

RICARDO TERUMICHI ONO

**ESTUDO DE VIABILIDADE DO TRANSPORTE MARÍTIMO
DE CONTÊINERES POR CABOTAGEM
NA COSTA BRASILEIRA**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia.

**São Paulo
2001**

RICARDO TERUMICHI ONO

**ESTUDO DE VIABILIDADE DO TRANSPORTE MARÍTIMO
DE CONTÊINERES POR CABOTAGEM
NA COSTA BRASILEIRA**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia.

**Área de Concentração:
Engenharia Naval**

**Orientador:
Prof. Dr. Rui Carlos Botter**

**São Paulo
2001**

ONO, Ricardo Terumichi

Estudo De Viabilidade do Transporte Marítimo de
Contêineres por Cabotagem na Costa Brasileira. São Paulo, 2001.
132p.

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

1. Cabotagem 2. Programação Linear

I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento
de Engenharia Naval e Oceânica II. t

A minha querida esposa,
Regina,
e aos
meus pais,

AGRADECIMENTOS

Ao mestre, conselheiro, orientador e principalmente amigo, Prof. Dr. Rui Carlos Botter por ter acreditado neste trabalho, pela confiança na condução, orientação e apoio na concretização deste trabalho.

Aos meus colegas de trabalho, Prof. André Bergsten Mendes, Eng. Rogério Aversa, Eng. Marcelo Gomes Fernandes e Nelson Kenji Idehara pelas valiosas contribuições no desenvolvimento deste trabalho.

Ao amigo, Eng. Celso Mitsuo Hino, pelas brilhantes idéias que acabaram determinando o sucesso do trabalho.

Ao Sr. Gustavo Costa, pela contribuição valiosa dos dados e principalmente pela receptividade que sempre tive em minhas consultas.

À CAPES, pelo suporte financeiro para a realização desta pesquisa.

A todos que direta ou indiretamente colaboraram no desenvolvimento deste trabalho.

*“Ela está no horizonte,
aproximo-me dois passos
e ela se afasta dois passos.
Caminho dez passos
e o horizonte corre dez passos.
Por mais que eu caminhe,
jamais a alcançarei.
Para que serve, então,
a utopia?
Serve para isso,
para fazer caminhar.”*

(Eduardo Galeano, Las palabras andantes)

SUMÁRIO

Lista de tabelas	
Lista de figuras	
Resumo	
Abstract	
1. Descrição do problema	1
1.1. <i>Introdução e Objetivos</i>	1
1.2. <i>Histórico</i>	2
1.3. <i>Panorama Atual</i>	5
1.4. <i>Entraves do setor</i>	8
1.5. <i>Tendências do setor</i>	11
1.6. <i>Regulamentação do OTM</i>	13
1.7. <i>Conclusões sobre a situação atual do segmento de cabotagem</i>	13
1.8. <i>Delineamento do trabalho</i>	14
2. Revisão Bibliográfica.....	17
2.1. <i>O segmento da cabotagem</i>	17
2.2. <i>A metodologia para desenvolvimento do modelo</i>	20
2.3. <i>Modelos de dimensionamento de frota</i>	21
2.4. <i>Modelos de Scheduling da frota</i>	24
2.5. <i>Conclusões da Revisão Bibliográfica</i>	28
3. Caracterização da modelagem e dados numéricos.....	29

3.1.	<i>Introdução e objetivos</i>	29
3.2.	<i>Aquisição dos dados</i>	32
3.3.	<i>Dados relativos à movimentação de contêineres e seleção dos portos</i>	32
4.	Modelo 1 : Geração das rotas viáveis	37
4.1.	<i>Quantificação das rotas viáveis</i>	37
4.2.	<i>Geração das rotas viáveis</i>	40
4.3.	<i>Parâmetros das rotas viáveis</i>	41
4.3.1.	<i>Distância percorrida na rota</i>	41
4.3.2.	<i>Navios e suas características</i>	42
4.3.3.	<i>Número de viagens</i>	43
4.4.	<i>Custos de Transporte</i>	43
4.5.	<i>Parâmetros de demanda de contêineres</i>	45
5.	Formulação Matemática do Modelo 2	46
5.1.	<i>Nomenclatura dos Índices</i>	46
5.2.	<i>Nomenclatura dos Parâmetros</i>	47
5.3.	<i>Variáveis de decisão</i>	48
5.3.1.	<i>Escolha das rotas</i>	48
5.3.2.	<i>Fluxo de carga na rota</i>	48
5.4.	<i>Função Objetivo</i>	49
5.5.	<i>Restrições</i>	49
5.5.1.	<i>Restrição de exclusividade da embarcação em uma rota</i>	49
5.5.2.	<i>Restrição do atendimento de demanda</i>	50

5.5.3.	<i>Restrição de correlação e vínculo</i>	50
5.5.4.	<i>Restrição de capacidade do navio</i>	51
5.5.5.	<i>Restrições de não-negatividade</i>	71
5.5.6.	<i>Restrições de variáveis binárias</i>	71
6.	Implementação Computacional e Resultados	72
6.1.	<i>Caso 1 – Quatro portos e dois navios</i>	73
6.1.1.	<i>Análise de demanda</i>	80
6.1.2.	<i>Análise de Capacidade de cada Navio</i>	86
6.2.	<i>Caso 2 – Cinco portos e cinco navios</i>	92
6.3.	<i>Caso 3 – Cinco portos e três navios</i>	98
6.4.	<i>Caso 4 - Estudo de caso real - HSAC</i>	102
6.5.	<i>Características das execuções dos modelos</i>	106
7.	Conclusões	108
8.	Recomendações	111
9.	Bibliografia	114
	ANEXO A - Tabela dos dados de entrada	117
	ANEXO B – Comandos de Configuração do GAMS v.2.3.....	127
	ANEXO C – Código Fonte do Modelo 2.....	129

Lista de Tabelas

Tabela 3.1. Portos que compõem o cenário da cabotagem.	33
Tabela 3.2. Portos que compõem o cenário da cabotagem.	34
Tabela 3.3. Portos selecionados	36
Tabela 4.1. Número de roteiros viáveis por quantidade de portos considerados.....	37
Tabela 4.2. Matriz de distância dos portos considerados (valores em milhas náuticas)..	41
Tabela 4.3. Características dos navios da frota.....	42
Tabela 4.4. Tempo de Porto.	43
Tabela 5.1. Operadores Lógicos Utilizados.	61
Tabela 6.1. Resultado para o caso de 4 portos	75
Tabela 6.2. Seqüência de portos das rotas selecionadas	75
Tabela 6.3. Características da rota R_2.....	76
Tabela 6.4. Características da rota R_23.....	77
Tabela 6.5. Distribuição do fluxo de cargas na rota R_23	78
Tabela 6.6. Resultados da análise de demanda	81
Tabela 6.7. Configurações das Frotas Testadas	87
Tabela 6.8. Resultados da Análise de Dimensionamento da Frota.	87
Tabela 6.9. Seqüência de Portos em Cada Rota Alocada.	90
Tabela 6.10. Resultado para o caso de 5 portos e 5 navios.....	93
Tabela 6.11. Análises da Frota e Aumento Relativo do Custo Total.....	95

Tabela 6.12. Rotas selecionadas para o cenário de 0,9 vezes a demanda.	96
Tabela 6.13. Rotas selecionadas para o cenário de padrão.	96
Tabela 6.14. Resultados para o caso de 5 portos e 3 navios.	98
Tabela 6.15. Resultados para o caso de 6 portos.....	103
Tabela 6.16. Rotas alocadas às embarcações para o caso HSAC.	103
Tabela 6.17. Características dos trechos de viagens para o caso HSAC.....	104
Tabela 6.18. Percentagem de Carga para cada navio para o caso HSAC.	104
Tabela 6.19. Tempos de execução para cada caso.	106

