte					OC	PI	PI	PI	PI	PI	OC	
Tufão - SW do Atlântico Norte						OC	OC	PI	PI	PI	OC	
Icebergs Hemisfério Norte		OC	OC	PI	PI	PI	OC	OC	OC	OC		
Pack Ice 75% de cobertura E do Canadá	PI	PI	PI	OC								
Nevoeiro amplo Atlântico Norte				OC	PI	PI	PI	PI	OC			
Nevoeiro amplo Pacífico Norte					OC	PI	PI	PI	OC	OC		
Ondas Anormais Sul e SW da África	PI	PI	PI	OC	OC	OC	OC	OC	OC	PI	PI	PI

Legenda: PI: Período de Pico. OC: Período de Ocorrência.

E - leste. W - Oeste. NW: Noroeste. SW - Sudoeste. SE - Sudeste.

## 6 *Apêndice B - Informações detalhadas das rotas*

Nas figuras 22, 23 e 24 temos o esquema de portos visitados e rotas usado pela Y.S. Line.

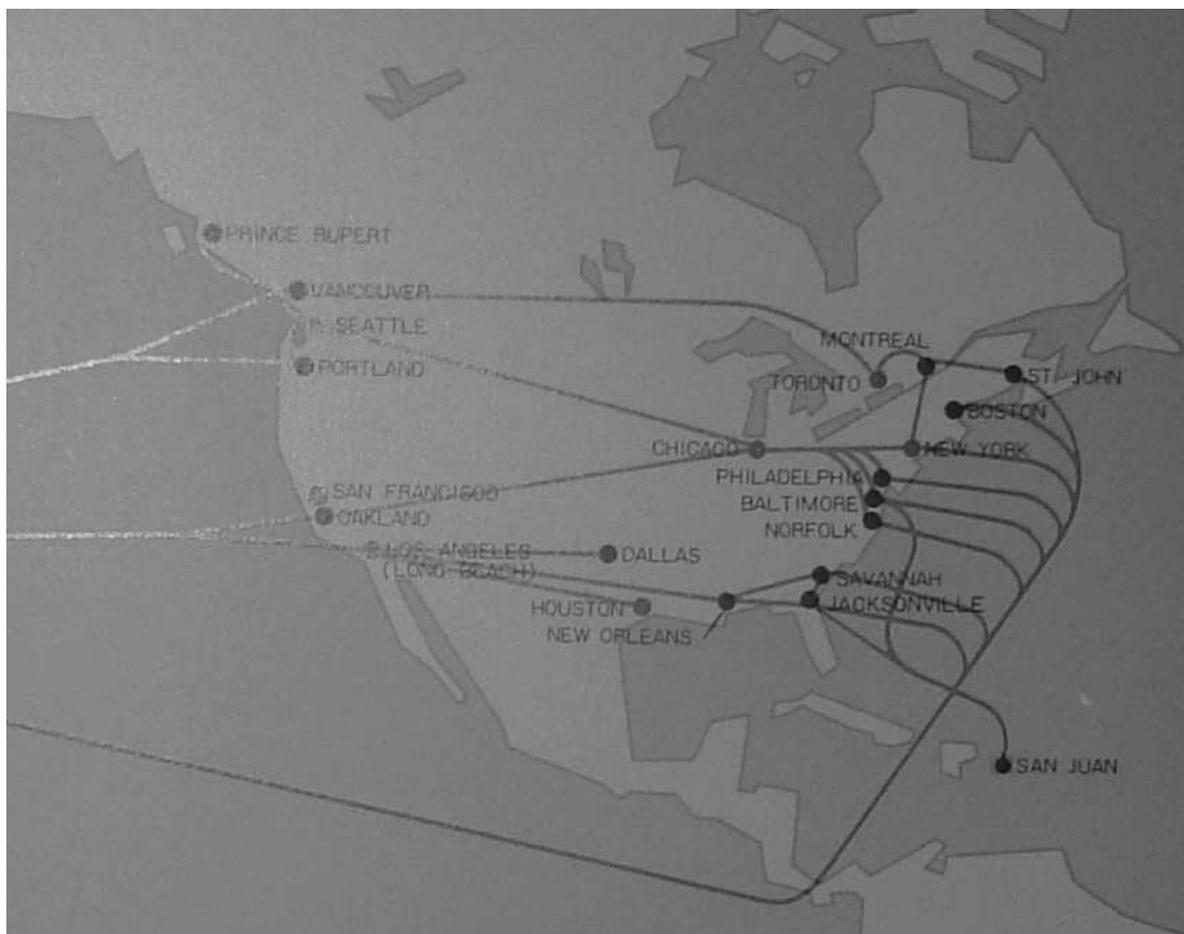


Figura 22: Rotas da América e Caribe. Fonte: Y. S. Line - Container Service.

A descrição das rotas completas está separada em duas partes: a primeira parte mostra as características da rota em si e os portos visitados, e a segunda mostra a viagem em lastro do navio para início da próxima rota.

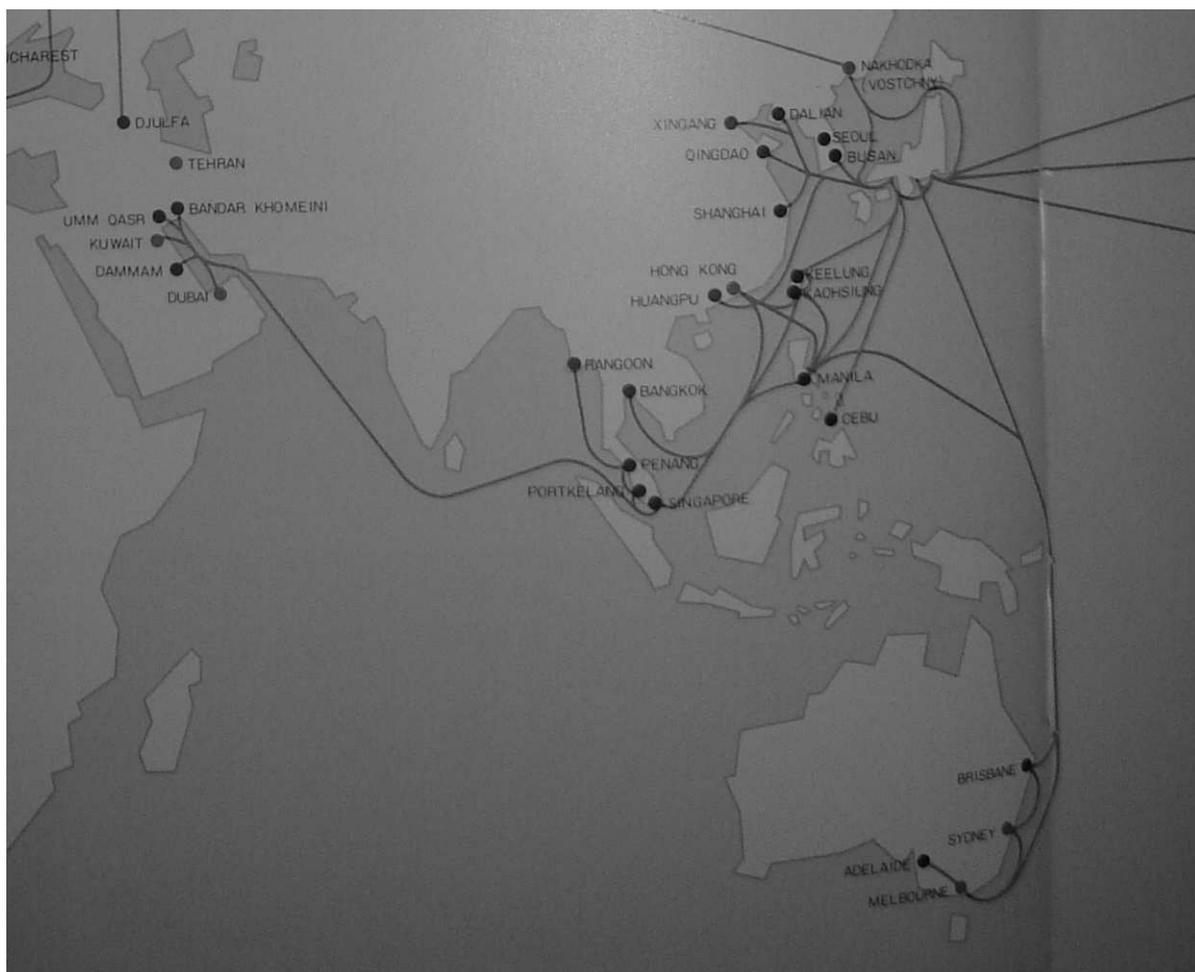


Figura 23: Rotas do sudeste asiático, Oriente Médio e Austrália. Fonte: Y. S. Line - Container Service.

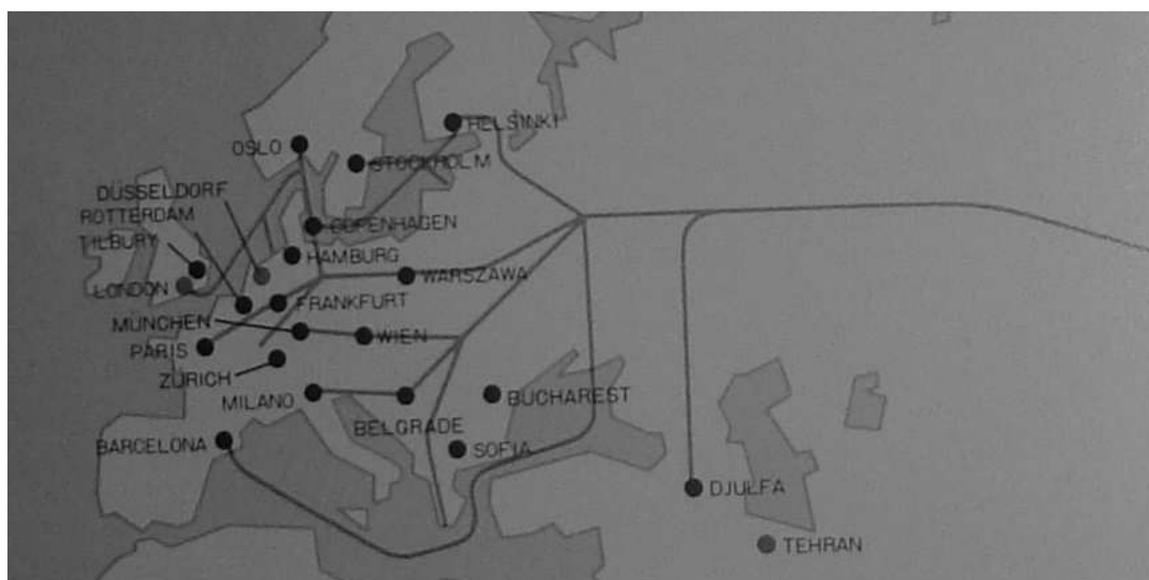


Figura 24: Rotas da Europa alimentados pelo transporte trans-siberiano. Fonte: Y. S. Line - Container Service.

Todas as rotas foram construídas com navios viajando com velocidade de 15 nós no mês de janeiro. As informações das rotas contidas nas tabelas foram extraídas do programa Visual Passage Planner versão 2.0.

As tabelas a seguir fornecem informações das condições meteorológicas predominantes da rota, distância percorrida, tempo de viagem e as coordenadas dos waypoints das rotas ortodrômicas. Para não sobrecarregar o espaço deste apêndice com informações não essenciais, somente nas rotas que foram usadas na computação dos coeficientes de custo de viagem serão apresentadas as coordenadas dos waypoints, sendo omitidos os waypoints das rotas de retorno. Também foram omitidos os waypoints em lugares onde é necessário o uso de navegação em águas restritas. Em tais situações a navegação é realizada visualmente, com uso de radar e outros instrumentos de auxílio a navegação. Apesar de se ter construído waypoints, eles foram usados meramente para se marcar a distância e o tempo da derrota.

Os portos visitados foram abreviados:

**Portos do Japão:** KO = Kobe; MO = Moji; NI = Niigata; NG = Nagoya; OS = Osaka; SZ = Shimizu; TOM = Tomakomai; TK = Tokyo; YH = Yokohama; YK = Yokkaichi.

**Portos da costa leste norte-americana e atlântico:** BT = Baltimore; BO = Boston; NY = New York; PH = Philadelphia; BT = Baltimore; NF = Norfolk; SV = Savannah; JK = Jacksonville; STJ = St. John; SJ = San Juan

**Portos da costa oeste norte-americana:** LA = Los Angeles; OK Oakland; PL = Portland; PR = Prince Rupert; SE = Seattle; VA = Vancouver.

**Portos asiáticos:** BGK = Bangkok; BU = Busan; CE = Cebu; DL = Dalian; HK=Hong Kong; KA = Kaohsiung; KE = Keelung; MA = Manila; PKL = Port Kelang; PN = Penang; RG = Rangoon; SGP = Singapore; SG = Shanghai; SP = Singapura; NKH = Nakhodka VST = Vostochny.