Lista de Figuras

Figura 1.1. Cenário de portos cobertos pela cabotagem das empresas Aliança/Transroll, em 1999.....	6
Figura 1.2. Evolução da cabotagem.....	8
Figura 3.1. Estrutura da ferramenta.....	31
Figura 4.1. Quantidade de rotas viáveis para 3 portos	38
Figura 4.2. Quantidade de rotas viáveis para 4 portos	39
Figura 4.3. Quantidade de rotas viáveis para 5 portos	39
Figura 4.4- Esquema do Modelo 1	45
Figura 5.1- Exemplo da rota.....	52
Figura 5.2. Representação dos Grupos de Portos.....	54
Figura 5.3. Representação da rota adotada como exemplo.....	55
Figura 5.4. Exemplos das designações dos vetores.....	60
Figura 5.5. Esquema da parcela 8a da restrição de capacidade.	61
Figura 5.6. Esquema da parcela 8b da restrição de capacidade.	62
Figura 5.7. Esquema da parcela 8c da restrição de capacidade.	64
Figura 5.8. Esquema da parcela 8d da restrição de capacidade.	65
Figura 5.9. Esquema da parcela 8e da restrição de capacidade.	66
Figura 5.10. Esquema da parcela 8f da restrição de capacidade.....	67
Figura 5.11. Esquema da parcela 8g da restrição de capacidade.	68

Figura 6.1. Esquema das rotas selecionadas para o caso de 4 portos.....	76
Figura 6.2. Gráfico de Custo / Ocupação.....	82
Figura 6.3. Gráfico de Intervalo de Escalas / Quantidade de Navios	82
Figura 6.4. Gráfico do Aumento relativo dos Custos / Capacidade Total da Frota	84
Figura 6.5. Custos Totais no Dimensionamento da Frota.....	88
Figura 6.6. Ocupação Média / Quantidade de Navios alocados.	89
Figura 6.7. Intervalos Médios de Atendimento nos Portos.....	89
Figura 6.8. Itinerários de cada embarcação do caso de navios de 400 e 500 TEUs	90
Figura 6.9. Custo Total e Ocupação Média para o caso de 5 portos e 5 navios.....	94
Figura 6.10. Intervalo Médio/Quantidade de Navios para o Caso de 5 Portos e 5 Navios.	94
Figura 6.11. Aumento relativo do custo total / Capacidade da Frota para o caso de 5 portos e 5 navios.	95
Figura 6.12. Esquema das rotas para o cenário de 0,9 vezes a demanda.....	96
Figura 6.13. Esquema das rotas para o cenário de 1,0 vezes a demanda.....	97
Figura 6.14. Custo Total e Ocupação Média para o caso de 5 portos e 3 navios.	99
Figura 6.15. Intervalo Médio / Quantidade de Navios para o caso de 5 portos e 3 navios.	100
Figura 6.16. Aumento relativo do custo total / Capacidade da Frota para o caso de 5 portos e 3 navios.	100
Figura 6.17. Esquema ilustrativo das rotas selecionadas.....	103

RESUMO

O presente trabalho apresenta o panorama atual do transporte marítimo de contêineres por cabotagem no Brasil. Fez-se um breve descritivo do contexto em que se situa tal segmento do transporte marítimo, avaliando as condições para a sua viabilidade e apontando os principais entraves e reformas necessárias no setor portuário. O grande potencial de crescimento encontrado no setor motivou a elaboração de uma metodologia para desenvolvimento de uma ferramenta de apoio à decisão, na qual parâmetros relativos à demanda de mercados e características da frota podem ser testados para o dimensionamento desta, bem como a programação dos navios estabelecendo rotas e escalas nos portos que configuram esse cenário. A metodologia empregada pode ser dividida em duas etapas: a primeira consiste na geração de todos os roteiros viáveis, juntamente com os parâmetros relativos a cada uma das rotas para cada classe de embarcação. A segunda etapa consiste no desenvolvimento de um modelo de programação linear, cujo objetivo é a minimização do custo total da operação de cabotagem. Os modelos foram estruturados de forma a apresentar o dimensionamento da frota por classe de embarcação, a rota para cada embarcação da frota e a frequência de atendimento ou escala em cada porto.

ABSTRACT

This project presents the current overview of the maritime containers transportation for coastal traffic in Brazil. It is made a brief explanation of the context in which this segment of the maritime transport may be positioned; also, evaluate the conditions for its viability and pointing out the main obstacles and necessary modifications in the port and logistic section. The potential growth found in this section motivated the study of a methodology for development of a decision support tool in which both the parameters regarding the demand of markets and the characteristics of the fleet may be tested for its evaluation. Also, it is possible reach a fleet deployment establishing its routes and scales in the ports of the scenery. The adopted methodology may be divided in two parts: the first part is the generation of all feasible routes, within parameters to each route for each vessel class. The second part is the development of a linear programming model to minimize the total cost of the cabotage operation. The models were structured to present three main points: the evaluation of the fleet for each vessel class; the optimal route for each vessel and the frequency in each port.

1. Descrição do problema

1.1. *Introdução e Objetivos*

Nas últimas décadas o modal rodoviário não teve concorrência e evoluiu, tecnologicamente, no sentido de menor consumo de combustível e de maior capacidade de carga, diminuindo o frete. Como conseqüência, temos hoje a predominância do transporte rodoviário em rotas de grande distância, que seriam típicas do transporte de cabotagem.

Num país que apresenta 7.408 km de extensão de costa, onde as principais cidades, os pólos industriais e os centros consumidores concentram-se no litoral ou próximos a ele, o segmento de cabotagem deve surgir como uma alternativa viável para compor a cadeia de suprimentos de diversos setores.

O segmento de transporte de cabotagem tem crescido discretamente nos últimos cinco anos, mas as perspectivas de aumento da demanda são maiores. Desta maneira, a organização dos serviços portuários, bem como a infra-estrutura disponível, passam a ser peças fundamentais na capacidade de atendimento e nos custos desse serviço.

Há consenso sobre a necessidade de se elevar o volume de cargas transportadas por cabotagem no Brasil. A quebra da exclusividade da bandeira nacional instituída pela Lei Federal nº 9.432, de 08/01/97 e a aprovação da Lei Federal nº 8.630, de 25/02/93 conhecida como Lei de Modernização dos Portos, são as reformas estruturais iniciais destinadas a recapacitar competitivamente a cabotagem brasileira.

Para que a cabotagem venha a ter êxito, devem existir portos eficientes, segurança da carga, custos competitivos, tempos de espera menores nos portos e rotas adequadas. Dessa forma, será possível a transferência da carga do modal rodoviário para o modal aquaviário, e assim sendo, o transporte rodoviário deverá se integrar à cabotagem. Com a melhoria dos serviços portuários, a cabotagem deverá passar a ser um nicho de mercado para o transporte marítimo no Brasil. A logística integrada no transporte multimodal passa a ter fundamental importância para que se consiga oferecer um nível de serviço adequado a baixos custos para o embarcador.

O presente trabalho apresenta o panorama atual do transporte marítimo de contêineres por cabotagem no Brasil. Pretende-se apresentar um breve descritivo do contexto em que se situa tal segmento do transporte marítimo, avaliando as condições para a sua viabilidade e apontando os principais entraves e reformas necessárias no setor portuário.

O grande potencial de crescimento encontrado no setor motivou a elaboração de uma metodologia para desenvolvimento de uma ferramenta de apoio à decisão, na qual parâmetros relativos à demanda de mercados e características da frota podem ser testados para o dimensionamento desta, bem como a programação dos navios estabelecendo rotas e escalas nos portos que configuram esse cenário.

1.2. *Histórico*

O segmento da cabotagem foi muito utilizado no transporte de carga a granel, sendo o principal modal de transporte utilizado até a década de 30, quando as malhas

rodoviárias e ferroviárias apresentavam condições precárias para o transporte. A partir daí, quando foi eleito o presidente da República Washington Luís, cujo slogan da campanha era “Governar é Construir Estradas”, os investimentos foram direcionados para a construção de estradas, pavimentação de vias e manutenção da malha rodoviária. Com a chegada das indústrias automobilísticas nas décadas de 50 e 60, a política de desenvolvimento adotada estava praticamente estabelecida para o modal rodoviário. Em contrapartida, o modal aquaviário sofreu as conseqüências desta política pela escassez de recursos e foi gradativamente perdendo espaço neste cenário.

Na tentativa de reverter essa situação, foram criados alguns órgãos e comissões, tais como o Fundo da Marinha Mercante e a Superintendência Nacional da Marinha Mercante (Sunamam), que tinham como principal objetivo alavancar a construção naval no país, estabelecer linhas de navegação a serem cumpridas regularmente pelas empresas, levantar recursos para investimento na infra-estrutura portuária e adequar a frota de embarcações brasileira para atender a demanda que havia migrado para o modal rodoviário.

Tais medidas não tiveram os resultados esperados devido ao grave processo inflacionário que o país atravessou, apresentando índices próximos de 1000 % a.a, cujas conseqüências diretas foram o encarecimento excessivo da construção naval brasileira e a ineficiência dos portos, tanto no que tange aos custos de movimentação e liberação de carga, quanto às baixas produtividades dos equipamentos de manuseio. Dessa forma, foi inevitável que grande parte da carga fosse transportada pelo modal rodoviário. Restou

para o segmento de cabotagem parte da carga de granéis líquidos e sólidos, que são cargas de grandes volumes e baixo valor agregado.

Na década de 70, a navegação brasileira de longo curso atingiu o seu auge, quando a construção naval apresentava números impressionantes, como o recorde de construção de cinquenta navios, totalizando 1.394.980 t, sendo nove navios para exportação, em 1979, e os estaleiros comemoravam os lançamentos dos grandes petroleiros e cargueiros. Esse desenvolvimento desenfreado ocorreu de forma desordenada. Em 1973, ocorreu o primeiro choque do petróleo em razão da crise do petróleo nos países árabes. O choque não abalou os planos de investimentos direcionados ao modal rodoviário e, apesar do elevado custo do petróleo e conseqüente inflação na economia, o modal rodoviário aumentava sua parcela na movimentação de carga no país. O resultado foi a predominância do transporte rodoviário em rotas de grande distância, que seriam típicas do transporte de cabotagem.

Em 1979, ocorreu a segunda crise do petróleo na qual os países produtores do petróleo revisaram os seus preços, dando início a um período de recessão mundial em contrapartida ao crescimento da economia brasileira. Nessa conjuntura, a matriz de transporte brasileira já estava consolidada com o modal rodoviário usufruindo-se do diesel subsidiado e, ainda assim, operando em níveis elevados de frete. Ao final da década de 90, a privatização das estradas e o aumento nos pedágios contribuíram ainda mais para o aumento do frete rodoviário.

Em 1990, a empresa Aliança Navegação iniciou as operações de transporte marítimo de contêineres via cabotagem com duas embarcações na linha Santos-Manaus

na tentativa de viabilizar o modal aquaviário, que correspondia a 18,4 % do total contra 56,0 % do modal rodoviário. Diante do contexto de elevados níveis do frete rodoviário, a alternativa pela cabotagem se mostrava propícia e oportuna, apesar dos problemas da infra-estrutura portuária. O fracasso veio imediatamente no início das operações, quando tomou posse o presidente Fernando Collor, que inviabilizou os investimentos programados até então, através do confisco econômico.

Em 1999, num contexto bem diferente do que ocorreu em 1990, com uma economia estabilizada e índices de inflação controlados, o país, aparentemente, retoma seu crescimento e possibilita uma nova investida no transporte marítimo por cabotagem. Nesse novo contexto, um dos fortes entraves à cabotagem, a infra-estrutura portuária, passa por uma época de transição com a implantação da Lei de Modernização dos Portos, promulgada em 25/02/93, cuja conseqüência, direta e imediata, se faz sentir na melhoria das condições de operação, melhores níveis de serviço e custos compatíveis e negociáveis.

1.3. *Panorama Atual*

Diferentemente do que ocorreu em 1990, hoje, as empresas têm consciência de que a viabilidade do segmento de cabotagem depende do nível de serviço oferecido ao usuário, da qualidade dos serviços, da confiabilidade, da regularidade e continuidade, do *transit-time* e freqüência compatível com a carga e, principalmente, de fretes competitivos.

No contexto atual, em que as condições político-econômicas favorecem o desenvolvimento do comércio com índices de inflação aparentemente estabilizados, taxas de juros em queda juntamente com a modernização dos portos, a cabotagem passa a ocupar um nicho de mercado até então explorado apenas pelo modal rodoviário.

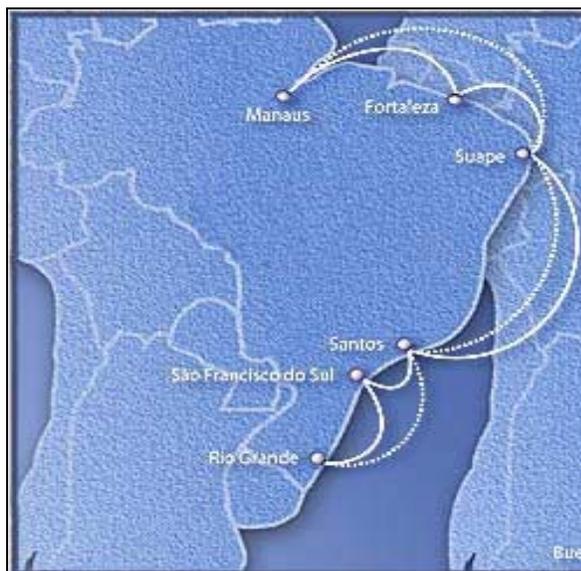


Figura 1.1. Cenário de portos cobertos pela cabotagem das empresas Aliança/Transroll, em 1999.

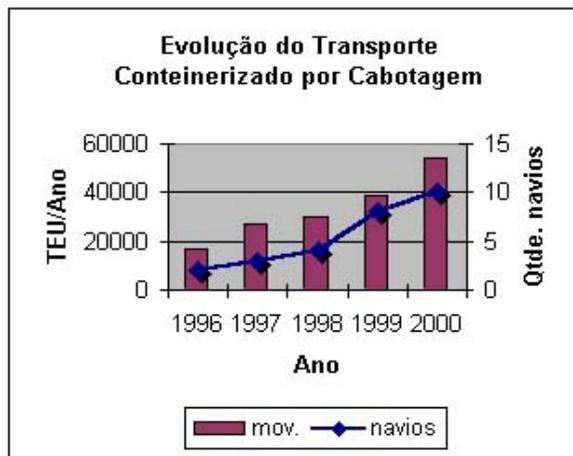
Ao analisar a matriz de custos de ambos os modais sob a ótica do custo/benefício do combustível, para o modal marítimo, os armadores pagam o óleo de acordo com o preço internacional, enquanto que o modal rodoviário continua se beneficiando de custos subsidiados. Ainda assim, o transporte por cabotagem pode oferecer melhores condições para trechos longos de percurso. Tomando como exemplo o principal trecho praticado na cabotagem, de Santos a Manaus, numa viagem de uma embarcação de 700 TEUS, o

custo do combustível representa 5,0% do frete, enquanto que, esse custo representa 23,0% numa viagem rodoviária.