**Portos australianos:** AD = Adelaide; BR = Brisbane; MB = Melbourne; SY = Sydney.

**Portos do Oriente Médio:** BDK = Bandar Khomeini; DB = Dubai; DM = Dammam; KW = Kuwait; UQ = Umm Qasr;

Tabela 59: Informações detalhadas da rota 1.1

Rota	Distancia percorrida (NM)	Tempo decorrido (dias)	Media percentual de ventos fortes	Media da velocidade dos ventos (nós)	Media da temperatura do mar (°C)
Waypoints: [Latitude/Longitude]					
1.1 KO-OK-LA	5371,3	14,2	9,4% [0,00 a 23,00]	19,7 [10,44 28,49]	9,5 [4,84 17,95]
1.[N34°34,07'/E135°7,91'] 2.[N34°19,39'/E134°59,11'] 3.[N32°43,78'/E134°58,95'] 4.[N32°0,88'/E139°57,59'] 5.[N37°45,85'/W122°42,54'] 6.[N37°47,97'/W122°32,80] 7.[N37°46,03'/W122°41,13'] 8.[N33°34,26'/W121°15,79'] 9.[N33°42,58'/W118°46,23'] 10.[N33°30,00'/W118°16,27']					
1.1 NG-OK-LA	5169,5	13,8	9,4% [0,00 a 22,00]	19,8 [10,44 27,19]	9,1 [4,42 17,45]
1.1 SZ-OK-LA	5157,9	13,7	9,7% [0,00 a 23,00]	19,9 [10,44 28,49]	9,2 [4,47 17,95]
1.1 TK-OK-LA	4950,2	13,6	9,3% [0,00 a 23,00]	19,8 [10,44 28,49]	9,2 [4,47 17,45]
LA-KO	5236,4	15,3	10,2% [0,00 a 29,00]	20,5 [10,44 28,49]	10,0 [5,20 17,50]
LA-NG	5087,4	14,9	10,5% [0,00 a 29,00]	20,7 [10,44 28,49]	10,00 [5,20 17,57]
LA-SZ	5246,0	14,3	9,3% [0,00 a 23,00]	19,8 [10,44 27,10]	9,4 [4,60 15,93]
LA-TK	4950,2	14,2	9,3% [0,00 a 23,00]	19,7 [10,44 27,10]	9,3 [4,60 15,93]
LA-YH	4938,6	14,2	9,3% [0,00 a 23,00]	19,7 [10,44 27,10]	9,3 [4,60 19,93]
LA-OS	5243,5	15,3	10,1% [0,00 a 29,00]	20,5 [10,44 29,49]	10,0 [5,20 17,50]
LA-YK	5086,9	14,9	10,5% [0,00 a 29,00]	20,7 [10,44 28,49]	10,0 [5,20 17,57]
LA-BU	5544,9	15,2	8,1% [0,00 a 20,00]	19,3 [10,44 26,55]	7,0 [2,11 14,52]
LA-MA	6736,3	19,1	8,1% [0,00 a 29,00]	19,6 [10,44 28,16]	13,6 [5,99 26,86]
LA-BT	5733,2	16,0	0,7% [0,00 a 8,00]	12,5 [4,28 20,44]	23,3 [8,78 27,94]
LA-KE	6613,4	17,9	8,8% [0,00 a 29,00]	20,1 [10,44 33,07]	12,1 [5,52 22,93]

Tabela 60: Informações detalhadas da rota 1.2

Rota	Distancia percorrida (NM)	Tempo decorrido (dias)	Media percentual de ventos fortes	Media da velocidade dos ventos (nós)	Media da temperatura do mar (°C)
Waypoints: [Latitude/Longitude]					
1.2 TO-BU	754,7	2,2	3,7% [0,00 a 15,00]	16,8 [9,34 24,00]	13,1 [10,01 15,57]
1.[N35°33,23'/E139°49,93'] 2.[N35°29,38'/139°53,23'] 3.[N35°20,03'/E139°48,22'] 4.[N35°14,37'/E139°44,008'] 5.[N34°55,14'/E139°38,80'] 6.[N34°51,71'/E139°17,30'] 7.[N33°13,90'/E138°16,47'] 8.[N32°15,62'/E132°9,68'] 9.[N33°16,11'/132°7,94'] 10.[N33°21,33'/E131°50,61'] 11.[N33°51,21'/E131°45,29'] 12.[N33°51,12'/E131°5,92'] 13.[N33°59,40'/E131°3,08'] 14.[N33°57,30'/E130°57,66'] 15.[N33°57,76'/E130°55,91'] 16.[N33°54,76'/E130°55,14'] 17.[N33°57,11'/E130°51,95'] 18.[N33°59,83'/E130°52,61'] 19.[N35°2,22'/E129°9,93']					
BU-KO	482,6	1,2	0,9% [0,00 a 4,00]	14,0 [9,34 18,11]	11,8 [9,79 16,00]
BU-NG	635,9	1,7	1,8% [0,00 a 5,00]	15,6 [9,34 20,03]	13,2 [10,01 16,00]
BU-SZ	662,6	1,7	2,6% [0,00 a 15,00]	16,0 [9,34 24,00]	13,0 [10,01 16,00]
BU-TK	758,3	2,0	3,6% [0,00 a 15,00]	16,7 [9,34 24,00]	13,0 [10,01 16,00]
BU-YH	747,5	1,9	3,7% [0,00 a 15,00]	16,7 [9,34 24,0]	13,0 [10,01 15,57]
BU-YK	620,9	1,6	1,7% [0,00 a 7,00]	15,3 [9,34 19,06]	13,3 [10,53 16,00]
BU-OS	526,1	1,3	1,0% [0,00 a 4,00]	14,2 [9,34 18,11]	11,9 [9,79 16,00]
BU- BU	0,0	0,0	0,0	11,2 [11,2 11,2]	10,5 [10,53 10,53]
BU- MA	1475,9	3,9	2,4% [0,00 a 9,00]	17,6 [11,22 23,09]	20,0 [10,53 27,03]
BU- BT	10487,9	28,6	4,4% [0,00 a 23,00]	16,0 [5,39 26,23]	16,4 [2,21 28,40]
BU-KE	697,0	1,9	1,6% [0,00 a 4,00]	17,1 [13,87 19,29]	13,8 [9,98 18,93]

Tabela 61: Informações detalhadas da rota 2

Rota	Distancia percorrida (NM)	Tempo decorrido (dias)	Media percentual de ventos fortes	Media da velocidade dos ventos (nós)	Media da temperatura do mar (°C)
Waypoints: [Latitude/Longitude]					
2 KO-PR-VA-SE-PL	5434,9	14,3	9,9% [0,00 a 29,00]	20,6 [6,50 30,00]	9,0 [4,78 17,99]
1.[N34°36,40'/E135°9,41'] 2.[N34°19,74'/E134°58,85'] 3.[N32°36,13'/E134°59,26'] 4.[N32°40,25'/E143°48,83'] 5.[N44°28,29'/W165°21,58'] 6.[N54°29,90'/W132°37,67'] 7.[N54°17,60'/W130°29,88'] 8.[N54°14,47'/W131°1,57'] 9.[N53°33,65'/W131°8,52'] 10.[N50°57,54'/W127°39,28'] Navegação interior até VA e SE 11.[N48°23,56'/W124°59,76'] 12.[N46°11,81'/W124°21,18'] 13.[N46°14,50'/W123°59,89'] Navegação interior até PL					
2 NG-PR-VA-SE-PL	5200,6	13,7	10,4% [0,00 a 29,00]	20,8 [6,50 33,07]	8,2 [4,78 17,95]
2 SZ-PR-VA-SE-PL	5146,6	13,5	10,4% [0,00 a 29,00]	20,8 [6,50 33,07]	8,1 [4,78 17,95]
2 TK-PR-VA-SE-PL	5057,9	13,3	10,8% [0,00 a 29,00]	20,6 [6,50 30,00]	7,4 [4,78 15,93]
2 YH-PR-VA-SE-PL	5046,4	13,2	10,8% [0,00 a 29,00]	20,6 [6,50 30,00]	7,4 [4,78 15,93]
PL-KO	4641,6	13,6	10,9% [0,00 a 29,00]	21,1 [11,52 33,07]	8,5 [5,42 17,50]
PL-NG	4515,9	13,0	11,0% [0,00 a 29,00]	20,8 [12,92 28,49]	7,9 [5,28 16,00]
PL-SZ	4428,1	12,7	11,2% [0,00 a 29,00]	20,9 [12,92 28,49]	7,8 [5,28 15,51]
PL-TK	4344,9	12,6	11,2% [0,00 a 29,00]	20,9 [12,92 28,49]	7,7 [5,28 15,51]
PL-YH	4335,0	12,6	11,2% [0,00 a 29,00]	20,9 [12,92 28,49]	7,7 [5,28 15,51]
PL-YK	4799,0	12,9	11,0% [0,00 a 29,00]	20,8 [12,92 28,49]	7,9 [5,28 16,00]
PL-OS	5010,4	13,6	10,9% [0,00 a 29,00]	21,1 [11,52 33,07]	8,5 [5,42 17,50]
PL-BU	5175,7	13,6	10,0% [0,00 a 29,00]	20,0 [11,22 28,34]	5,9 [2,42 11,92]
PL-MA	6036,8	17,4	8,9% [0,00 a 29,00]	20,3 [11,38 33,07]	12,0 [5,42 26,86]
PL-BT	6642,8	17,8	1,2% [0,00 a 11,00]	13,0 [4,28 22,10]	21,9 [8,13 27,94]
PL-KE	5950,9	16,2	9,4% [0,00 a 29,00]	20,5 [13,98 33,07]	10,9 [5,42 22,93]

Tabela 62: Informações detalhadas da rota 3

Rota	Distancia percorrida (NM)	Tempo decorrido (dias)	Media percentual de ventos fortes	Media da velocidade dos ventos (nós)	Media da temperatura do mar (°C)
Waypoints: [Latitude/Longitude]					
3 KO-STJ-BO-NY-PH-BT-NF-SV-JK	13321,7	35,9	4,2% [0,00 a 22,00]	16,7 [5,00 28,85]	19,4 [0,98 28,25]
1.[N34°34,26'/E135°8,69'] 2.[N34°12,34'/E134°56,78] 3.[N32°35,72'/E135°5,82'] 4.[S0°17,25'/W104°42,44'] 5.[N6°28,88'/W79°29,01'] 6.[N8°53,53'/W79°29,01'] 7.[N9°27,27'/W80°0,81'] 8.[N20°33,04'/W73°35,96'] 9.[W72°36,90'/W72°36,90'] 10.[N23°2,89'/W72°33,10'] 11.[N44°42,24'/W67°1,48'] 12.[N42°26,82'/W70°18,94'] 13.[N42°20,22'/W70°55,14'] 14.[N42°17,28'/W70°22,84'] 15.[N41°54,48'/W69°36,51'] 16.[N40°54,83'/W69°56,66'] 17.[N40°27,88'/W73°49,14'] 18.[N40°32,77'/W74°2,97'] 19.[N40°24,88'/W73°49,63'] 20.[N39°24,38'/W74°6,99'] 21.[N38°47,97'/W74°58,06] Nav. interior até PH 22.[N38°7,39'/W74°58,06'] 23.[N36°53,20'/W75°47,69'] Nav. interior até BT e NF 24.[N35°16,94'/W75°10,36'] 25.[N31°47,23'/W80°24,24'] 26.[N32°1,17'/W80°46,12'] 27.[N31°35,67'/W80°32,65'] 28.[N30°23,58'/W80°51,40'] 29.[N30°21,05'/W81°18,94']					
3 NG-STJ-BO-NY-PH-BT-NF-SV-JK	13189,0	35,5	4,2% [0,00 a 19,00]	16,7 [5,00 28,48]	19,5 [0,98 28,25]
3 TK-STJ-BO-NY-PH-BT-NF-SV-JK	13063,6	35,2	4,1% [0,00 a 19,00]	16,6 [5,00 28,48]	19,5 [0,98 28,25]
JK-KO	10413,8	28,3	1,5% [0,00 a 13,00]	15,4 [4,02 26,95]	24,0 [9,79 28,33]
JK-NG	10590,7	28,0	2,2% [0,00 a 19,00]	15,7 [4,02 25,59]	23,9 [10,01 28,33]
JK-SZ	10478,8	27,7	2,2% [0,00 a 19,00]	15,7 [4,02 25,34]	24,0 [13,70 28,33]
JK-TK	10392,1	27,5	2,1% [0,00 a 17,00]	15,5 [4,02 25,86]	23,9 [10,01 28,33]
JK-YH	10381,0	27,5	2,1% [0,00 a 17,00]	15,5 [4,02 25,86]	23,9 [10,01 28,33]
JK-OS	10424,0	28,3	1,5% [0,00 a 13,00]	15,5 [4,02 26,95]	24,0 [9,79 28,33]
JK-YK	10592,3	28,0	2,2% [0,00 a 19,00]	15,7 [4,02 25,34]	23,9 [10,01 28,33]
JK-BU	10946,6	29,5	3,0% [0,00 a 21,00]	16,3 [4,02 31,36]	21,5 [3,03 28,33]
JK-MA	11668,6	30,7	0,4% [0,00 a 10,00]	14,3 [4,02 23,12]	25,5 [19,27 a 28,33]
JK-BT	710,1	1,9	3,1% [1,00 a 6,00]	17,3 [14,54 19,81]	15,7 [8,78 22,18]
JK-KE	11240,0	29,6	0,3% [0,00 a 5,00]	13,9 [4,02 19,80]	25,2 [16,54 28,33]

Tabela 63: Informações detalhadas da rota 4.1

Rota	Distancia percorrida (NM)	Tempo decorrido (dias)	Media percentual de ventos fortes	Media da velocidade dos ventos (nós)	Media da temperatura do mar (°C)
Waypoints: [Latitude/Longitude]					
4.1 OS-BR-SY-MB-AD	5849,8	15,7	1,0% [0,00 9,00]	12,3 [2,00 22,96]	24,2 [9,79 29,45]
1.[N34°36,26'/E135°22,30'] 2.[N34°23,22'/E134°55,54'] 3.[N33°29,53'/E134°55,54'] 4.[N32°49,54'/E138°38,72'] 5.[N0°33,72'/E143°40,62'] 6.[S1°54,29'/E145°3,65'] 7.[S5°16,83'/E147°24,56'] 8.[S8°19,46'/E149°46,77'] 9.[S9°8,87'/E151°48,16'] 10.[S26°34,35'/E153°38,63'] 11.[S27°11,81'/E154°12,70'] 12.[S33°58,34'/E152°37,83'] 13.[S33°49,00'/E151°28,46'] 14.[S35°21,29'/E151°28,46'] 15.[S39°9,08'/E149°26,91'] 16.[S39°22,66'/E145°47,37'] 17.[S38°19,39'/E144°31,88'] 18.[S39°20,80'/E143°29,27'] 19.[S38°16,29'/E140°6,28'] 20.[S35°45,96'/E138°13,80'] 21.[S35°32,57'/E137°50,22'] 22.[S35°1,99'/E138°19,94']					
4.1 NG-BR-SY-MB-AD	5767,3	15,5	1,0% [0,00 15,00]	12,3 [2,00 24,00]	24,3 [10,01 29,45]
4.1 YK-BR-SY-MB-AD	5731,5	15,4	1,0% [0,00 15,00]	12,3 [2,00 24,00]	24,4 [14,09 29,45]
4.1 YH-BR-SY-MB-AD	5740,5	15,4	1,2% [0,00 18,00]	12,3 [2,00 25,34]	24,3 [10,01 29,45]
AD-KO	5673,7	15,5	2,3% [0,00 40,00]	13,8 [5,50 45,00]	24,5 [9,79 29,47]
AD-NG	5655,2	15,6	2,2% [0,00 40,00]	14,1 [5,50 45,00]	24,5 [10,01 29,47]
AD-SZ	5640,1	15,5	2,5% [0,00 40,00]	14,1 [5,50 45,00]	24,5 [10,01 29,47]
AD-TK	5507,6	15,1	2,6% [0,00 40,00]	14,1 [5,50 45,00]	24,2 [10,01 29,47]
AD-YH	5501,4	15,1	2,6% [0,00 40,00]	14,1 [5,50 45,00]	24,2 [10,01 29,47]
AD-YK	5648,2	15,6	2,2% [0,00 40,00]	14,1 [5,50 45,00]	24,5 [14,09 29,47]
AD-OS	5701,0	15,6	2,3% [0,00 40,00]	13,8 [5,50 45,00]	24,4 [9,79 29,47]
AD-BU	5784,4	15,9	2,1% [0,00 40,00]	13,7 [5,50 45,00]	24,1 [10,93 29,47]
AD-MA	4415,1	12,1	1,2% [0,00 10,00]	13,0 [7,09 21,50]	24,0 [17,46 28,40]
AD-BT	11142,5	29,9	0,8% [0,00 9,00]	12,3 [2,00 22,96]	22,9 [8,78 27,17]
AD-KE	5092,0	14,0	1,7% [0,00 10,00]	13,9 [7,09 23,12]	23,5 [14,44 28,33]

Tabela 64: Informações detalhadas da rota 4.2

Rota	Distancia percorrida (NM)	Tempo decorrido (dias)	Media percentual de ventos fortes	Media da velocidade dos ventos (nós)	Media da temperatura do mar (°C)
Waypoints: [Latitude/Longitude]					
4.2 BU-BR-SY-MB-AD	6008,3	16,3	0,9% [0,00 7,00]	12,1 [2,00 19,62]	24,0 [10,53 29,39]
1.[N35°2,92'/E129°12,93'] 2.[N32°25,31/E127°44,13'] 3.[N27°36,93'/E132°38,19'] 4.[S2°21,32'/E145°53,36'] 5.[S5°9,63/E145°12,20'] 6.[S6°53,96'/E148°E12,43'] 7.[S9°49,95'/E152°2,72'] 8.[S11°14,43'/E152°0,77'] 9.[S26°55,91'/E153°59,92'] 10.[S33°0,53'/E153°55,63'] 11.[S33°55,74'/E151°31,89'] 12.[S37°45,67'/E151°33,37'] 13.[S39°22,86'/E146°59,35'] 14.[S39°19,41'/E145°2,04'] 15.[S38°19,91'/E144°36,29'] 16.[S39°14,99'/E143°52,32'] 17.[S38°52,40'/E141°25,33'] 18.[S37°43,18'/E139°10,96'] 19.[S35°47,45'/E138°21,31'] 20.[S35°34,50'/E137°53,00'] 21.[S34°52,75'/E138°25,94']					
AD-KO	5673,7	15,5	2,3% [0,00 40,00]	13,8 [5,50 45,00]	24,5 [9,79 29,47]
AD-NG	5655,2	15,6	2,2% [0,00 40,00]	14,1 [5,50 45,00]	24,5 [10,01 29,47]
AD-SZ	5640,1	15,5	2,5% [0,00 40,00]	14,1 [5,50 45,00]	24,5 [10,01 29,47]
AD-TK	5507,6	15,1	2,6% [0,00 40,00]	14,1 [5,50 45,00]	24,2 [10,01 29,47]
AD-YH	5501,4	15,1	2,6% [0,00 40,00]	14,1 [5,50 45,00]	24,2 [10,01 29,47]
AD-YK	5648,2	15,6	2,2% [0,00 40,00]	14,1 [5,50 45,00]	24,5 [14,09 29,47]
AD-OS	5701,0	15,6	2,3% [0,00 40,00]	13,8 [5,50 45,00]	24,4 [9,79 29,47]
AD-BU	5784,4	15,9	2,1% [0,00 40,00]	13,7 [5,50 45,00]	24,1 [10,93 29,47]
AD-MA	4415,1	12,1	1,2% [0,00 10,00]	13,0 [7,09 21,50]	24,0 [17,46 28,40]
AD-BT	11142,5	29,9	0,8% [0,00 9,00]	12,3 [2,00 22,96]	22,9 [8,78 27,17]
AD-KE	5092,0	14,0	1,7% [0,00 10,00]	13,9 [7,09 23,12]	23,5 [14,44 28,33]

Tabela 65: Informações detalhadas da rota 5

Rota	Distancia percorrida (NM)	Tempo decorrido (dias)	Media percentual de ventos fortes	Media da velocidade dos ventos (nós)	Media da temperatura do mar (°C)
Waypoints: [Latitude/Longitude]					
5 MA-KS-KE-HK-BGK-BR-SY-MB	8856,4	23,6	1,3% [0,00 50,00]	12,3 [3,50 28,75]	25,1 [14,18 28,68]
1.[N14°7,69'/E120°22,70'] 2.[N16°19,59'/E118°51,62'] 3.[N22°27,84'/E120°6,44'] 4.[N22°45,61'/E119°36,60'] 5.[N24°26,45'/E120°0,52'] 6.[N25°34,93'/E121°26,13'] 7.[N23°59,66'/E119°2,30'] 8.[N22°1,61'/E115°28,42'] 9.[N22°13,80'/E114°22,48'] 10.[N22°2,33'/E114°25,52'] 11.[N9°54,69'/N109°52,08'] 12.[N7°3,51'/E104°48,74'] 13.[N12°41,84'/E100°25,24'] 14.[N6°28,57'/E105°22,38'] 15.[N0°49,37'/E108°13,49'] 16.[S1°43,14'/E108°24,81'] 17.[S4°50,80'/E110°47,67'] 18.[S6°39,99'/E117°23,72'] 19.[S7°38,76'/E119°46,08'] 20.[S7°42,07'/E122°47,11'] 21.[S6°52,70'/E126°26,40'] 22.[S7°18,79'/E126°49,71'] 23.[S8°56,48'/E127°55,72'] 24.[S10°5,97'/E145°4,26'] 25.[S24°44,30'/E154°36,88'] 26.[S26°55,74'/E153°42,42'] 27.[S31°14,32'/E154°17,11'] 28.[S33°52,47'/E151°42,86'] 29.[S38°24,28'/E150°22,29'] 30.[S39°21,96'/E147°2,97'] 31.[S39°24,41'/E145°52,68'] 32.[S38°31,51'/E144°33,26']					
MB-KO	5262,8	14,4	2,4% [0,00 40,00]	13,9 [5,50 45,00]	25,0 [9,79 29,47]
MB-NG	5242,7	14,5	2,3% [0,00 40,00]	14,2 [5,50 45,00]	25,0 [10,01 29,47]
MB-SZ	5244,5	14,4	2,5% [0,00 40,00]	14,3 [5,50 45,00]	25,0 [10,01 29,47]
MB-TK	5107,7	14,0	2,7% [0,00 40,00]	14,2 [5,50 45,00]	24,8 [10,01 29,47]
MB-YH	5088,8	14,0	2,7% [0,00 40,00]	14,2 [5,50 45,00]	24,8 [10,01 29,47]
MB-OS	5277,5	14,4	2,4% [0,00 40,00]	13,9 [5,50 45,00]	25,0 [9,79 29,47]
MB-YK	5234,8	14,4	2,3% [0,00 40,00]	14,2 [5,50 45,00]	25,0 [14,09 29,47]
MB-BU	5374,9	14,7	2,1% [0,00 40,00]	13,8 [5,50 45,00]	24,6 [0,93 29,47]
MB-MA	4736,5	13,1	1,6% [0,00 13,00]	13,5 [7,09 25,77]	23,2 [6,22 28,40]
MB-BT	10192,5	28,7	0,7% [0,00 9,00]	12,4 [2,00 22,96]	23,1 [8,78 27,17]
MB-KE	5156,8	14,1	2,3% [0,00 40,00]	14,3 [5,50 45,00]	25,8 [16,54 29,47]

Tabela 66: Informações detalhadas da rota 6

Rota	Distancia percorrida (NM)	Tempo decorrido (dias)	Media percentual de ventos fortes	Media da velocidade dos ventos (nós)	Media da temperatura do mar (°C)
Waypoints: [Latitude/Longitude]					
6 BU-TK-SG-HK-SP-DB-DM-KW-UQ-BDK	8535,5	22,3	2,1% [0,00 100,00]	13,5 [3,44 37,00]	21,5 [7,13 27,98]
1.[N34°59,42'/E129°14,16'] 2.[N33°50,24'/E131°8,26'] 3.[N33°49,36'/E131°46,52'] 4.[N33°22,83'/E131°51,53'] 5.[N33°14,80'/E131°4,97'] 6.[N32°41,94'/E132°17,00'] 7.[N31°59,83'/E133°41,45'] 8.[N34°4,14'/E138°36,57'] 9.[N34°55,17'/E139°22,73'] 10.[N32°50,36'/E137°3,60'] 11.[N30°54,99'/E130°50,37'] 12.[N31°12,98'/E121°54,64'] 13.[N31°12,77'/E123°58,82'] 14.[N25°51,61'/E120°55,22'] 15.[N22°12,61'/E120°55,22'] 16.[N22°13,03'/E114°17,04'] 17.[N21°59,55'/E114°28,40'] 18.[N10°47,51'/E111°49,66'] 19.[N4°13,62'/E106°56,00'] 20.[1°54,18'/E106°46,42'] 21.[1°15,52'/E104°16,73'] 22.[N1°15,20'/E103°54,55'] 23.[N1°0,41'/E103°36,21'] 24.[N1°22,59'/E103°16,71'] 25.[N3°49,14'/E99°24,91'] 26.[N6°55,68'/E97°15,69'] 27.[N4°12,41'/E79°5,49'] 28.[N7°55,57'/E71°30,86'] 29.[N24°45,33'/E59°0,59'] 30.[N25°37,37'/E56°38,46'] 31.[N26°36,98'/E56°38,46'] 32.[N26°25,95'/E56°1,12'] 33.[N25°35,02'/E55°9,42'] 34.[N26°37,68'/E51°37,95'] 35.[N26°36,08'/E50°31,48'] 36.[N29°10,43'/E48°33,63'] 37.[N29°26,83'/E48°10,37'] 38.[N29°45,28'/E48°33,49'] 39.[N29°56,63'/E49°0,37']					
BDK-KO	7262,8	20,6	0,9% [0,00 9,00]	12,2 [5,00 23,12]	25,0 [9,79 27,98]
BDK-NG	7347,6	20,9	0,9% [0,00 9,00]	12,2 [5,00 23,12]	25,0 [13,86 27,98]
BDK-SZ	7380,2	20,9	1,0% [0,00 9,00]	12,3 [5,00 23,12]	24,9 [10,01 27,98]
BDK-TK	7453,3	21,1	1,1% [0,00 15,00]	12,4 [5,00 24,00]	24,8 [10,01 27,98]
BDK-YH	7442,5	21,1	1,1% [0,00 15,00]	12,4 [5,00 24,00]	24,8 [10,01 27,98]
BDK-OS	7274,1	20,7	0,9% [0,00 9,00]	12,2 [5,00 23,12]	25,0 [9,79 27,98]
BDK-YK	7344,9	20,8	0,9% [0,00 9,00]	12,2 [5,00 23,12]	25,0 [13,86 27,98]
BDK-BU	7040,9	20,0	0,9% [0,00 10,00]	12,1 [5,00 22,91]	23,9 [9,98 27,98]
BDK-MA	5732,6	16,4	1,8% [0,00 100,00]	10,6 [3,44 35,00]	26,1 [19,29 27,98]
BDK-BT	9287,6	25,9	4,8% [0,00 26,00]	15,8 [6,45 28,81]	17,4 [5,26 26,40]
BDK-KE	6355,2	18,1	0,8% [0,00 12,00]	11,6 [3,44 22,91]	25,2 [14,44 27,98]

Tabela 67: Informações detalhadas da rota 7

Rota	Distancia percorrida (NM)	Tempo decorrido (dias)	Media percentual de ventos fortes	Media da velocidade dos ventos (nós)	Media da temperatura do mar (°C)
Waypoints: [Latitude/Longitude]					
7 YH-DL-XG-QG-SH-HG	3367,2	9,1	2,3% [0,00 15,00]	15,8 [8,51 24,00]	10,1 [0,39 19,34]
1.[N35°24,61'/E139°45,39'] 2.[N35°18,78'/E139°43,95'] 3.[N35°15,41'/E139°48,58'] 4.[N34°58,01'/E139°38,62'] 5.[N34°48,38'/E139°16,61'] 6.[N33°58,36'/E138°39,64'] 7.[N29°50,27'/E130°54,10'] 8.[N32°35,08'/E124°5,20'] 9.[N38°6,93'/E122°51,96'] 10.[N38°43,79'/E121°45,28'] 11.[N38°30,28'/E121°43,36'] 12.[N38°46,36'/E118°10,41'] 13.[N38°20,37'/E122°40,42'] 14.[N36°37,62'/E123°14,15'] 15.[N35°56,18'/E120°26,41'] 16.[N31°39,93'/E122°25,07'] 17.[N31°11,97'/E121°59,01'] 18.[N30°59,46'/E123°11,02'] 19.[N30°3,73'/E123°29,76'] 20.[26°20,07'/121°53,63'] 21.[N24°35,23'/119°26,69'] 22.[N21°32,87'/E115°28,36'] 23.[N22°3,42'/E113°44,56'] 24.[N22°16,51'/E113°45,99'] 25.[N22°37,48'/E113°40,42']					
7 OS-DL-XG-QG-SH-HG	3200,2	8,5	1,8% [0,00 8,00]	15,2 [4,43 21,88]	9,6 [0,33 19,34]
HG-KO	1652,3	4,8	1,8% [0,00 4,00]	17,2 [11,52 20,88]	19,8 [9,79 23,45]
HG-NG	1718,6	4,9	2,4% [0,00 7,00]	17,9 [13,56 20,88]	19,7 [13,86 23,45]
HG-SZ	1744,8	4,9	2,6% [0,00 7,00]	18,0 [13,56 20,88]	19,7 [13,70 23,45]
HG-TK	1817,4	5,1	2,8% [0,00 15,00]	18,2 [13,56 24,00]	19,3 [10,01 23,45]
HG-YH	1811,5	5,1	2,8% [0,00 15,00]	18,2 [13,56 24,00]	19,4 [10,01 23,45]
HG-YK	1716,0	4,9	2,4% [0,00 7,00]	17,9 [13,56 20,88]	19,7 [13,86 23,45]
HG-BU	1291,5	3,7	2,9% [0,00 10,00]	17,7 [11,22 22,12]	13,8 [8,52 19,34]
HG-MA	690,7	1,9	2,0% [0,00 5,00]	16,3 [11,39 20,28]	22,9 [17,45 26,86]
HG-BT	14071,6	34,3	0,5% [0,00 7,00]	14,5 [4,02 20,88]	24,7 [9,52 28,33]
HG-KE	603,6	1,8	4,0% [0,00 10,00]	18,8 [13,56 22,12]	16,2 [14,44 19,34]