Além disso, existem diversos outros fatores desfavoráveis ao modal rodoviário, tais como condições precárias de vias, pedágios, idade média da frota e, principalmente, a falta de segurança no transporte.

Em 1996, a empresa Transroll contava com apenas dois navios operando na rota de Buenos Aires a Salvador, atingindo uma movimentação de 16.800 TEUS/ano. No ano seguinte, a Transroll estendeu a rota para Fortaleza tendo atingido 27.000 TEUS/ano com uma embarcação adicional. Para o ano 2000, a movimentação prevista era de aproximadamente 54.000 TEUS/ano.

Atualmente, existem dois operadores, sendo a Aliança-Transroll operando em *joint-venture* e a Docenave, totalizando dez navios dedicados exclusivamente à cabotagem. As empresas operam em rotas diferenciadas escalando portos distintos. Os navios da Aliança-Transroll oferecem o serviço com frequência fixa quinzenal, garantindo ao embarcador maior confiabilidade e a certeza de que nas datas pré-determinadas o navio estará iniciando viagem. A Docenave opera cinco navios afretados da Frota Oceânica com frequência variada de acordo com a rota, tendo embarques semanais para Manaus.



Fonte: Trade & Transport

Figura 1.2. Evolução da cabotagem.

1.4. Entraves do setor

A navegação por cabotagem enfrenta algumas dificuldades que, em muitos casos, comprometem o seu êxito. Naturalmente, utilizar o transporte marítimo implica em desafios que certamente representam riscos para o embarcador. Existe uma familiaridade muito grande quando se trabalha com o caminhão: os procedimentos, os eventuais problemas, os tempos e prazos, os trâmites burocráticos, etc, são conhecidos, enquanto que estes fatos são desconhecidos para o transporte marítimo. O problema da falta ou ausência de tais informações faz com que o dono da carga acabe por optar por uma operação mais “segura”, porém muitas vezes não adequada. Por mais que existam condições favoráveis para o transporte marítimo, é necessário que o usuário confie e acredite na operação. Sem essa conscientização, o modal rodoviário continuará operando incessantemente em rotas que não são adequadas para ele. Atualmente, o setor está atravessando um período de transição para a plenitude da cabotagem. A matriz de

transporte brasileira não apresentará mudanças drásticas em curto prazo. Os problemas citados acima são mais agravantes para as pequenas e médias empresas, cujo volume de carga individual é pouco significativo se comparado com as demais. Essa categoria estará sensibilizada com a alternativa do transporte utilizando a cabotagem quando os serviços já estiverem consolidados e comprovados pelo mercado das grandes empresas. Dessa forma, a cabotagem deverá começar com as grandes empresas, estabelecer rotas, padrões, regularidade e depois oferecer esse serviço também às pequenas e médias empresas. Mesmo porque, nessa fase de transição, todos os *players*, citados anteriormente, estão operando com prejuízos e sérias divergências, no que tange à viabilidade econômica e operacional.

A Lei no. 8.630, que dispõe sobre a modernização dos portos, trouxe melhorias indiscutíveis ao setor de transporte marítimo, através das concessões e investimentos de iniciativa privada que resultaram em portos mais eficientes, aumentando a produtividade, e, conseqüentemente custos menores devido à redução das tarifas de movimentação e taxas portuárias. Em contrapartida, a gestão de mão-de-obra foi transferida para o Órgão Gestor de Mão-de-Obra (OGMO), obrigando os operadores a seguirem os regimentos do órgão, isto é, a manutenção das escalas de trabalho. Como conseqüência, tem-se um superdimensionamento de trabalhadores nas escalas previstas, onerando o custo global das operações. Quando se trata de transporte interno, tais melhorias ainda não são suficientes para a competitividade do setor. Um exemplo é o caso do porto do Rio de Janeiro, que cobra do armador cerca de U\$150 por TEU na navegação de longo curso e U\$130 para a cabotagem. Esse valor ainda é excessivamente alto num segmento em que

o custo de transbordo não pode ser diluído como acontece na navegação de longo curso, o que acaba por desencorajar a utilização da cabotagem.

Analisando a cabotagem sob o ponto de vista do cliente/embarcador da carga, existem, entre outros, dois grandes fatores desfavoráveis em relação ao modal rodoviário: a regularidade e a frequência dos navios.

É indispensável que o serviço ofereça condições para que os clientes possam fazer uma programação do transporte, ou seja, que haja continuidade dos serviços que são oferecidos. Por decorrência dos fatos oriundos do passado, diversas empresas amargaram prejuízos por falta de cumprimento das programações e das escalas de atracação dos navios. Conforme mencionado acima, essa regularidade já existe para a frota da Aliança/Transroll, embora ainda não consolidada no mercado. Além da regularidade, é necessário oferecer uma frequência compatível com o fluxo de cargas que se deseja transportar. Atualmente, o intervalo entre viagens da Aliança/Transroll é de quinze dias, o que está muito aquém do exigido e esperado pelos clientes. O *lead-time* aceitável e viável para cargas perecíveis deve ser no máximo de quatro dias. Essa frequência acaba por impor restrições ao tipo de carga. Naturalmente, esse problema só poderá ser solucionado com a integração de mais embarcações na frota de cabotagem para a rota viável.

Por fim, existe o problema da ausência da documentação fiscal específica para o transbordo. Não existe um procedimento ou documento padrão, um conhecimento de carga compatível e aceito em todos os portos. Atualmente, cada terminal ou cada porto possui suas normas para a cabotagem e/ou transbordo que, muitas vezes, acaba onerando

o custo e inviabilizando o transporte. Além disso, existe o problema da bitributação do ICMS no transporte porta a porta, pois no conhecimento de transporte deve constar a parcela do modal marítimo e a do modal rodoviário, este último já cobrado anteriormente.

1.5. Tendências do setor

A movimentação e o transporte de contêineres na cabotagem resultaram no ano de 1999 em aproximadamente 98.000 TEUs. As outras cargas, incluindo as cargas a granel e carga-geral não-containerizada e excluindo 180 milhões de toneladas de petróleo e derivados, resultaram em aproximadamente 220 milhões de toneladas, segundo a Associação Brasileira dos Terminais Portuários (ABTP). Supondo que apenas 10% da parcela de carga não containerizada possa ser transportadas pelo modal marítimo, existiria uma demanda de 22 milhões de toneladas adicionais. Se for considerado que, pelo menos, metade desse volume possa ser containerizado, isso resulta em aproximadamente 440.000 TEUs, volume muito além do que hoje representa a movimentação anual. É notório que existe um mercado muito além da capacidade de transporte por cabotagem. Isto é, existe um volume muito grande de carga sendo transportado por caminhões, que poderia e deveria ser transportado pelo navio.

Para que essa carga migre para a cabotagem, é necessário que haja conscientização por parte de todos os *players* da cadeia logística envolvida, inclusive do governo. Além dos fatores citados acima, existe a necessidade de se reestruturar a cadeia logística para oferecer as condições necessárias para atender aos clientes de forma

adequada, incluindo o serviço porta-a-porta. Nessa cadeia, o elemento de maior destaque é a formação de armazéns e centros de distribuição, cujo principal objetivo é o de consolidação da carga em lotes compatíveis com a capacidade do navio quando localizado em uma área próxima ao terminal ou com as condições impostas pelos clientes no caso de estar distante do terminal. O centro de distribuição terá função de concentrar as cargas e ajustar os tempos de coleta/entrega com os tempos de embarque/desembarque dos navios permitindo maior flexibilidade para um atendimento *just in time*.