Tabela 68: Informações detalhadas da rota 8

Rota	Distancia percorrida (NM)	Tempo decorrido (dias)	Media percentual de ventos fortes	Media da velocidade dos ventos (nós)	Media da temperatura do mar (°C)
Waypoints: [Latitude/Longitude]					
8 TOM-YH-SZ-NG-KO-MJ-NI-NKH-VST	2446,1	7,0	3,2% [0,00 15,00]	17,2 [9,34 24,00]	9,6 [0,30 16,00]
1.[N42°38,00'/E141°38,00'] 2.[N39°18,11'/E143°11,37'] 3.[N34°36,31'/E141°5,02'] 4.[N34°47,10'/E139°32,43'] 5.[N35°15,99'/E139°48,11'] 6.[N35°20,74'/E139°42,25'] 7.[N35°14,97'/E139°48,08'] 8.[N34°56,20'/E139°42,59'] 9.[N34°51,88'/E139°16,54'] 10.[N34°28,30'/E139°2,15'] 11.[N34°32,34'/E138°38,45'] 12.[N35°3,18'/E138°36,93'] 13.[N34°22,09'/E138°22,67'] 14.[N34°26,25'/E137°2,07'] 15.[N34°49,01'/E136°42,40'] 16.[N34°22,33'/E137°5,51'] 17.[N34°4,61'/E136°59,53'] 18.[N33°5,94'/E135°55,02'] 19.[N33°29,62'/E134°58,81'] 20.[N34°24,66'/E134°59,41'] 21.[N34°36,23'/E135°8,56'] 22.[N34°38,38'/E134°51,49'] Nav. interior entre Chugoku e Shikoku até o mar do Japão. 25.[N34°44,63'/E130°33,43'] 26.[N35°40,72'/E132°44,47'] 27.[N37°48,31'/E137°25,10'] 28.[N37°34,95'/E138°22,62'] 29.[N37°59,24'/E138°45,20'] 30.[N38°37,40'/E139°2,79'] 31.[N42°28,40'/E132°55,78'] 32.[N42°40,25'/E132°15,68'] 33.[N43°1,37'/E131°59,32']					
VST-KO	988,0	2,5	2,0% [0,00 9,00]	16,3 [9,34 25,36]	9,2 [0,16 16,00]
VST-NG	1093,7	2,8	2,3% [0,00 9,00]	16,8 [9,34 25,36]	10,1 [0,16 16,00]
VST-SZ	1122,2	3,0	5,6% [0,00 32,00]	18,1 [12,62 24,00]	7,5 [0,30 15,88]
VST-TK	1100,3	3,0	5,5% [0,00 32,00]	18,0 [12,62 24,00]	7,2 [0,30 15,88]
VST-YH	1091,4	2,9	5,5% [0,00 32,00]	18,0 [12,62 24,00]	7,2 [0,30 15,88]
VST-OS	993,6	2,5	2,0% [0,00 9,00]	16,3 [9,34 25,36]	9,2 [0,16 16,00]
VST-YK	1080,1	2,8	2,3% [0,00 9,00]	16,8 [9,34 25,36]	10,1 [0,16 16,00]
VST-BU	543,9	1,4	1,3% [0,00 9,00]	16,8 [11,22 25,36]	6,3 [0,16 11,92]
VST-MA	2099,8	5,6	2,2% [0,00 9,00]	17,7 [11,22 25,36]	16,8 [0,16 26,86]
VST-BT	10795,7	28,9	4,00% [0,00 32,00]	16,1 [4,28 28,12]	18,3 [0,30 28,33]
VST-KE	1238,2	3,3	2,1% [0,00 9,00]	17,4 [13,65 25,36]	11,1 [0,16 18,93]

Tabela 69: Informações detalhadas da rota 9

Rota	Distancia percorrida (NM)	Tempo decorrido (dias)	Media percentual de ventos fortes	Media da velocidade dos ventos (nós)	Media da temperatura do mar (°C)
Waypoints: [Latitude/Longitude]					
9 BT-SJ-SV-JK	2624,9	7,1	1,5% [0,00 8,00]	14,9 [10,47 20,24]	21,9 [9,52 26,49]
1.[N39°3,07'/W76°20,50'] 2.[N38°51,29'/W76°25,60'] 3.[N38°25,97'/W76°22,50'] 4.[N37°42,95'/W76°5,00'] 5.[N37°4,57'/W76°9,15'] 6.[N36°34,85'/W74°50,87'] 7.[N18°32,56'/W66°9,61'] 8.[N31°55,94'/W80°36,68'] 9.[N30°19,54'/W81°13,04']					
JK-KO	10413,8	28,3	1,5% [0,00 13,00]	15,4 [4,02 26,95]	24,0 [9,79 28,33]
JK-NG	10590,7	28,0	2,2% [0,00 19,00]	15,7 [4,02 25,59]	23,9 [10,01 28,33]
JK-SZ	10478,8	27,7	2,2% [0,00 19,00]	15,7 [4,02 25,34]	24,0 [13,70 28,33]
JK-TK	10392,1	27,5	2,1% [0,00 17,00]	15,5 [4,02 25,86]	23,9 [10,01 28,33]
JK-YH	10381,0	27,5	2,1% [0,00 17,00]	15,5 [4,02 25,86]	23,9 [10,01 28,33]
JK-OS	10424,0	28,3	1,5% [0,00 13,00]	15,5 [4,02 26,95]	24,0 [9,79 28,33]
JK-YK	10592,3	28,0	2,2% [0,00 19,00]	15,7 [4,02 25,59]	23,9 [14,09 28,33]
JK-BU	10946,6	29,5	3,0% [0,00 21,00]	16,3 [4,02 31,36]	21,5 [3,03 28,33]
JK-MA	11668,6	30,7	0,4% [0,00 10,00]	14,3 [4,02 23,12]	25,5 [19,27 28,33]
JK-BT	710,1	1,9	3,1% [1,00 6,00]	17,3 [14,54 19,81]	15,7 [8,78 22,18]
JK-KE	11261,3	29,6	0,3% [0,00 5,00]	13,9 [4,02 19,80]	25,2 [16,54 28,33]

Tabela 70: Informações detalhadas da rota 10.1

Rota	Distancia percorrida (NM)	Tempo decorrido (dias)	Media percentual de ventos fortes	Media da velocidade dos ventos (nós)	Media da temperatura do mar (°C)
Waypoints: [Latitude/Longitude]					
10.1 BU-KO	468,7	1,2	1,0% [0,00 4,00]	14,1 [9,34 18,11]	12,0 [9,79 16,00]
1.[N35°0,53'/E129°13,24'] 2.[N33°59,57'/E130°52,69] 3.[N33°58,57'/E131°5,03'] 4.[N33°46,34'/E131°13,33'] 5.[N33°49,65'/E131°47,93'] 6.[N32°31,30'/E132°18,97'] 7.[N32°31,30'/E133°18,84'] 8.[N33°23,45'/E134°58,16'] 9.[N34°23,05'/E134°59,61'] 10.[N34°35,15'/E135°10,37']					
KO-KO	0,0	0,0	4,0% [4,0 4,0]	18,1 [18,11 18,11]	16,00 [16,00 16,00]
KO-NG	308,1	0,8	2,3% [0,00 7,00]	16,2 [11,52 19,58]	14,0 [9,79 16,00]
KO-SZ	328,3	0,9	3,5% [0,00 7,00]	17,3 [11,52 20,40]	13,7 [9,79 16,00]
KO-TK	407,3	1,0	3,6% [0,00 15,00]	17,2 [11,52 24,00]	13,1 [9,79 16,00]
KO-YH	395,6	1,0	3,6% [0,00 15,00]	17,2 [11,52 24,00]	13,2 [9,79 16,00]
KO-OS	9,9	0,0	4,0% [4,0 4,0]	18,1 [18,11 18,11]	16,00 [16,00 16,00]
KO-YK	304,8	0,8	2,3% [0,00 7,00]	16,2 [11,52 19,58]	13,9 [9,79 16,00]
KO-BU	502,7	1,3	1,0% [0,00 4,00]	14,2 [9,34 18,11]	12,0 [9,79 16,00]
KO-MA	1834,6	4,8	2,0% [0,00 9,00]	16,4 [11,15 23,12]	21,8 [9,79 26,86]
KO-BT	10569,5	29,1	4,6% [0,00 30,00]	16,3 [3,53 30,25]	19,3 [8,78 27,60]
KO-KE	1054,3	2,9	2,3% [0,00 4,00]	16,8 [11,52 19,61]	18,9 [9,79 21,86]

Tabela 71: Informações detalhadas da rota 10.2

Rota	Distancia percorrida (NM)	Tempo decorrido (dias)	Media percentual de ventos fortes	Media da velocidade dos ventos (nós)	Media da temperatura do mar (°C)
Waypoints: [Latitude/Longitude]					
10.2 TK-KO-KE-HK	1906,2	5,3	3,5% [0,00 15,00]	17,9 [11,23 24,00]	15,9 [9,79 19,84]
1.[N35°28,86'/E139°52,94'] 2.[N35°20,02'/E139°44,36'] 3.[N35°14,47'/E139°47,63'] 4.[N35°2,98'/E139°44,25'] 5.[N34°45,38'/E139°11,55'] 6.[N33°20,31'/E138°16,33'] 7.[N33°6,52'/E135°27,73'] 8.[N33°28,47'/E134°58,85'] 9.[N34°22,36'/E134°59,01'] 10.[N34°35,74'/E135°9,71'] 11.[N34°24,92'/E134°58,99'] 12.[N32°37,65'/E134°59,29'] 13.[N28°54,61'/E130°53,03'] 14.[N28°56,15'/E125°57,09'] 15.[N25°25,63'/E121°36,36'] 16.[N25°13,65'/E120°27,56'] 17.[N24°3,71'/E119°52,58'] 18.[N23°41,57'/E118°45,76'] 19.[N22°10,35'/E116°18,89'] 20.[N22°12,93'/E114°16,53']					
HK-NG	1766,4	5,1	2,4% [0,00 11,00]	17,8 [11,23 21,33]	19,9 [14,09 23,49]
HK-SZ	1759,6	5,0	2,7% [0,00 15,00]	17,9 [11,23 24,00]	19,9 [10,01 23,49]
HK-TK	1825,8	5,2	2,7% [0,00 15,00]	17,8 [11,23 24,00]	19,6 [10,01 23,59]
HK-YH	1814,9	5,2	2,7% [0,00 15,00]	17,8 [11,23 24,00]	19,7 [10,01 23,59]
HK-OS	1680,3	4,8	2,3% [0,00 7,00]	17,5 [11,23 20,88]	20,1 [9,79 23,59]
HK-YK	1765,6	5,1	2,4% [0,00 11,00]	17,8 [11,23 21,31]	19,9 [14,09 23,59]
HK-BU	1210,1	3,5	2,7% [0,00 10,00]	17,3 [11,22 22,12]	13,6 [9,98 17,29]
HK-MA	691,8	1,9	1,6% [0,00 5,00]	16,1 [11,23 20,20]	22,5 [16,92 26,86]
HK-BT	11803,7	32,6	3,8% [0,00 21,00]	16,3 [6,52 31,00]	20,5 [8,78 27,92]
HK-KE	533,5	1,6	4,1% [0,00 10,00]	18,3 [11,23 22,12]	15,8 [14,44 17,29]

Tabela 72: Informações detalhadas da rota 10.3

Rota	Distancia percorrida (NM)	Tempo decorrido (dias)	Media percentual de ventos fortes	Media da velocidade dos ventos (nós)	Media da temperatura do mar (°C)
Waypoints: [Latitude/Longitude]					
10.3 TK-KO-SGP-PKL-PN-RG-SGP	5503,7	14,7	1,5% [0,00 15,00]	13,0 [5,38 24,00]	24,0 [9,79 28,13]
1.[N35°28,47'/E139°52,41'] 2.[N35°18,14'/E139°44,08'] 3.[N35°15,71'/E139°47,69'] 4.[N34°58,63'/E139°37,90'] 5.[N34°51,95'/E139°14,96'] 6.[N33°29,23'/E138°36,39'] 7.[N33°3,09'/E135°0,33'] 8.[N34°22,66'/E134°59,06'] 9.[N34°36,54'/E135°9,80'] 10.[N34°25,15'/E134°59,24'] 11.[N33°3,23'/E134°57,65'] 12.[N24°43,37'/E129°58,38'] 13.[N16°29,86'/E114°21,83'] 14.[N3°19,18'/E105°0,53'] 15.[N1°21,33'/E104°29,97'] 16.[N1°15,19'/E104°1,74'] 17.[N1°12,89'/E103°53,75'] 18.[N1°2,03'/E103°37,75'] 19.[N2°43,83'/E101°6,10'] 20.[N3°9,26'/E101°9,35'] 21.[N4°13,63'/E100°6,20'] 22.[N5°19,83'/E100°21,69'] 23.[N5°30,32'/E100°21,86'] 24.[N7°43,84'/E96°57,25'] 25.[N16°25,50'/E96°24,87'] 26.[N6°45,21'/E97°27,16'] 27.[N2°30,82'/E101°18,76'] 28.[N1°4,11'/E103°36,11'] 29.[N1°11,60'/E103°51,69']					
SGP-TK	3374,3	8,6	2,5% [0,00 15,00]	16,6 [9,00 24,00]	23,0 [10,01 27,45]
SGP-NG	2901,1	8,3	2,2% [0,00 11,00]	16,4 [9,00 23,12]	23,3 [10,01 27,45]
SGP-KO	2849,3	8,2	1,9% [0,00 9,00]	16,1 [9,00 23,12]	23,3 [9,79 27,45]
SGP-YH	2981,5	8,5	2,5% [0,00 15,00]	16,6 [9,00 24,00]	23,0 [10,01 27,45]
SGP-OS	2860,4	8,2	2,0% [0,00 9,00]	16,1 [9,00 23,12]	23,2 [9,79 27,45]
SGP-YK	2897,3	8,3	2,2% [0,00 11,00]	16,4 [9,00 23,12]	23,3 [13,86 27,45]
SGP-BU	2566,0	7,4	2,3% [0,00 10,00]	16,5 [9,00 22,12]	20,5 [9,98 27,45]
SGP-MA	1321,3	3,8	3,5% [0,00 100,00]	13,2 [5,00 35,00]	26,6 [26,00 27,45]
SGP-BT	12904,4	35,8	3,8% [0,00 21,00]	16,4 [4,29 31,00]	21,3 [8,78 28,33]
SGP-KE	1889,2	5,5	2,2% [0,00 10,00]	16,1 [9,00 22,12]	24,00 [14,44 27,45]

Tabela 73: Informações detalhadas da rota 10.4

Rota	Distancia percorrida (NM)	Tempo decorrido (dias)	Media percentual de ventos fortes	Media da velocidade dos ventos (nós)	Media da temperatura do mar (°C)
Waypoints: [Latitude/Longitude]					
10.4 KO-CE	1751,0	4,7	1,4 [0,00 7,00]	15,3 [9,05 19,06]	22,7 [9,79 27,37]
1.[N34°26,64'/E135°9,67'] 2.[N34°24,54'/E134°58,77'] 3.[N32°50,71'/E135°1,09'] 4.[N10°33,93'/E126°8,61'] 5.[N10°38,50'/E125°21,67'] 6.[N9°54,01'/E125°23,46'] 7.[N9°38,93'/E125°3,55'] 8.[N10°27,04'/E124°30,76'] 9.[N10°8,34'/E123°58,24']					
CE-TK	1902,1	5,4	1,8 [0,00 15,00]	16,0 [9,05 24,00]	22,4 [10,01 27,37]
CE-SZ	1839,7	5,2	1,9% [0,00 15,00]	16,0 [9,05 24,00]	22,8 [10,01 27,37]
CE-NG	1819,2	5,2	1,5% [0,00 11,00]	15,6 [9,05 21,31]	22,8 [10,01 27,37]
CE-KO	1751,0	4,9	1,5% [0,00 7,00]	15,4 [9,05 19,06]	22,8 [9,79 27,37]
CE-YH	1893,6	5,3	1,8% [0,00 15,00]	16,0 [9,05 24,00]	22,5 [10,01 27,37]
CE-OS	1760,7	5,0	1,5% [0,00 7,00]	15,4 [9,05 19,06]	22,8 [9,79 27,37]
CE-YK	1815,7	5,2	1,5% [0,00 11,00]	15,6 [9,05 21,31]	22,8 [13,86 27,37]
CE-BU	1742,9	4,9	1,9% [0,00 7,00]	16,7 [9,05 20,57]	21,3 [9,98 27,37]
CE-MA	462,0	1,3	0,2% [0,00 1,00]	10,6 [8,74 12,47]	26,8 [26,36 27,13]
CE-BT	11468,0	32,4	0,9% [0,00 9,00]	14,3 [4,29 29,78]	24,1 [9,52 28,33]
CE-KE	1217,7	3,4	2,9% [0,00 10,00]	16,0 [8,74 23,12]	23,2 [14,44 27,13]