O conceito de serviços inerente à cabotagem deve agregar valores de acordo com a necessidade dos clientes. Cada vez mais, as empresas de transporte estão tendo que se adequar às exigências do mercado e, para tal, reformulações na cadeia logística deverão ser constantes e sempre revistas. Nesse sentido, a empresa Aliança vem estudando alternativas de embalagem para o transporte com o intuito de oferecer ao cliente maior flexibilidade e agilidade. A empresa visa ampliar a sua fatia de mercado conquistando as pequenas e médias empresas que poderiam utilizar o segmento da cabotagem com uma quantidade menor de carga, isto é, a unidade-padrão não deverá ser sempre o contêiner.

Para tanto, a sinergia deverá ser convergida no sentido de formar *joint-ventures* e trabalhos em parcerias, pois dessa forma, as operações poderão ser compartilhadas trazendo benefícios tanto para os armadores quanto para os usuários.

Em termos práticos, toda essa operação de coleta de carga, consolidação, armazenagem, transporte rodoviário nas pontas e transporte por cabotagem implica em

tempos e custos burocráticos desnecessários, que podem ser solucionados com a nova Lei de Regulamentação do Operador de Transporte Multimodal (OTM).

1.6. *Regulamentação do OTM*

Recentemente, foi promulgado o Decreto nº 3.411/2000, que regulamenta a Lei nº 9.611/98, que dispõe sobre o Transporte Multimodal de Cargas (OTM) permitindo que o embarcador se beneficie dos recursos logísticos de forma mais eficiente e barata. Trata-se de um documento que permite a oferta de serviços porta a porta no país, independentemente do modal utilizado com apenas um único conhecimento de transporte. A lei tem como principal objetivo reduzir os custos e o tempo de trânsito da carga, principalmente na questão fiscal, permitindo uma economia significativa para o embarcador. Entretanto, a lei entrou em vigor sem a resolução das duas principais questões: tributação do ICMS e o seguro da carga. O Conselho Nacional de Política Fazendária (Confaz) não decidiu sobre a forma de arrecadação do ICMS, isto é, se a cobrança seria na origem ou no destino da carga. Quanto à apólice de seguro, o documento depende da manifestação da Superintendência de Seguros Privados (Susep).

1.7. *Conclusões sobre a situação atual do segmento de cabotagem*

As condições para a plenitude da cabotagem estão traçadas, os problemas já foram equacionados e, aos poucos, o segmento vem se mostrando como uma alternativa economicamente viável e adequada para transportes de longas distâncias. É importante

esclarecer que a cabotagem não tem como objetivo “roubar” a carga do caminhão, mas se integrar à cadeia logística. O modal rodoviário estará sempre presente e continuará sendo indispensável nas pontas da cadeia.

A cabotagem surge como uma nova alternativa aos embarcadores para uma reestruturação da cadeia logística permitindo ao cliente maior flexibilidade e maior poder de negociação junto aos operadores.

Existe um grande potencial de crescimento mas que somente será aproveitado se todos os integrantes da cadeia logística trabalharem em sincronia em busca de um objetivo comum a todos e ao país. A matriz de transporte brasileira deverá apresentar mudanças gradativas, gerando maior competitividade no setor e, por fim, reduzindo custos aos clientes.

Tal conjuntura, de visível potencial de crescimento motivou o desenvolvimento de uma ferramenta que pudesse auxiliar o armador, que cada vez mais deve-se preocupar no planejamento e programação de seus recursos. A ferramenta pretende identificar e demonstrar as alternativas de operação, relacionadas às rotas e alocações de navios nas rotas, que melhor se adequam às condições iniciais introduzidas.

1.8. *Delineamento do trabalho*

A descrição do problema foi apresentada no presente capítulo, abordando as principais características do segmento da cabotagem no Brasil, bem como um breve descritivo do panorama atual da conjuntura em que ele se encontra.

O capítulo dois deverá abordar algumas das linhas de pesquisa consultadas nessa área de navegação costeira no exterior, alguns temas específicos relacionados à

cabotagem e sobretudo uma revisão bibliográfica dos diversos trabalhos que apresentam metodologias distintas para resolução de alguns problemas semelhantes.

No capítulo três, será apresentada uma explicação detalhada da arquitetura do modelo, ou seja, da metodologia e da abordagem dos dados de entrada. Além disso, serão definidos os portos que deverão ser considerados nas execuções do modelo.

O capítulo quatro descreve as etapas de manipulação dos dados de entrada, no que se refere à elaboração do modelo 1, que servirá de subsídio na geração de todos os dados de entrada para o modelo principal. Deverá ser discutido todo o teor de cada parâmetro considerado, bem como a descrição das heurísticas desenvolvidas para construção do modelo 1.

O capítulo cinco descreve a modelagem matemática do modelo 2, que é o modelo de programação linear mista, passando pela apresentação das variáveis, nomenclaturas, índices, detalhamento das equações e discussões a respeito da modelagem propriamente dita.

O capítulo seis apresenta todos os resultados obtidos no presente trabalho. Serão apresentados, no total, quatro grandes casos testados que diferem entre si quanto ao número de portos e quantidade de navios considerados.

O capítulo sete, de conclusões, apresenta as considerações finais do presente trabalho fazendo uma análise sistêmica do problema adotado, apontando as vantagens e desvantagens da ferramenta.

O capítulo oito pretende servir de auxílio às futuras pesquisas através de sugestões e ressalvas do presente trabalho. São apresentados fatores e algumas condições que deverão ser aprimoradas para as versões futuras do trabalho.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. *O segmento da cabotagem*

A bibliografia apresenta poucas referências específicas para o caso da cabotagem brasileira. As publicações mais recentes relacionadas ao transporte containerizado por cabotagem encontram-se em periódicos que relatam as condições do mercado e das tendências do setor. Assim sendo, inexistem pesquisas em artigos técnicos ou estudos teóricos que levantem metodologicamente os problemas do setor e as possíveis soluções. A seguir, faz-se uma breve revisão bibliográfica de alguns desses trabalhos.

CASPERS; BRUGGE (1987) [5] mostram a necessidade da multimodalidade na cadeia logística expondo as condições necessárias para viabilizar a cabotagem em pequenos trechos. Os autores enfatizam o problema da descontinuidade no transporte quando se trata do modal aquaviário pela costa, que, inevitavelmente, configura uma quebra na cadeia logística. O conceito de quebra da cadeia explicado no trabalho refere-se à mudança do modal de transporte durante uma operação. Uma cadeia descontínua significa custo, tempo e conseqüentemente, diminuição do nível de serviço. Segundo os autores, atualmente, a logística responde por 10 a 30 % de custo total de uma rede de produção. Do total dos custos logísticos, pelo menos um quarto corresponde a custos relativos ao transporte. Isso significa que o aumento da produtividade ou a redução dos custos globais depende fortemente da atividade logística exercida na empresa. As alternativas de aperfeiçoamento da atividade de cabotagem dependem de investimentos na infra-estrutura portuária, especialmente na reengenharia dos processos de transporte,

isto é, na revisão dos processos e procedimentos na atividade de carga/descarga, desembarço, liberação, controle, recebimento da carga e, por fim, em sistemas de informação. O problema da proteção ao meio ambiente tende a ser cada vez mais enfatizado e, nesse aspecto, o modal marítimo apresenta a melhor opção de transporte em pequeno curso.

WILLIGENBURG; HOLLANDER (1992) [22] demonstra que a alternativa do transporte aquaviário em rotas de pequenas distâncias na Europa é perfeitamente viável frente ao mercado interno europeu em ascensão e aponta o desenvolvimento alcançado pelo transporte marítimo. Na Europa, os outros modais de transporte vêm apresentando sinais de saturação, isto é, as operações estão ocorrendo próximas dos limites das capacidades, ficando evidente a necessidade de maiores investimentos no transporte aquaviário de pequeno curso. A alternativa de um cenário composto por portos concentradores de carga (*hub-ports*) aliados aos portos de menor porte para atenderem os navios “feeders”, já está configurado na Europa. O sistema de portos concentradores de carga apresenta três níveis de portos de acordo com o porte, capacidade e facilidades oferecidas. A tendência é o surgimento de outros portos alternativos de ótima infraestrutura terrestre integradas à malha rodo-ferroviária e que poderão servir aos navios menores. Os autores apontam diversas vantagens do transporte de cabotagem frente aos modais rodoviários e ferroviários. O contexto é bastante diferente do encontrado em nosso país, mas isso não impede que a navegação brasileira siga esse mesmo rumo.

DIBNER (1992) [6] alerta para as mudanças ocorridas no transporte marítimo de pequenas distâncias desencadeadas pela globalização e faz duras críticas à política de

transporte de pequeno curso adotada pelos Estados Unidos. O autor procura enfatizar a matriz de transportes americana evidenciando a pequena penetração do modal aquaviário no país. A consequência de tal política faz com que as empresas de navegação americanas atuem no continente europeu de forma regular, num contexto bem adiverso ao encontrado no continente americano. O autor efetua comparações da prática da navegação por cabotagem entre os dois continentes. As justificativas pelas condições tão distintas entre os continentes provêm da natureza geográfica, que possibilita alternativas viáveis de transporte na América do Norte e inviáveis no continente europeu.

BOTTER (1996) [2] apresenta uma análise do sistema de cabotagem no Brasil, por meio de dados sobre tráfego, navegação costeira e rotas padrões e faz uma comparação de custos e análise financeira do transporte rodoviário.

FADDA (1995) [7] efetua uma minuciosa análise histórica da evolução do setor de transportes desde a década de 50 até os anos 90, descrevendo os acontecimentos político-econômicos e suas repercussões no setor, apresentando o contexto da cabotagem ao longo do tempo. Entretanto, nos últimos cinco anos, o cenário da cabotagem atingiu significativas mudanças, as quais não estão descritas no trabalho.

Existem trabalhos de mestres e doutores que dissertaram a respeito do segmento de cabotagem (FADDA, (1995), BOTTER; (1996), SILGUERA; BRINATI (1977)) quanto à sua evolução e características das embarcações necessárias para atender esse mercado.

2.2. *A metodologia para desenvolvimento do modelo*

Na literatura, existem diversas publicações a respeito do problema de roteamento e programação, que, em muitos casos, fazem analogias com o problema do caixeiro viajante. O problema de programação de escalas de uma frota de embarcações tem sido amplamente discutido, mas as soluções propostas têm mostrado avanços apenas para casos particulares, específicos para o caso abordado. E, dessa forma, tem se mostrado um campo muito vasto a ser explorado. As publicações existentes abordam o mesmo problema sob diversos aspectos, priorizando uma ou outra condição, ou diferenciando-se nos níveis de hierarquia de tomada de decisão (estratégico, tático e operacional) como por exemplo, atribuição de regras para a janela de tempo de carregamento/descarregamento, utilização de um único tipo de embarcação em uma ou diversas frotas, ou utilização de embarcações distintas em uma mesma frota, utilização de navios afretados ou próprios, avaliação do desempenho da frota variando-se a velocidade de cruzeiro, problemas de dimensionamento de frotas para rotas pré-determinadas, imposição das restrições de carregamento de mais de um tipo de cargas, transporte por múltiplos pontos de origem e múltiplos pontos de destino, entre outros.

Nesse ponto, é necessário ressaltar o significado e diferenças entre alguns termos largamente utilizados na literatura para esse tipo de problema, como por exemplo *shipping, routing, scheduling e deployment*.

RONEN (1983) [19] faz uma abordagem acadêmica a respeito dos artigos publicados nas principais edições especializadas do setor, efetuando um comparativo dos artigos apontando as diversas óticas e metodologias empregadas para cada tipo de

problema. Segundo o autor, o termo *shipping* refere-se a atividade de transporte de carga utilizando o modal marítimo. *Routing* é o termo empregado para determinação e alocação da seqüência de portos para um dado navio. *Scheduling* é o termo utilizado para programação de tempos ou janela de tempos para os diversos eventos de uma rota do navio. *Deployment* refere-se à alocação da embarcação na frota para execução de determinadas atividades ou rotas. A diferença entre *scheduling* e *deployment* não é clara na literatura existente. O termo *deployment* é, geralmente, empregado quando embarcações são designadas a cumprir uma seqüência de viagens em uma mesma rota e, dessa forma, associado a um horizonte de tempo longo. O termo *scheduling* não significa a alocação da embarcação para uma rota específica, em face da incerteza da operação marítima. E, dessa forma, é associado a um menor horizonte de planejamento.

2.3. Modelos de dimensionamento de frota

São os modelos que procuram determinar o tamanho da frota e sua composição para operação, em um roteiro pré-determinado.

PERAKIS; PAPADAKIS (1989) [13] abordam o problema da otimização de uma frota de navios que operam em uma rota fixa, sempre entre dois portos, para um único tipo de carga, no qual o preço do contrato de transporte é fixo. O problema é tratado como sendo não linear com multivariáveis, pois tanto a variável de velocidade da embarcação quanto a de ocupação são independentes. O trabalho busca obter a melhor velocidade de operação, a fim de minimizar os custos, sem prejudicar o atendimento. Os

autores procuram dimensionar a frota baseando-se principalmente na velocidade dos navios, desconsiderando a janela de tempo.

LANE; HEAVER; UVENO (1987) [11] desenvolveram uma metodologia para determinação do tamanho da frota incluindo navios de frota própria e navios afretados para uma rota tipo *liner*, em que as demandas e o fluxo de carga do porto de origem ao porto de destino eram conhecidos. O trabalho foi subdividido em três etapas, das quais a primeira corresponde à geração de todas as rotas viáveis e, posteriormente, uma seleção das possíveis candidatas utilizando heurísticas apropriadas. A etapa seguinte consiste no desenvolvimento de uma série de heurísticas que tinha como objetivo a alocação das embarcações, em que os parâmetros das características dos navios são setadas como dados de entrada do modelo. A etapa final representa a integração das etapas anteriores, garantindo que cada tarefa seja executada apenas uma única vez.

Mais tarde, RANA; VICKSON (1988) [18] analisaram o mesmo problema sob um aspecto mais limitado. O modelo permitia adicionar embarcações ao longo de sua execução ao invés de maximizar a ocupação e penalizar o tempo de atendimento. A função objetivo deste modelo procura maximizar a receita gerada a partir de sua frota própria e da frota afretada. A metodologia empregada foi através de um modelo de programação linear.

Outro modelo para dimensionamento de frota foi desenvolvido por KOENIGSBERG; MEYERS (1980) [10]. Os autores analisaram um sistema de distribuição de grãos líquidos em que existiam duas frotas distintas compartilhadas em uma mesma atividade de carregamento, transporte e descarregamento. O trabalho visou

obter os índices de desempenho principalmente da fila cíclica que se formava nas bases compartilhadas. As análises resultaram em uma quantidade de embarcações por frota e os respectivos números de viagens por ano.

O problema de alocação de frota, isto é, designação de uma frota a determinadas rotas, foi bastante explorado até então. PAPADAKIS; PERAKIS (1989) [12] trataram um problema em que existe uma capacidade superdimensionada no transporte com múltiplas origens e múltiplos destinos. Os autores utilizaram um modelo de programação não-linear para designar os pares de origem-destino associadas a uma velocidade de cruzeiro ótima nas condições carregadas e lastreadas para cada embarcação. Posteriormente, RANA; VICKSON (1988) [18] propuseram uma metodologia de roteamento de uma operação de transporte containerizado em uma rota específica com o objetivo de maximização da receita. Nesse caso, era permitido que não fossem cumpridos eventuais carregamentos que gerariam pouca ou nenhuma receita. A metodologia adotada foi um modelo híbrido de programação linear e não-linear utilizando decomposição combinada com algoritmos heurísticos específicos para resolvê-lo.