Tabela 74: Informações detalhadas da rota 10.5

Rota	Distancia percorrida (NM)	Tempo decorrido (dias)	Media percentual de ventos fortes	Media da velocidade dos ventos (nós)	Media da temperatura do mar (°C)
Waypoints: [Latitude/Longitude]					
10.5 KE-KA-MA-BGK	2411,0	6,3	1,9% [0,00 10,00]	15,8 [7,86 23,12]	25,0 [14,45 27,73]
1.[N25°25,71'/E121°47,86'] 2.[N25°15,22'/E120°35,62'] 3.[N22°50,31'/E119°37,24'] 4.[N22°37,21'/E120°8,35'] 5.[N16°6,41'/E118°50,40'] 6.[N14°11,61'/E120°5,88'] 7.[N14°19,58'/E120°39,73'] 8.[N13°59,38'/E119°10,37'] 9.[N6°29,59'/E104°57,85'] 10.[N11°31,05'/E100°25,44'] 11.[N13°17,04'/E100°23,89']					
BGK-KO	3026,8	8,8	2,2% [0,00 9,00]	16,5 [8,82 23,12]	23,6 [9,79 27,76]
BGK-NG	3105,2	9,0	2,4% [0,00 11,00]	16,8 [8,82 23,12]	23,6 [14,09 27,76]
BGK-SZ	3117,9	9,0	2,6% [0,00 15,00]	16,9 [8,82 24,00]	23,5 [10,01 27,76]
BGK-TK	3188,3	9,2	2,6% [0,00 15,00]	16,9 [8,82 24,00]	23,5 [10,01 27,76]
BGK-YH	3176,2	9,1	2,6% [0,00 15,00]	16,9 [8,82 24,00]	23,5 [10,01 27,76]
BGK-OS	3036,1	8,8	2,3% [0,00 9,00]	16,9 [8,82 23,12]	23,6 [9,79 27,76]
BGK-YK	3102,0	9,0	2,4% [0,00 11,00]	16,8 [8,82 23,12]	23,5 [14,09 27,76]
BGK-BU	2777,6	8,1	2,4% [0,00 10,00]	16,8 [8,82 22,12]	20,9 [9,98 27,76]
BGK-MA	1582,7	4,6	1,0% [0,00 5,00]	14,6 [8,82 18,85]	26,6 [25,26 27,76]
BGK-BT	13258,3	36,9	3,6% [0,00 21,00]	16,5 [6,89 27,21]	21,8 [9,52 27,76]
BGK-KE	2090,3	6,1	2,5% [0,00 10,00]	16,4 [8,82 22,12]	23,6 [14,44 27,76]

## *7 Apêndice C - Portos usados para cálculo dos coeficientes de custo de viagem*

A descrição completa das rotas está separada em duas partes: A primeira parte mostra as características da rota em si e os portos visitados, e a segunda mostra a viagem em lastro do navio para início da próxima rota.

No caso de haver vários portos iniciais para uma rota, o tempo usado para se calcular os coeficientes de custo de viagem será do porto que exhibe o pior caso de tempo, isto é, a viagem mais longa. Isso possibilita que qualquer porto possa ser usado inicialmente. O mesmo procedimento foi usado no caso de haver portos múltiplos de destino da próxima rota.

Os tempos de estadia nos portos foram considerados como iguais a 1 dia, suficiente para manobras de entrada e saída nos terminais, carregamento e descarga da carga.

Os portos visitados foram abreviados:

**Portos do Japão:** KO = Kobe; MO = Moji; NI = Niigata; NG = Nagoya; OS = Osaka; SZ = Shimizu; TOM = Tomakomai; TK = Tokyo; YH = Yokohama; YK = Yokkaichi.

**Portos da costa leste norte-americana e atlântico:** BT = Baltimore; BO = Boston; NY = New York; PH = Philadelphia; BT = Baltimore; NF = Norfolk; SV = Savannah; JK = Jacksonville; STJ = St. John; SJ = San Juan

**Portos da costa oeste norte-americana:** LA = Los Angeles; OK Oakland; PL = Portland; PR = Prince Rupert; SE = Seattle; VA = Vancouver.

**Portos asiáticos:** BGK = Bangkok; BU = Busan; CE = Cebu; DL = Dalian; HK=Hong Kong; KA = Kaohsiung; KE = Keelung; MA = Manila; PKL = Port Kelang; PN

= Penang; RG = Rangoon; SGP = Singapore; SG = Shanghai; SP = Singapura; NKH = Nakhodka VST = Vostochny.

**Portos australianos:** AD = Adelaide; BR = Brisbane; MB = Melbourne; SY = Sydney.

**Portos do Oriente Médio:** BDK = Bandar Khomeini; DB = Dubai; DM = Dammam; KW = Kuwait; UQ = Umm Qasr;

### Observação quanto a rota de Nova York.

Alguns portos da rota de Nova York tiveram suas frequências alteradas para que pudesse ser possível simular com somente uma rota todos os portos com diferentes frequências. A seguir os cálculos e considerações feitas.

St. John (uma vez por semana), Boston (uma vez a cada 4 semanas), New York (uma vez por semana), Philadelphia (uma vez a cada 4 semanas), Baltimore (uma vez a cada duas semanas), Norfolk (uma vez a cada 4 semanas), Savannah (aproximadamente uma vez por semana, com parada em um outro porto durante a viagem), Jacksonville (uma vez a cada 4 semanas).

A diferença em não passar pelo porto de Boston é de 0,1 dia, com 48,5 NM. A diferença em não passar pelo porto da Philadelphia é de 0,3 dias, com 125,9 NM. A diferença em não passar pelo porto de Baltimore é de 0,8 dias, com 289,7 NM. A diferença em não passar pelo porto de Norfolk é de 0,1 dia, com 42,0 NM. A diferença em não passar pelo porto de Jacksonville é de 0,1 dia, com 24,4 NM. Como a menor unidade de tempo é 0,1 dia temos o mesmo tempo de viagem para diferentes distâncias. Isso somente irá ocorrer em pequenas distância e não irá alterar os resultados.

Nove portos são visitados, KO-STJ-BO-NY-PH-BT-NF-SV-JK, o que consumiria 9 dias para carga/descarga. Porém alguns portos são visitados na segunda ou na quarta viagem, o que irá dividir o 'um' dia de carregamento/descarga em dois. Para os portos que irão ser visitados na segunda viagem o tempo será dividido por 2 e dividido por 4 para os portos que irão ser visitados na quarta viagem.

Quatro portos são visitados com frequência de 1 vez a cada 7 dias (KO, STJ, NY): 4 dias para carga/descarga. 1 portos é visitados com frequência de 1 vez a cada 14 dias (BT): 0,5 dias para carga/descarga. Na segunda viagem se completa o 1 dia necessário para o carregamento/descarga. Quatro portos são visitados com frequência de 1 vez a cada 28 dias (BO, PH, NF, JK):  $4 \cdot 0,25 = 1$  dia para carga/descarga. Na quarta viagem todos

os portos terão o dia necessário para carga/descarga. Total de tempo para carga/descarga nos portos:  $4+0,5+1 = 5,5$  dias.

É também necessário descontar as pernadas não usadas para se chegar aos portos não visitados. A seguir os descontos de dia para cada pernada entre os portos.

Portos com frequência de 1/28 dias (1 a cada 4 viagens):

**BO:**  $0,1 \text{ dia}/4 = 0,025 \text{ dia}$

**PH:**  $0,3 \text{ dia}/4 = 0,075 \text{ dia}$

**NF:**  $0,1 \text{ dia}/4 = 0,025 \text{ dia}$

**JK:**  $0,1 \text{ dia}/4 = 0,025 \text{ dia}$

Porto com frequência de 1/14 dias (1 a cada 2 viagens):

**BT:**  $0,8 \text{ dia}/2 = 0,4 \text{ dia}$

Desconto total = - 0,55 dias. Aproximadamente igual a - 0,5 dias.

Para a rota 3, passando por KO-STJ-BO-NY-PH-BT-NF-SV-JK, nos dá o maior tempo de passagem, com 35,9 dias.

Total de tempo para carga/descarga da rota 3: 5,0 dias.

Logo o tempo de viagem da rota 3, desconsiderando a viagem para a próxima rota é: 40,9 dias.

Tabela 75: Portos usados para cálculo dos coeficientes de custo de viagem da rota 1.1.

Rotação de portos usado na rota 1.1	Dias consumidos nos portos//viagem	Tempo da viagem (dias)
KO-OK-LA	3//14,2	17,2
Próxima rota designada	Rotação de portos usados	Tempo da viagem (dias)
Rota 1.1	LA-KO	15,3
Rota 1.2	LA-TK	14,2
Rota 2	LA-KO	15,3
Rota 3	LA-KO	15,3
Rota 4.1	LA-OS	15,3
Rota 4.2	LA-BU	15,2
Rota 5	LA-MA	19,1
Rota 6	LA-BU	15,2
Rota 7	LA-OS	15,3
Rota 8	LA-YH	14,2
Rota 9	LA-BT	16,0
Rota 10.1	LA-BU	15,2
Rota 10.2	LA-TK	14,2
Rota 10.3	LA-TK	14,2
Rota 10.4	LA-KO	15,3
Rota 10.5	LA-KE	17,9

Tabela 76: Portos usados para cálculo dos coeficientes de custo de viagem da rota 1.2.

Rotação de portos usado na rota 1.2	Dias consumidos nos portos//viagem	Tempo da viagem (dias)
TO-BU	2//2,2	4,2
Próxima rota designada	Rotação de portos usados	Tempo da viagem (dias)
Rota 1.1	BU-TK	2,0
Rota 1.2	BU-TK	2,0
Rota 2	BU-TK	2,0
Rota 3	BU-TK	2,0
Rota 4.1	BU-YH	1,9
Rota 4.2	BU-BU	0
Rota 5	BU-MA	3,9
Rota 6	BU-BU	0
Rota 7	BU-YH	1,9
Rota 8	BU-YH	1,9
Rota 9	BU-BT	28,6
Rota 10.1	BU-BU	0
Rota 10.2	BU-TK	2,0
Rota 10.3	BU-TK	2,0
Rota 10.4	BU-KO	1,2
Rota 10.5	BU-KE	1,9

Tabela 77: Portos usados para cálculo dos coeficientes de custo de viagem da rota 2.

Rotação de portos usado na rota 2	Dias consumidos nos portos//viagem	Tempo da viagem (dias)
KO-PR-VA-SE-PL	5//14,3	19,3
Próxima rota designada	Rotação de portos usados	Tempo da viagem (dias)
Rota 1.1	PL-KO	13,6
Rota 1.2	PL-TK	12,6
Rota 2	PL-KO	13,6
Rota 3	PL-KO	13,6
Rota 4.1	PL-OS	13,6
Rota 4.2	PL-BU	13,6
Rota 5	PL-MA	17,4
Rota 6	PL-BU	13,6
Rota 7	PL-OS	13,6
Rota 8	PL-YH	12,6
Rota 9	PL-BT	17,8
Rota 10.1	PL-BU	13,6
Rota 10.2	PL-TK	12,6
Rota 10.3	PL-TK	12,6
Rota 10.4	PL-KO	13,6
Rota 10.5	PL-KE	16,2

Tabela 78: Portos usados para cálculo dos coeficientes de custo de viagem da rota 3.

Rotação de portos usado na rota 3	Dias consumidos nos portos//viagem	Tempo da viagem (dias)
KO-STJ-BO-NY-PH-BT-NF-SV-JK	5//35,9	40,9
Próxima rota designada	Rotação de portos usados	Tempo da viagem (dias)
Rota 1.1	JK-KO	28,3
Rota 1.2	JK-TK	27,5
Rota 2	JK-KO	28,3
Rota 3	JK-KO	28,3
Rota 4.1	JK-OS	28,3
Rota 4.2	JK-BU	29,5
Rota 5	JK-MA	30,7
Rota 6	JK-BU	29,5
Rota 7	JK-OS	28,3
Rota 8	JK-YH	27,5
Rota 9	JK-BT	1,9
Rota 10.1	JK-BU	29,5
Rota 10.2	JK-TK	27,5
Rota 10.3	JK-TK	27,5
Rota 10.4	JK-KO	28,3
Rota 10.5	PL-KE	29,6

Tabela 79: Portos usados para cálculo dos coeficientes de custo de viagem da rota 4.1.

Rotação de portos usado na rota 4.1	Dias consumidos nos portos//viagem	Tempo da viagem (dias)
OS-BR-SY-MB-AD	5//15,7	20,7
Próxima rota designada	Rotação de portos usados	Tempo da viagem (dias)
Rota 1.1	AD-NG	15,6
Rota 1.2	AD-TK	15,1
Rota 2	AD-NG	15,6
Rota 3	AD-NG	15,6
Rota 4.1	AD-OS, AD-YK ou AD-NG	15,6
Rota 4.2	AD-BU	15,9
Rota 5	AD-MA	12,1
Rota 6	AD-BU	15,9
Rota 7	AD-OS	15,6
Rota 8	AD-YH	15,1
Rota 9	AD-BT	29,9
Rota 10.1	AD-BU	15,9
Rota 10.2	AD-TK	15,1
Rota 10.3	AD-TK	15,1
Rota 10.4	AD-KO	15,5
Rota 10.5	AD-KE	14,0

Tabela 80: Portos usados para cálculo dos coeficientes de custo de viagem da rota 4.2.

Rotação de portos usado na rota 4.2	Dias consumidos nos portos//viagem	Tempo da viagem (dias)
BU-BR-SY-MB-AD	5//16,3	21,3
Próxima rota designada	Rotação de portos usados	Tempo da viagem (dias)
Rota 1.1	AD-NG	15,6
Rota 1.2	AD-TK	15,1
Rota 2	AD-NG	15,6
Rota 3	AD-NG	15,6
Rota 4.1	AD-OS, AD-YK ou AD-NG	15,6
Rota 4.2	AD-BU	15,9
Rota 5	AD-MA	12,1
Rota 6	AD-BU	15,9
Rota 7	AD-OS	15,6
Rota 8	AD-YH	15,1
Rota 9	AD-BT	29,9
Rota 10.1	AD-BU	15,9
Rota 10.2	AD-TK	15,1
Rota 10.3	AD-TK	15,1
Rota 10.4	AD-KO	15,5
Rota 10.5	AD-KE	14,0

Tabela 81: Portos usados para cálculo dos coeficientes de custo de viagem da rota 5.

Rotação de portos usado na rota 5	Dias consumidos nos portos//viagem	Tempo da viagem (dias)
MA-KS-KE-HK-BK-BR-SY-MB	8//23,6	31,6
Próxima rota designada	Rotação de portos usados	Tempo da viagem (dias)
Rota 1.1	MB-NG	14,5
Rota 1.2	MB-TK	14,0
Rota 2	MB-NG	14,5
Rota 3	MB-NG	14,5
Rota 4.1	MB-NG	14,5
Rota 4.2	MB-BU	14,7
Rota 5	MB-MA	13,1
Rota 6	MB-BU	14,7
Rota 7	MB-OS	14,4
Rota 8	MB-YH	14,0
Rota 9	MB-BT	28,7
Rota 10.1	MB-BU	14,7
Rota 10.2	MB-TK	14,0
Rota 10.3	MB-TK	14,0
Rota 10.4	MB-KO	14,4
Rota 10.5	MB-KE	14,1

Tabela 82: Portos usados para cálculo dos coeficientes de custo de viagem da rota 6.

Rotação de portos usado na rota 6	Dias consumidos nos portos//viagem	Tempo da viagem (dias)
BU-TK-SG-HK-SP-DB-DM-KW-UQ-BDK	10//22,3	32,3
Próxima rota designada	Rotação de portos usados	Tempo da viagem (dias)
Rota 1.1	BDK-TK	21,1
Rota 1.2	BDK-TK	21,1
Rota 2	BDK-TK ou BDK-YH	21,1
Rota 3	BDK-TK	21,1
Rota 4.1	BDK-YH	21,1
Rota 4.2	BDK-BU	20,0
Rota 5	BDK-MA	16,4
Rota 6	BDK-BU	20,0
Rota 7	BDK-YH	21,1
Rota 8	BDK-YH	21,1
Rota 9	BDK-BT	25,9
Rota 10.1	BDK-BU	20,0
Rota 10.2	BDK-TK	21,1
Rota 10.3	BDK-TK	21,1
Rota 10.4	BDK-KO	20,6
Rota 10.5	BDK-KE	18,1

Tabela 83: Portos usados para cálculo dos coeficientes de custo de viagem da rota 7.

Rotação de portos usado na rota 7	Dias consumidos nos portos//viagem	Tempo da viagem (dias)
YH-DL-XG-QG-SH-HG	6//9,1	15,1
Próxima rota designada	Rotação de portos usados	Tempo da viagem (dias)
Rota 1.1	HG-TK	5,1
Rota 1.2	HG-TK	5,1
Rota 2	HG-TK	5,1
Rota 3	HG-TK	5,1
Rota 4.1	HG-YK ou HG-NG	4,9
Rota 4.2	HG-BU	3,7
Rota 5	HG-MA	1,9
Rota 6	HG-BU	3,7
Rota 7	HG-YH	5,1
Rota 8	HG-YH	5,1
Rota 9	HG-BT	34,3
Rota 10.1	HG-BU	3,7
Rota 10.2	HG-TK	5,1
Rota 10.3	HG-TK	5,1
Rota 10.4	HG-KO	4,8
Rota 10.5	HG-KE	1,8

Tabela 84: Portos usados para cálculo dos coeficientes de custo de viagem da rota 8.

Rotação de portos usado na rota 8	Dias consumidos nos portos//viagem	Tempo da viagem (dias)
TOM-YH-SZ-NG-KO-MJ-NI-NKH-VST	9//7,0	16,0
Próxima rota designada	Rotação de portos usados	Tempo da viagem (dias)
Rota 1.1	VST-TK ou VST-SZ	3,0
Rota 1.2	VST-TK	3,0
Rota 2	VST-TK ou VST-SZ	3,0
Rota 3	VST-TK	3,0
Rota 4.1	VST-YH	2,9
Rota 4.2	VST-BU	1,4
Rota 5	VST-MA	5,6
Rota 6	VST-BU	1,4
Rota 7	VST-YH	2,9
Rota 8	VST-YH	2,9
Rota 9	VST-BT	28,9
Rota 10.1	VST-BU	1,4
Rota 10.2	VST-TK	3,0
Rota 10.3	VST-TK	3,0
Rota 10.4	VST-KO	2,5
Rota 10.5	VST-KE	3,3

Tabela 85: Portos usados para cálculo dos coeficientes de custo de viagem da rota 9.

Rotação de portos usado na rota 9	Dias consumidos nos portos//viagem	Tempo da viagem (dias)
BT-SJ-SV-JK	4//7,1	11,1
Próxima rota designada	Rotação de portos usados	Tempo da viagem (dias)
Rota 1.1	JK-KO	28,3
Rota 1.2	JK-TK	27,5
Rota 2	JK-KO	28,3
Rota 3	JK-KO	28,3
Rota 4.1	JK-OS	28,3
Rota 4.2	JK-BU	29,5
Rota 5	JK-MA	30,7
Rota 6	JK-BU	29,5
Rota 7	JK-OS	28,3
Rota 8	JK-YH	27,5
Rota 9	JK-BT	1,9
Rota 10.1	JK-BU	29,5
Rota 10.2	JK-TK	27,5
Rota 10.3	JK-TK	27,5
Rota 10.4	JK-KO	28,3
Rota 10.5	JK-KE	29,6

Tabela 86: Portos usados para cálculo dos coeficientes de custo de viagem da rota 10.1.

Rotação de portos usado na rota 10.1	Dias consumidos nos portos//viagem	Tempo da viagem (dias)
BU-KO	2//1,2	3,2
Próxima rota designada	Rotação de portos usados	Tempo da viagem (dias)
Rota 1.1	KO-TK	1,0
Rota 1.2	KO-TK	1,0
Rota 2	KO-TK	1,0
Rota 3	KO-TK	1,0
Rota 4.1	KO-YH	1,0
Rota 4.2	KO-BU	1,3
Rota 5	KO-MA	4,8
Rota 6	KO-BU	1,3
Rota 7	KO-YH	1,0
Rota 8	KO-YH	1,0
Rota 9	KO-BT	29,1
Rota 10.1	KO-BU	1,3
Rota 10.2	KO-TK	1,0
Rota 10.3	KO-TK	1,0
Rota 10.4	KO-KO	0
Rota 10.5	KO-KE	2,9

Tabela 87: Portos usados para cálculo dos coeficientes de custo de viagem da rota 10.2.

Rotação de portos usado na rota 10.3	Dias consumidos nos portos//viagem	Tempo da viagem (dias)
TK-KO-KE-HK	4//5,3	9,3
Próxima rota designada	Rotação de portos usados	Tempo da viagem (dias)
Rota 1.1	HK-TK	5,2
Rota 1.2	HK-TK	5,2
Rota 2	HK-TK	5,2
Rota 3	HK-TK	5,2
Rota 4.1	HK-YH	5,2
Rota 4.2	HK-BU	3,5
Rota 5	HK-MA	1,9
Rota 6	HK-BU	3,5
Rota 7	HK-YH	5,2
Rota 8	HK-YH	5,2
Rota 9	HK-BT	32,6
Rota 10.1	HK-BU	3,5
Rota 10.2	HK-TK	5,2
Rota 10.3	HK-TK	5,2
Rota 10.4	HK-KO	4,8
Rota 10.5	HK-KE	1,6

Tabela 88: Portos usados para cálculo dos coeficientes de custo de viagem da rota 10.3.

Rotação de portos usado na rota 10.3	Dias consumidos nos portos//viagem	Tempo da viagem (dias)
TK-KO-SG-PKL-PN-RG-SG	7//14,7	21,7
Próxima rota designada	Rotação de portos usados	Tempo da viagem (dias)
Rota 1.1	SGP-TK	8,6
Rota 1.2	SGP-TK	8,6
Rota 2	SGP-TK	8,6
Rota 3	SGP-TK	8,6
Rota 4.1	SGP-YH	8,5
Rota 4.2	SGP-BU	7,4
Rota 5	SGP-MA	3,8
Rota 6	SGP-BU	7,4
Rota 7	SGP-YH	8,5
Rota 8	SGP-YH	8,5
Rota 9	SGP-BT	35,8
Rota 10.1	SGP-BU	7,4
Rota 10.2	SGP-TK	8,6
Rota 10.3	SGP-TK	8,6
Rota 10.4	SGP-KO	8,2
Rota 10.5	SGP-KE	5,5

Tabela 89: Portos usados para cálculo dos coeficientes de custo de viagem da rota 10.4.

Rotação de portos usado na rota 10.4	Dias consumidos nos portos//viagem	Tempo da viagem (dias)
KO-CE	2//4,7	6,7
Próxima rota designada	Rotação de portos usados	Tempo da viagem (dias)
Rota 1.1	CE-TK	5,4
Rota 1.2	CE-TK	5,4
Rota 2	CE-TK	5,4
Rota 3	CE-TK	5,4
Rota 4.1	CE-YH	5,3
Rota 4.2	CE-BU	4,9
Rota 5	CE-MA	1,3
Rota 6	CE-BU	4,9
Rota 7	CE-YH	5,3
Rota 8	CE-YH	5,3
Rota 9	CE-BT	32,4
Rota 10.1	CE-BU	4,9
Rota 10.2	CE-TK	5,4
Rota 10.3	CE-TK	5,4
Rota 10.4	CE-KO	4,9
Rota 10.5	CE-KE	3,4

Tabela 90: Portos usados para cálculo dos coeficientes de custo de viagem da rota 10.5.

Rotação de portos usado na rota 10.5	Dias consumidos nos portos//viagem	Tempo da viagem (dias)
KE-KA-MA-BGK	4//6,3	10,3
Próxima rota designada	Rotação de portos usados	Tempo da viagem (dias)
Rota 1.1	BGK-TK	9,2
Rota 1.2	BGK-TK	9,2
Rota 2	BGK-TK	9,2
Rota 3	BGK-TK	9,2
Rota 4.1	BGK-YH	9,1
Rota 4.2	BGK-BU	8,1
Rota 5	BGK-MA	4,6
Rota 6	BGK-BU	8,1
Rota 7	BGK-YH	9,1
Rota 8	BGK-YH	9,1
Rota 9	BGK-BT	36,9
Rota 10.1	BGK-BU	8,1
Rota 10.2	BGK-TK	9,2
Rota 10.3	BGK-TK	9,2
Rota 10.4	BGK-KO	8,8
Rota 10.5	BGK-KE	6,1

## 8 *Apêndice D - Problemas baseados nas rotas criadas, modelados no LINGO*

### Problema 1.

! Função objetivo;

$$\begin{aligned} \text{Min} = & x1\_1p1\_1 + x1\_1p2 + x1\_1p4\_2 + x1\_1p5 + x1\_1p7 + x1\_1p8 + x1\_1p10\_2 \\ & + x2p1\_1 + x2p2 + x2p4\_2 + x2p5 + x2p7 + x2p8 + x2p10\_2 + \\ & x4\_2p1\_1 + x4\_2p2 + x4\_2p4\_2 + x4\_2p5 + x4\_2p7 + x4\_2p8 + x4\_2p10\_2 + \\ & x5p1\_1 + x5p2 + x5p4\_2 + x5p5 + x5p7 + x5p8 + x5p10\_2 + \\ & x7p1\_1 + x7p2 + x7p4\_2 + x7p5 + x7p7 + x7p8 + x7p10\_2 + \\ & x8p1\_1 + x8p2 + x8p4\_2 + x8p5 + x8p7 + x8p8 + x8p10\_2 + \\ & x10\_2p1\_1 + x10\_2p2 + x10\_2p4\_2 + x10\_2p5 + x10\_2p7 + x10\_2p8 + x10\_2p10\_2; \end{aligned}$$

! subject to;

! restrição para assegurar que o navio de uma dada rota seja designado para outras rotas;

$$0.0307692 * x1\_1p1\_1 + 0.0307692 * x1\_1p2 + 0.0308641 * x1\_1p4\_2 + 0.0275482 * x1\_1p5 + 0.0307692 * x1\_1p7 + 0.0318471 * x1\_1p8 + 0.0308641 * x1\_1p10\_2 - b1\_1 = 0;$$

$$0.0303951 * x2p1\_1 + 0.0303951 * x2p2 + 0.0303951 * x2p4\_2 + 0.0272479 * x2p5 + 0.0303951 * x2p7 + 0.0313479 * x2p8 + 0.0313479 * x2p10\_2 - b2 = 0;$$

$$0.0271002 * x4\_2p1\_1 + 0.0274725 * x4\_2p2 + 0.0268817 * x4\_2p4\_2 + 0.0299401 * x4\_2p5 + 0.0271002 * x4\_2p7 + 0.0274725 * x4\_2p8 + 0.0274725 * x4\_2p10\_2 - b4\_2 = 0;$$

$$0.0216919 * x5p1_1 + 0.0216919 * x5p2 + 0.0215982 * x5p4_2 + 0.0223713 * x5p5 + 0.0217391 * x5p7 + 0.0219298 * x5p8 + 0.0219298 * x5p10_2 - b5 = 0;$$

$$0.0495049 * x7p1_1 + 0.0495049 * x7p2 + 0.0531914 * x7p4_2 + 0.0588235 * x7p5 + 0.0495049 * x7p7 + 0.0495049 * x7p8 + 0.0495049 * x7p10_2 - b7 = 0;$$

$$0.0526315 * x8p1_1 + 0.0526315 * x8p2 + 0.0574712 * x8p4_2 + 0.0462962 * x8p5 + 0.0529100 * x8p7 + 0.0529100 * x8p8 + 0.0526315 * x8p10_2 - b8 = 0;$$

$$0.0689655 * x10_2p1_1 + 0.0689655 * x10_2p2 + 0.078125 * x10_2p4_2 + 0.0892857 * x10_2p5 + 0.0689655 * x10_2p7 + 0.0689655 * x10_2p8 + 0.0689655 * x10_2p10_2 - b10_2 = 0;$$

! restrição para assegurar que uma dada rota consiga o número requeridos de navios para assegurar a re-circulação;

$$0.0307692 * x1_1p1_1 + 0.0303951 * x2p1_1 + 0.0271002 * x4_2p1_1 + 0.0216919 * x5p1_1 + 0.0495049 * x7p1_1 + 0.0526315 * x8p1_1 + 0.0689655 * x10_2p1_1 - b1_1 - e1_1 = 0;$$

$$0.0307692 * x1_1p2 + 0.0303951 * x2p2 + 0.0274725 * x4_2p2 + 0.0216919 * x5p2 + 0.0495049 * x7p2 + 0.0526315 * x8p2 + 0.0689655 * x10_2p2 - b2 - e2 = 0;$$

$$0.0308641 * x1_1p4_2 + 0.0303951 * x2p4_2 + 0.0268817 * x4_2p4_2 + 0.0215982 * x5p4_2 + 0.0531914 * x7p4_2 + 0.0574712 * x8p4_2 + 0.078125 * x10_2p4_2 - b4_2 - e4_2 = 0;$$

$$0.0275482 * x1_1p5 + 0.0272479 * x2p5 + 0.0299401 * x4_2p5 + 0.0223713 * x5p5 + 0.0588235 * x7p5 + 0.0462962 * x8p5 + 0.0892857 * x10_2p5 - b5 - e5 = 0;$$

$$0.0307692 * x1_1p7 + 0.0303951 * x2p7 + 0.0271002 * x4_2p7 + 0.0217391 * x5p7 + 0.0495049 * x7p7 + 0.0529100 * x8p7 + 0.0689655 * x10_2p7 - b7 - e7 = 0;$$

$$0.0318471 * x1_1p8 + 0.0313479 * x2p8 + 0.0274725 * x4_2p8 + 0.0219298 * x5p8 + 0.0495049 * x7p8 + 0.0529100 * x8p8 + 0.0689655 * x10_2p8 - b8 - e8 = 0;$$

$$0.0308641 * x1_1p10_2 + 0.0313479 * x2p10_2 + 0.0274725 * x4_2p10_2 + 0.0219298 * x5p10_2 + 0.0495049 * x7p10_2 + 0.0526315 * x8p10_2 + 0.0689655 * x10_2p10_2 - b10_2 - e10_2 = 0;$$