PERAKIS; JARAMILLO (1991) [14] utilizaram programação linear para alocação de embarcações nas rotas adequadas baseado em modelos reais associados a planilhas de custos. As não-linearidades geradas a partir das variáveis de velocidade de cruzeiro e frequência das operações foram solucionadas antes da aplicação do modelo de programação linear.

2.4. Modelos de Scheduling da frota

O problema de *scheduling* de uma frota é o que apresenta o maior grau de detalhe do planejamento e operação da frota. É o problema em que existe uma determinada quantidade e período para executar o transporte e, por outro lado, existe uma determinada quantidade de embarcações que executarão tais tarefas. Aparentemente, o problema não parece ser tão complicado, mas existem diversos fatores envolvidos em ambos os lados que possibilitam inúmeras formas e modos em que, muitas vezes, uma programação adequada de alocação dos recursos e avaliação de nível de serviço associado aos custos envolvidos gera uma gama imensa de alternativas para a realização da atividade. Tais fatores podem estar relacionados às restrições de carregamento/descarregamento dos produtos e janelas de tempo envolvidas. Além disso, outros fatores distintos relacionados a embarcações como, por exemplo, velocidade, capacidade e calado mínimo, bem como os custos associados e de afretamento, podem estar envolvidos.

Geralmente os modelos de roteamento costumam determinar o tamanho da frota baseado na demanda histórica de transporte ou sua projeção futura nas linhas regulares daquela frota. Eventualmente, os modelos contemplam o roteamento considerando possibilidades de utilização de navios afretados por tempo, durante um determinado horizonte de planejamento. Na última década, diversos trabalhos relacionados a janelas de tempo surgiram incrementando ainda mais as restrições e aumentando a complexidade dos modelos. Dessa forma, a literatura apresenta uma esparsa quantidade de trabalhos relacionadas a esse tema.

BOYKIN; LEVARY (1985) [3] apresentaram um estudo de simulação para uma operação de um produto químico especializado. O sistema desenvolvido foi utilizado para dimensionar e testar os diversos itinerários de viagens variando-se a velocidade dos navios.

BROWN ET AL. (1987) [4] apresentaram um modelo de roteamento para uma frota de navios tanques, na qual foram gerados exaustivamente todos os possíveis roteiros viáveis para cada embarcação e o modelo procurou a solução de mínimo custo. FISHER; ROSENWEIN (1989) [9] seguiram o mesmo procedimento para o caso do transporte de óleo e derivados da Agência Militar Americana, em que foram gerados 960 itinerários candidatos. O problema foi resolvido empregando o método de relaxação lagrangiana. Mais tarde, BAUSCH et al. (1991) [1] aperfeiçoaram o modelo desenvolvido por Brown et. al. para diversas refinarias e, portanto, com múltiplos destinos, utilizando frotas distintas.

FAGERHOLT, K. [8] apresenta um problema de roteamento avaliando o *trade-off* existente entre a flexibilidade de atendimento na janela de tempo requerida pela carga e os custos de penalidade associados a esse atraso. Segundo o autor, existem muitos trabalhos publicados a respeito do problema de *scheduling* com janela de tempo, sempre representando uma forte restrição e, em muitos casos, a melhor solução é descartada por não obedecer a uma restrição que na prática inexistente. A modelagem desenvolvida leva em consideração os custos de penalidade por hora, confrontados com os custos globais de transporte. A metodologia para solução do problema pode ser dividida em duas partes: a primeira é relacionada com a geração de todos os roteiros viáveis, através de

heurísticas, que servirão como dados de entrada do modelo da segunda parte. A geração dos roteiros viáveis significa uma redução do universo de varredura do modelo, sendo que cada um dos roteiros gerado passará a ser candidato para a solução ótima do problema. O trabalho mostra que o nível de serviço oferecido pelos portos dependerá cada vez mais da forma como ela trata o atendimento dos navios. Os resultados mostram que a violação da restrição da janela de tempo não implica, necessariamente, em custos maiores. Na prática, muitos portos ainda não trabalham dessa forma, estabelecendo janelas de tempo para os navios, mas o aumento da demanda de transportes e a competitividade entre os portos farão com que haja um maior controle no tempo de espera em fila das embarcações, permitindo um melhor nível de serviço dos portos.

FISHER; ROSENWEIN (1989) [9] desenvolveram um trabalho cuja decisão do modelo consiste na alocação adequada da carga e da embarcação, que poderá ser da frota própria ou afretada, respeitando as restrições de janela de tempo e procurando maximizar a ocupação da frota. Tal decisão é feita para um horizonte de planejamento de algumas semanas, cuja revisão é feita à medida que novos dados ficam disponíveis. O exemplo tratado nesse trabalho é o da frota de navios tanques da marinha americana, composta de aproximadamente vinte embarcações, transportando petróleo para todo o mundo. As informações coletadas referem-se ao tipo de produto, quantidade, local e tempo de carga/descarga. Uma viagem típica desse problema consiste em dois ou três carregamentos em portos distintos e próximos e, também, dois ou três descarregamentos em portos distintos e próximos. O horizonte de planejamento para esse problema é de três meses, sendo que novas informações são inseridas no modelo a cada mês.

SHERALI, et al. (1999) [21] exploram o mesmo problema de roteamento e programação da frota de navios para o sistema de transporte da Companhia de Petróleo do Kuwait. A metodologia empregada foi a programação linear mista, tornando-se um modelo relativamente complexo com um número excessivo de variáveis e restrições, necessitando de simplificações ao longo do desenvolvimento. O motivo da complexidade pode ser explicado pela grande quantidade de fatores considerados no problema. O sistema de transporte consiste em entrega de diversos tipos de produtos (granéis líquidos) a partir de três locais de origem e diversos centros consumidores do mercado europeu, norte-americano e japonês. A frota era composta de navios próprios e afretados, sendo que a alocação de uma ou outra classe também faz parte da decisão do modelo. Cada viagem era composta de apenas um ponto de origem e um de destino; porém, o navio poderia carregar vários tipos de produtos em porções distintos, independentemente. A rota também era uma variável de decisão, pois existem dois caminhos: através do Canal de Suez, apresentando uma série de restrições, e pelo Cabo da Boa Esperança, que é o caminho mais longo e mais custoso. Além disso, as entregas deveriam respeitar as janelas de tempo e cumprimento da cota mínima de cada produto. As infrações de tais restrições estavam sujeitas a penalidades. A função objetivo do modelo é a de minimização do custo, satisfazendo a demanda requerida em um horizonte de tempo para cada cliente. A complexidade do problema obrigou os autores a desenvolver um submodelo que gerasse um conjunto de soluções iniciais, modelado de forma mais agregada.

2.5. *Conclusões da Revisão Bibliográfica*

Os modelos levantados no presente capítulo mostraram diferentes abordagens para resolução de problemas semelhantes de *scheduling, routing e deployment*. A associação híbrida das idéias apresentadas permitiu que fosse possível desenvolver uma nova metodologia para a resolução de um problema de scheduling com características de rotas cíclicas, envolvendo multi-origens e multi-destinos.

A abordagem que envolve uma série de manipulação dos dados de entrada com o intuito de reduzir os esforços computacionais e principalmente reduzir a gama de possibilidades deverá ser a “chave” para resolução de problemas complexos.

Uma das grandes dificuldades verificadas em alguns trabalhos é a busca por novas técnicas para resolução de problemas combinatórios que são visivelmente não-lineares.