! restrição de frota máxima;

$$x1_1p1_1 + x1_1p2 + x1_1p4_2 + x1_1p5 + x1_1p7 + x1_1p8 + x1_1p10_2 + x2p1_1 + x2p2 + x2p4_2 + x2p5 + x2p7 + x2p8 + x2p10_2 + x4_2p1_1 + x4_2p2 +$$

$$x4\_2p4\_2 + x4\_2p5 + x4\_2p7 + x4\_2p8 + x4\_2p10\_2 + x5p1\_1 + x5p2 + x5p4\_2 + x5p5 + x5p7 + x5p8 + x5p10\_2 + x7p1\_1 + x7p2 + x7p4\_2 + x7p5 + x7p7 + x7p8 + x7p10\_2 + x8p1\_1 + x8p2 + x8p4\_2 + x8p5 + x8p7 + x8p8 + x8p10\_2 + x10\_2p1\_1 + x10\_2p2 + x10\_2p4\_2 + x10\_2p5 + x10\_2p7 + x10\_2p8 + x10\_2p10\_2 < 46;$$

! restrição de número máximo de navios por rota;

$$x1\_1p1\_1 + x1\_1p2 + x1\_1p4\_2 + x1\_1p5 + x1\_1p7 + x1\_1p8 + x1\_1p10\_2 < 10;$$

$$x2p1\_1 + x2p2 + x2p4\_2 + x2p5 + x2p7 + x2p8 + x2p10\_2 < 8;$$

$$x4\_2p1\_1 + x4\_2p2 + x4\_2p4\_2 + x4\_2p5 + x4\_2p7 + x4\_2p8 + x4\_2p10\_2 < 5;$$

$$x5p1\_1 + x5p2 + x5p4\_2 + x5p5 + x5p7 + x5p8 + x5p10\_2 < 6;$$

$$x7p1\_1 + x7p2 + x7p4\_2 + x7p5 + x7p7 + x7p8 + x7p10\_2 < 2;$$

$$x8p1\_1 + x8p2 + x8p4\_2 + x8p5 + x8p7 + x8p8 + x8p10\_2 < 20;$$

$$x10\_2p1\_1 + x10\_2p2 + x10\_2p4\_2 + x10\_2p5 + x10\_2p7 + x10\_2p8 + x10\_2p10\_2 < 4;$$

! Restrição para que todas as rotas tenham um número inteiro de navios;

$$\text{@BND}(0.25, b1\_1, 1); \text{@BND}(0.2, b2, 1); \text{@BND}(0.1, b4\_2, 1); \text{@BND}(0.1, b5, 1); \\ \text{@BND}(0.035, b7, 1); \text{@BND}(0.8, b8, 1); \text{@BND}(0.166, b10\_2, 1);$$

$$\text{@BND}(-0.01, e1\_1, 0.01); \text{@BND}(-0.01, e2, 0.01); \text{@BND}(-0.01, e4\_2, 0.01); \text{@BND}(-0.01, e5, 0.01); \\ \text{@BND}(-0.01, e7, 0.01); \text{@BND}(-0.01, e8, 0.01); \text{@BND}(-0.01, e10\_2, 0.01);$$

$$\text{@FREE}(e1\_1); \text{@FREE}(e2); \text{@FREE}(e4\_2); \text{@FREE}(e5); \text{@FREE}(e7); \text{@FREE}(e8); \\ \text{@FREE}(e10\_2);$$

$$\text{@GIN}(x1\_1p1\_1); \text{@GIN}(x1\_1p2); \text{@GIN}(x1\_1p4\_2); \text{@GIN}(x1\_1p5); \text{@GIN}(x1\_1p7); \\ \text{@GIN}(x1\_1p8); \text{@GIN}(x1\_1p10\_2);$$

$$\text{@GIN}(x2p1\_1); \text{@GIN}(x2p2); \text{@GIN}(x2p4\_2); \text{@GIN}(x2p5); \text{@GIN}(x2p7); \text{@GIN}(x2p8); \\ \text{@GIN}(x2p10\_2);$$

$$\text{@GIN}(x4\_2p1\_1); \text{@GIN}(x4\_2p2); \text{@GIN}(x4\_2p4\_2); \text{@GIN}(x4\_2p5); \text{@GIN}(x4\_2p7); \\ \text{@GIN}(x4\_2p8); \text{@GIN}(x4\_2p10\_2);$$

$$\text{@GIN}(x5p1\_1); \text{@GIN}(x5p2); \text{@GIN}(x5p4\_2); \text{@GIN}(x5p5); \text{@GIN}(x5p7); \text{@GIN}(x5p8); \\ \text{@GIN}(x5p10\_2);$$

$$\text{@GIN}(x7p1\_1); \text{@GIN}(x7p2); \text{@GIN}(x7p4\_2); \text{@GIN}(x7p5); \text{@GIN}(x7p7); \text{@GIN}$$

(x7p8); @GIN (x7p10\_2);

@GIN (x8p1\_1); @GIN (x8p2); @GIN (x8p4\_2); @GIN (x8p5); @GIN (x8p7); @GIN (x8p8); @GIN (x8p10\_2);

@GIN (x10\_2p1\_1); @GIN (x10\_2p2); @GIN (x10\_2p4\_2); @GIN (x10\_2p5); @GIN (x10\_2p7); @GIN (x10\_2p8); @GIN (x10\_2p10\_2);

## Problema 2.

! Função objetivo;

$$\begin{aligned} \text{Min} = & x1\_1p1\_1 + x1\_1p1\_2 + x1\_1p2 + x1\_1p3 + x1\_1p4\_1 + x1\_1p9 + x1\_1p10\_1 \\ & + x1\_2p1\_1 + x1\_2p1\_2 + x1\_2p2 + x1\_2p3 + x1\_2p4\_1 + x1\_2p9 + x1\_2p10\_1 \\ & + x2p1\_1 + x2p1\_2 + x2p2 + x2p3 + x2p4\_1 + x2p9 + x2p10\_1 + \\ & x3p1\_1 + x3p1\_2 + x3p2 + x3p3 + x3p4\_1 + x3p9 + x3p10\_1 + \\ & x4\_1p1\_1 + x4\_1p1\_2 + x4\_1p2 + x4\_1p3 + x4\_1p4\_1 + x4\_1p9 + x4\_1p10\_1 + \\ & x9p1\_1 + x9p1\_2 + x9p2 + x9p3 + x9p4\_1 + x9p9 + x9p10\_1 + \\ & x10\_1p1\_1 + x10\_1p1\_2 + x10\_1p2 + x10\_1p3 + x10\_1p4\_1 + x10\_1p9 + x10\_1p10\_1; \end{aligned}$$

! subject to;

! restrição para assegurar que o navio de uma dada rota seja designado para outras rotas;

$$0.0307692 * x1\_1p1\_1 + 0.0318471 * x1\_1p1\_2 + 0.0307692 * x1\_1p2 + 0.0307692 * x1\_1p3 + 0.0307692 * x1\_1p4\_1 + 0.0301204 * x1\_1p9 + 0.0308641 * x1\_1p10\_1 - b1\_1 = 0;$$

$$0.1612903 * x1\_2p1\_1 + 0.1612903 * x1\_2p1\_2 + 0.1612903 * x1\_2p2 + 0.1612903 * x1\_2p3 + 0.1639344 * x1\_2p4\_1 + 0.0304878 * x1\_2p9 + 0.2380952 * x1\_2p10\_1 - b1\_2 = 0;$$

$$0.0303951 * x2p1\_1 + 0.0313479 * x2p1\_2 + 0.0303951 * x2p2 + 0.0303951 * x2p3 + 0.0303951 * x2p4\_1 + 0.0269541 * x2p9 + 0.0303951 * x2p10\_1 - b2 = 0;$$

$$0.0144508 * x3p1\_1 + 0.01461988 * x3p1\_2 + 0.01461988 * x3p2 + 0.01461988 * x3p3 + 0.01461988 * x3p4\_1 + 0.0233644 * x3p9 + 0.0142045 * x3p10\_1 - b3 = 0;$$

$$0.0275482 * x4\_1p1\_1 + 0.0279329 * x4\_1p1\_2 + 0.0275482 * x4\_1p2 + 0.0275482 * x4\_1p3 + 0.0275482 * x4\_1p4\_1 + 0.0275482 * x4\_1p9 + 0.0275482 * x4\_1p10\_1 - b4 = 0;$$

$$x4\_1p3 + 0.0275482 * x4\_1p4\_1 + 0.0197628 * x4\_1p9 + 0.0273224 * x4\_1p10\_1 - b4\_1 = 0;$$

$$0.0253807 * x9p1\_1 + 0.0259067 * x9p1\_2 + 0.0253807 * x9p2 + 0.0253807 * x9p3 + 0.0253807 * x9p4\_1 + 0.0769230 * x9p9 + 0.0246305 * x9p10\_1 - b9 = 0;$$

$$0.2380952 * x10\_1p1\_1 + 0.2380952 * x10\_1p1\_2 + 0.2380952 * x10\_1p2 + 0.2380952 * x10\_1p3 + 0.2380952 * x10\_1p4\_1 + 0.0309597 * x10\_1p9 + 0.2222222 * x10\_1p10\_1 - b10\_1 = 0;$$

! restrição Uma para assegurar que uma dada rota consiga o número requeridos de navios para assegurar a re-circulação;

$$0.0307692 * x1\_1p1\_1 + 0.1612903 * x1\_2p1\_1 + 0.0303951 * x2p1\_1 + 0.0144508 * x3p1\_1 + 0.0275482 * x4\_1p1\_1 + 0.0253807 * x9p1\_1 + 0.2380952 * x10\_1p1\_1 - b1\_1 - e1\_1 = 0;$$

$$0.0318471 * x1\_1p1\_2 + 0.1612903 * x1\_2p1\_2 + 0.0313479 * x2p1\_2 + 0.01461988 * x3p1\_2 + 0.0279329 * x4\_1p1\_2 + 0.0259067 * x9p1\_2 + 0.2380952 * x10\_1p1\_2 - b1\_2 - e1\_2 = 0;$$

$$0.0307692 * x1\_1p2 + 0.1612903 * x1\_2p2 + 0.0303951 * x2p2 + 0.01461988 * x3p2 + 0.0275482 * x4\_1p2 + 0.0253807 * x9p2 + 0.2380952 * x10\_1p2 - b2 - e2 = 0;$$

$$0.0307692 * x1\_1p3 + 0.1612903 * x1\_2p3 + 0.0303951 * x2p3 + 0.01461988 * x3p3 + 0.0275482 * x4\_1p3 + 0.0253807 * x9p3 + 0.2380952 * x10\_1p3 - b3 - e3 = 0;$$

$$0.0307692 * x1\_1p4\_1 + 0.1639344 * x1\_2p4\_1 + 0.0303951 * x2p4\_1 + 0.01461988 * x3p4\_1 + 0.0275482 * x4\_1p4\_1 + 0.0253807 * x9p4\_1 + 0.2380952 * x10\_1p4\_1 - b4\_1 - e4\_1 = 0;$$

$$0.0301204 * x1\_1p9 + 0.0304878 * x1\_2p9 + 0.0269541 * x2p9 + 0.0233644 * x3p9 + 0.0197628 * x4\_1p9 + 0.0769230 * x9p9 + 0.0309597 * x10\_1p9 - b9 - e9 = 0;$$

$$0.0308641 * x1\_1p10\_1 + 0.2380952 * x1\_2p10\_1 + 0.0303951 * x2p10\_1 + 0.0142045 * x3p10\_1 + 0.0273224 * x4\_1p10\_1 + 0.0246305 * x9p10\_1 + 0.2222222 * x10\_1p10\_1 - b10\_1 - e10\_1 = 0;$$

! restrição de frota máxima;

$$x1\_1p1\_1 + x1\_1p1\_2 + x1\_1p2 + x1\_1p3 + x1\_1p4\_1 + x1\_1p9 + x1\_1p10\_1 + x1\_2p1\_1 + x1\_2p1\_2 + x1\_2p2 + x1\_2p3 + x1\_2p4\_1 + x1\_2p9 + x1\_2p10\_1 + x2p1\_1 + x2p1\_2 + x2p2 + x2p3 + x2p4\_1 + x2p9 + x2p10\_1 + x3p1\_1 + x3p1\_2 +$$

$$x3p2 + x3p3 + x3p4_1 + x3p9 + x3p10_1 + x4_1p1_1 + x4_1p1_2 + x4_1p2 + x4_1p3 + x4_1p4_1 + x4_1p9 + x4_1p10_1 + x9p1_1 + x9p1_2 + x9p2 + x9p3 + x9p4_1 + x9p9 + x9p10_1 + x10_1p1_1 + x10_1p1_2 + x10_1p2 + x10_1p3 + x10_1p4_1 + x10_1p9 + x10_1p10_1 < 44;$$

! restrição de número máximo de navios por rota;

$$x1_1p1_1 + x1_1p1_2 + x1_1p2 + x1_1p3 + x1_1p4_1 + x1_1p9 + x1_1p10_1 < 11;$$

$$x1_2p1_1 + x1_2p1_2 + x1_2p2 + x1_2p3 + x1_2p4_1 + x1_2p9 + x1_2p10_1 < 3;$$

$$x2p1_1 + x2p1_2 + x2p2 + x2p3 + x2p4_1 + x2p9 + x2p10_1 < 9;$$

$$x3p1_1 + x3p1_2 + x3p2 + x3p3 + x3p4_1 + x3p9 + x3p10_1 < 12;$$

$$x4_1p1_1 + x4_1p1_2 + x4_1p2 + x4_1p3 + x4_1p4_1 + x4_1p9 + x4_1p10_1 < 12;$$

$$x9p1_1 + x9p1_2 + x9p2 + x9p3 + x9p4_1 + x9p9 + x9p10_1 < 3;$$

$$x10_1p1_1 + x10_1p1_2 + x10_1p2 + x10_1p3 + x10_1p4_1 + x10_1p9 + x10_1p10_1 < 7;$$

! Restrição para que todas as rotas tenham um número inteiro de navios;

$$@BND(0.25, b1_1, 2); @BND(0.143, b1_2, 2); @BND(0.2, b2, 2); @BND(0.143, b3, 2); @BND(0.25, b4_1, 2); @BND(0.035, b9, 2); @BND(1, b10_1, 2);$$

$$@BND(-0.05, e1_1, 0.05); @BND(-0.02, e1_2, 0.02); @BND(-0.04, e2, 0.04); @BND(-0.02, e3, 0.02); @BND(-0.05, e4_1, 0.05); @BND(-0.007, e9, 0.007); @BND(-0.2, e10_1, 0.2);$$

$$@FREE (e1_1); @FREE (e1_2); @FREE (e2); @FREE (e3); @FREE (e4_1); @FREE (e9); @FREE (e10_1);$$

$$@GIN (x1_1p1_1); @GIN (x1_1p1_2); @GIN (x1_1p2); @GIN (x1_1p3); @GIN (x1_1p4_1); @GIN (x1_1p9); @GIN (x1_1p10_1);$$

$$@GIN (x1_2p1_1); @GIN (x1_2p1_2); @GIN (x1_2p2); @GIN (x1_2p3); @GIN (x1_2p4_1); @GIN (x1_2p9); @GIN (x1_2p10_1);$$

$$@GIN (x2p1_1); @GIN (x2p1_2); @GIN (x2p2); @GIN (x2p3); @GIN (x2p4_1); @GIN (x2p9); @GIN (x2p10_1);$$

@GIN (x3p1\_1); @GIN (x3p1\_2); @GIN (x3p2); @GIN(x3p3); @GIN (x3p4\_1); @GIN (x3p9); @GIN (x3p10\_1);

@GIN (x4\_1p1\_1); @GIN (x4\_1p1\_2); @GIN (x4\_1p2); @GIN (x4\_1p3); @GIN (x4\_1p4\_1); @GIN (x4\_1p9); @GIN (x4\_1p10\_1);

@GIN (x9p1\_1); @GIN (x9p1\_2); @GIN (x9p2); @GIN (x9p3); @GIN (x9p4\_1); @GIN (x9p9); @GIN (x9p10\_1);

@GIN (x10\_1p1\_1); @GIN (x10\_1p1\_2); @GIN (x10\_1p2); @GIN (x10\_1p3); @GIN (x10\_1p4\_1); @GIN (x10\_1p9); @GIN (x10\_1p10\_1);

### Problema 3.

! Função objetivo;

Min = x5p5 + x5p6 + x5p10\_1 + x5p10\_2 + x5p10\_3 + x5p10\_4 + x5p10\_5 +  
 x6p5 + x6p6 + x6p10\_1 + x6p10\_2 + x6p10\_3 + x6p10\_4 + x6p10\_5 +  
 x10\_1p5 + x10\_1p6 + x10\_1p10\_1 + x10\_1p10\_2 + x10\_1p10\_3 + x10\_1p10\_4 +  
 x10\_1p10\_5 +  
 x10\_2p5 + x10\_2p6 + x10\_2p10\_1 + x10\_2p10\_2 + x10\_2p10\_3 + x10\_2p10\_4 +  
 x10\_2p10\_5 +  
 x10\_3p5 + x10\_3p6 + x10\_3p10\_1 + x10\_3p10\_2 + x10\_3p10\_3 + x10\_3p10\_4 +  
 x10\_3p10\_5 +  
 x10\_4p5 + x10\_4p6 + x10\_4p10\_1 + x10\_4p10\_2 + x10\_4p10\_3 + x10\_4p10\_4 +  
 x10\_4p10\_5 +  
 x10\_5p5 + x10\_5p6 + x10\_5p10\_1 + x10\_5p10\_2 + x10\_5p10\_3 + x10\_5p10\_4 +  
 x10\_5p10\_5;

! subject to;

! restrição para assegurar que o navio de uma dada rota seja designado para outras rotas;

0.0223713 \* x5p5 + 0.0215982 \* x5p6 + 0.0215982 \* x5p10\_1 + 0.0219298 \* x5p10\_2 + 0.0219298 \* x5p10\_3 + 0.0217391 \* x5p10\_4 + 0.0218818 \* x5p10\_5 - b5 = 0;

0.0205338 \* x6p5 + 0.0191204 \* x6p6 + 0.0191204 \* x6p10\_1 + 0.0187265 \* x6p10\_2 + 0.0187265 \* x6p10\_3 + 0.0189035 \* x6p10\_4 + 0.0198412 \* x6p10\_5 - b6 = 0;

$$0.125 * x_{10\_1p5} + 0.2222222 * x_{10\_1p6} + 0.2222222 * x_{10\_1p10\_1} + 0.2380952 * x_{10\_1p10\_2} + 0.2380952 * x_{10\_1p10\_3} + 0.3125 * x_{10\_1p10\_4} + 0.1639344 * x_{10\_1p10\_5} - b_{10\_1} = 0;$$

$$0.0892857 * x_{10\_2p5} + 0.078125 * x_{10\_2p6} + 0.078125 * x_{10\_2p10\_1} + 0.0689655 * x_{10\_2p10\_2} + 0.0689655 * x_{10\_2p10\_3} + 0.0709219 * x_{10\_2p10\_4} + 0.0917431 * x_{10\_2p10\_5} - b_{10\_2} = 0;$$

$$0.0392156 * x_{10\_3p5} + 0.0343642 * x_{10\_3p6} + 0.0343642 * x_{10\_3p10\_1} + 0.0330033 * x_{10\_3p10\_2} + 0.0330033 * x_{10\_3p10\_3} + 0.0334448 * x_{10\_3p10\_4} + 0.0367647 * x_{10\_3p10\_5} - b_{10\_3} = 0;$$

$$0.125 * x_{10\_4p5} + 0.0862068 * x_{10\_4p6} + 0.0862068 * x_{10\_4p10\_1} + 0.0826446 * x_{10\_4p10\_2} + 0.0826446 * x_{10\_4p10\_3} + 0.0862068 * x_{10\_4p10\_4} + 0.0990099 * x_{10\_4p10\_5} - b_{10\_4} = 0;$$

$$0.0671140 * x_{10\_5p5} + 0.0543478 * x_{10\_5p6} + 0.0543478 * x_{10\_5p10\_1} + 0.0512820 * x_{10\_5p10\_2} + 0.0512820 * x_{10\_5p10\_3} + 0.0523560 * x_{10\_5p10\_4} + 0.0609756 * x_{10\_5p10\_5} - b_{10\_5} = 0;$$

! restrição para assegurar que uma dada rota consiga o número requeridos de navios para assegurar a re-circulação;

$$0.0223713 * x_{5p5} + 0.0205338 * x_{6p5} + 0.125 * x_{10\_1p5} + 0.0892857 * x_{10\_2p5} + 0.0392156 * x_{10\_3p5} + 0.125 * x_{10\_4p5} + 0.0671140 * x_{10\_5p5} - b_5 - e_5 = 0;$$

$$0.0215982 * x_{5p6} + 0.0191204 * x_{6p6} + 0.2222222 * x_{10\_1p6} + 0.078125 * x_{10\_2p6} + 0.0343642 * x_{10\_3p6} + 0.0862068 * x_{10\_4p6} + 0.0543478 * x_{10\_5p6} - b_6 - e_6 = 0;$$

$$0.0215982 * x_{5p10\_1} + 0.0191204 * x_{6p10\_1} + 0.2222222 * x_{10\_1p10\_1} + 0.078125 * x_{10\_2p10\_1} + 0.0343642 * x_{10\_3p10\_1} + 0.0862068 * x_{10\_4p10\_1} + 0.0543478 * x_{10\_5p10\_1} - b_{10\_1} - e_{10\_1} = 0;$$

$$0.0219298 * x_{5p10\_2} + 0.0187265 * x_{6p10\_2} + 0.2380952 * x_{10\_1p10\_2} + 0.0689655 * x_{10\_2p10\_2} + 0.0330033 * x_{10\_3p10\_2} + 0.0826446 * x_{10\_4p10\_2} + 0.0512820 * x_{10\_5p10\_2} - b_{10\_2} - e_{10\_2} = 0;$$

$$0.0219298 * x_{5p10\_3} + 0.0187265 * x_{6p10\_3} + 0.2380952 * x_{10\_1p10\_3} + 0.0689655 * x_{10\_2p10\_3} + 0.0330033 * x_{10\_3p10\_3} + 0.0826446 * x_{10\_4p10\_3} + 0.0512820 * x_{10\_5p10\_3} - b_{10\_3} - e_{10\_3} = 0;$$

$$0.0217391 * x_{5p10\_4} + 0.0189035 * x_{6p10\_4} + 0.3125 * x_{10\_1p10\_4} + 0.0709219 * x_{10\_2p10\_4} + 0.0334448 * x_{10\_3p10\_4} + 0.0862068 * x_{10\_4p10\_4} + 0.0523560 * x_{10\_5p10\_4} - b_{10\_4} - e_{10\_4} = 0;$$

$$x_{10\_5p10\_4} - b_{10\_4} - e_{10\_4} = 0;$$

$$0.0218818 * x_{5p10\_5} + 0.0198412 * x_{6p10\_5} + 0.1639344 * x_{10\_1p10\_5} + 0.0917431 * x_{10\_2p10\_5} + 0.0367647 * x_{10\_3p10\_5} + 0.0990099 * x_{10\_4p10\_5} + 0.0609756 * x_{10\_5p10\_5} - b_{10\_5} - e_{10\_5} = 0;$$

! restrição de frota máxima;

$$x_{5p5} + x_{5p6} + x_{5p10\_1} + x_{5p10\_2} + x_{5p10\_3} + x_{5p10\_4} + x_{5p10\_5} + x_{6p5} + x_{6p6} + x_{6p10\_1} + x_{6p10\_2} + x_{6p10\_3} + x_{6p10\_4} + x_{6p10\_5} + x_{10\_1p5} + x_{10\_1p6} + x_{10\_1p10\_1} + x_{10\_1p10\_2} + x_{10\_1p10\_3} + x_{10\_1p10\_4} + x_{10\_1p10\_5} + x_{10\_2p5} + x_{10\_2p6} + x_{10\_2p10\_1} + x_{10\_2p10\_2} + x_{10\_2p10\_3} + x_{10\_2p10\_4} + x_{10\_2p10\_5} + x_{10\_3p5} + x_{10\_3p6} + x_{10\_3p10\_1} + x_{10\_3p10\_2} + x_{10\_3p10\_3} + x_{10\_3p10\_4} + x_{10\_3p10\_5} + x_{10\_4p5} + x_{10\_4p6} + x_{10\_4p10\_1} + x_{10\_4p10\_2} + x_{10\_4p10\_3} + x_{10\_4p10\_4} + x_{10\_4p10\_5} + x_{10\_5p5} + x_{10\_5p6} + x_{10\_5p10\_1} + x_{10\_5p10\_2} + x_{10\_5p10\_3} + x_{10\_5p10\_4} + x_{10\_5p10\_5} < 31;$$

! restrição de número máximo de navios por rota;

$$x_{5p5} + x_{5p6} + x_{5p10\_1} + x_{5p10\_2} + x_{5p10\_3} + x_{5p10\_4} + x_{5p10\_5} < 7;$$

$$x_{6p5} + x_{6p6} + x_{6p10\_1} + x_{6p10\_2} + x_{6p10\_3} + x_{6p10\_4} + x_{6p10\_5} < 7;$$

$$x_{10\_1p5} + x_{10\_1p6} + x_{10\_1p10\_1} + x_{10\_1p10\_2} + x_{10\_1p10\_3} + x_{10\_1p10\_4} + x_{10\_1p10\_5} < 7;$$

$$x_{10\_2p5} + x_{10\_2p6} + x_{10\_2p10\_1} + x_{10\_2p10\_2} + x_{10\_2p10\_3} + x_{10\_2p10\_4} + x_{10\_2p10\_5} < 5;$$

$$x_{10\_3p5} + x_{10\_3p6} + x_{10\_3p10\_1} + x_{10\_3p10\_2} + x_{10\_3p10\_3} + x_{10\_3p10\_4} + x_{10\_3p10\_5} < 5;$$

$$x_{10\_4p5} + x_{10\_4p6} + x_{10\_4p10\_1} + x_{10\_4p10\_2} + x_{10\_4p10\_3} + x_{10\_4p10\_4} + x_{10\_4p10\_5} < 4;$$

$$x_{10\_5p5} + x_{10\_5p6} + x_{10\_5p10\_1} + x_{10\_5p10\_2} + x_{10\_5p10\_3} + x_{10\_5p10\_4} + x_{10\_5p10\_5} < 7;$$

! Restrição para que todas as rotas tenham um número inteiro de navios;

$$@\text{BND}(0.1, b_5, 1); @\text{BND}(0.09, b_6, 1); @\text{BND}(1, b_{10\_1}, 3); @\text{BND}(0.166, b_{10\_2}, 1); @\text{BND}(0.143, b_{10\_3}, 1); @\text{BND}(0.143, b_{10\_4}, 1); @\text{BND}(0.25, b_{10\_5}, 2);$$

$$@\text{BND}(-0.01, e_5, 0.01); @\text{BND}(-0.01, e_6, 0.01); @\text{BND}(-0.01, e_{10\_1}, 0.01); @\text{BND}(-$$

0.01, e10\_2, 0.01); @BND(-0.01, e10\_3, 0.01); @BND(-0.005, e10\_4, 0.005); @BND(-0.01, e10\_5, 0.01);

@FREE (e5); @FREE( c6); @FREE (e10\_1); @FREE (e10\_2); @FREE(e10\_3); @FREE (e10\_4); @FREE (e10\_5);

@GIN (x5p5); @GIN (x5p6); @GIN (x5p10\_1); @GIN (x5p10\_2); @GIN (x5p10\_3); @GIN (x5p10\_4); @GIN (x5p10\_5);

@GIN (x6p5); @GIN(x6p6); @GIN (x6p10\_1); @GIN (x6p10\_2); @GIN (x6p10\_3); @GIN (x6p10\_4); @GIN (x6p10\_5);

@GIN (x10\_1p5); @GIN (x10\_1p6); @GIN (x10\_1p10\_1); @GIN (x10\_1p10\_2); @GIN (x10\_1p10\_3); @GIN (x10\_1p10\_4); @GIN (x10\_1p10\_5);

@GIN (x10\_2p5); @GIN (x10\_2p6); @GIN (x10\_2p10\_1); @GIN (x10\_2p10\_2); @GIN (x10\_2p10\_3); @GIN (x10\_2p10\_4); @GIN (x10\_2p10\_5);

@GIN (x10\_3p5); @GIN (x10\_3p6); @GIN (x10\_3p10\_1); @GIN (x10\_3p10\_2); @GIN (x10\_3p10\_3); @GIN (x10\_3p10\_4); @GIN (x10\_3p10\_5);

@GIN (x10\_4p5); @GIN (x10\_4p6); @GIN (x10\_4p10\_1); @GIN (x10\_4p10\_2); @GIN (x10\_4p10\_3); @GIN (x10\_4p10\_4); @GIN (x10\_4p10\_5);

@GIN (x10\_5p5); @GIN (x10\_5p6); @GIN(x10\_5p10\_1); @GIN (x10\_5p10\_2); @GIN (x10\_5p10\_3); @GIN (x10\_5p10\_4); @GIN (x10\_5p10\_5);

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)