Para o problema do presente trabalho, muito dos modelos levantados sugeriram caminhos para o desenvolvimento da metodologia que será a seguir apresentada., especialmente no que se refere a determinação dos conjuntos de rotas viáveis, bem como a estruturação dos dados de entrada relativos às rotas geradas.

3. Caracterização da modelagem e dados numéricos

3.1. *Introdução e objetivos*

Neste novo cenário do segmento de cabotagem no Brasil, com a inclusão de outros possíveis operadores, novas embarcações na frota e novos portos candidatos, atrelado a um aumento de demanda para esse modal, pretende-se desenvolver uma ferramenta de planejamento para dimensionamento da frota, apontando características das embarcações, frequência ideal em cada porto e, conseqüentemente, rotas ideais com escalas diferenciadas de acordo com a demanda existente.

O modelo a ser desenvolvido pretende servir de subsídio ao armador da cabotagem, ou seja, toda a abordagem da elaboração do modelo tem como ponto de vista o armador, o dono do navio ou da frota. Desse modo, o principal objetivo do modelo é a minimização do custo da operação para um dado nível de serviço requerido. Admite-se a hipótese de que a empresa de navegação não vá operar na cabotagem utilizando embarcações afretadas por tempo ou por viagem, pois, nesse caso, a função objetivo estaria equivocada. A ferramenta pretende servir de auxílio na tomada de decisão no planejamento estratégico da empresa, em um horizonte de planejamento de um ano, no que diz respeito à alocação dos navios na operação de cabotagem, fixando a melhor rota para cada embarcação e procurando atingir a frequência de escalas esperada.

No dimensionamento de uma frota de navios, os fatores relativos às características dos navios, tais como velocidade, capacidade e custos, entre outros, influem diretamente no cálculo, conforme visto na revisão bibliográfica; entretanto, o

foco principal do presente trabalho não é a caracterização da frota em si, mas a sua operação. Desse modo, os dados referentes aos navios serão considerados no modelo por meio de parâmetros que permitirão análises de sensibilidade posteriores. A quantidade de navios disponíveis será definida inicialmente no modelo que, portanto, trabalhará com recursos limitados.

Da mesma forma que os navios, os dados relativos à demanda anual de contêineres em cada porto será introduzido no modelo como sendo um parâmetro. É muito difícil, quase impossível, de se chegar a um valor real quando se trata de demanda. Pode-se trabalhar com previsões, mas no caso de demanda de carga containerizada, é necessário um profundo estudo das condições de mercado de cada região, de cada estado e até de cada porto, avaliando as previsões de crescimento para cada setor e os possíveis tipos de carga que podem vir a utilizar a cabotagem.

A estruturação do problema foi dividida em duas partes: a primeira consiste na geração de todos os roteiros viáveis e cálculos dos parâmetros relativos à operação para cada rota gerada e para cada tipo de navio considerado. Tais resultados servirão como dados de entrada para o segundo modelo. A segunda etapa consiste no desenvolvimento e implementação do modelo matemático em um *software* apropriado, cujo objetivo principal é estabelecer uma programação de roteiros para cada navio ao menor custo.

A escolha do conjunto das melhores rotas para cada navio apresentará automaticamente a frequência de escala em cada um dos portos, pois a quantidade de viagens possíveis de se realizar terá sido calculada no primeiro modelo.

O procedimento ou roteiro para a solução do problema está apresentado na figura 3.1.

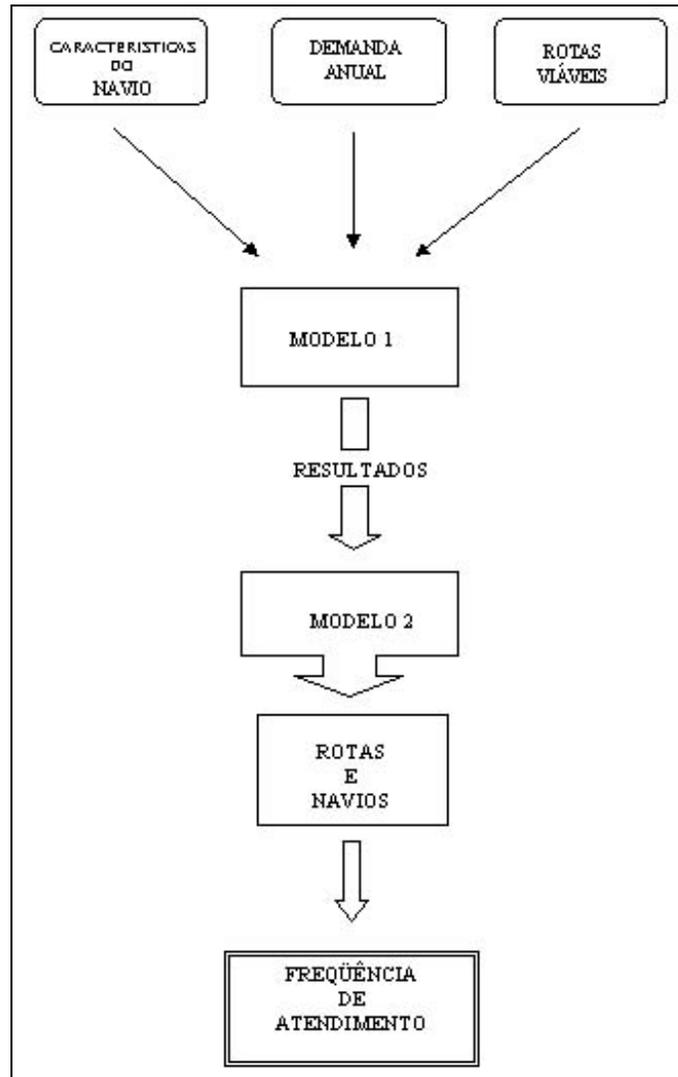


Figura 3.1. Estrutura da ferramenta

Os modelos um e dois apresentarão estruturas robustas o suficiente para permitir testar cenários variando-se qualquer parâmetro citado acima. A calibragem e a validação final serão efetuadas através de um estudo de caso e, posteriormente, serão efetuadas análises de sensibilidade das operações, realizadas atualmente pela empresa Hamburg-Süd Aliança Crowley Logística (HSAC Logística).

3.2. *Aquisição dos dados*

A primeira etapa do desenvolvimento do modelo um consiste na manipulação das informações que serão necessárias para a entrada do modelo dois. Diversas fontes foram consultadas, com o intuito de validar todas as informações que serão utilizadas. Muitas vezes, a estatística coletada junto a órgãos públicos, anuários e levantamentos ministeriais não reflete a realidade e acaba por mascarar informações relevantes, tornando, em muitos casos, dados contraditórios aos que se pode verificar no mercado. Naturalmente, a maioria dos dados existentes coletados a partir de fontes oficiais são dados ultrapassados e defasados com relação à situação atual. Pretende-se elaborar o modelo de forma tal que qualquer tipo de dado seja inserido no modelo um na forma de parâmetros permitindo atualização e validação *a posteriori*. Não foi possível, entretanto, obter algumas informações exatas e, nesse caso, foram admitidas hipóteses que serão explicitadas nas próximas seções.

3.3. *Dados relativos à movimentação de contêineres e seleção dos portos*

A caracterização do segmento da cabotagem deve, inicialmente, levantar os portos fisicamente viáveis, bem como os economicamente potenciais para figurarem nesse cenário. Atualmente, o país conta com vinte e seis portos, marítimos e fluviais, dos quais apenas dezesseis apresentam movimentação de contêineres na cabotagem. Conforme dito na seção anterior, o sistema de informação existente na maioria dos

portos é muito precário, acarretando a ausência ou inconsistência da estatística oficial. A tabela 3.1 mostra a relação dos portos que apresentam movimentação de contêineres na cabotagem.

Tabela 3.1. Portos que compõem o cenário da cabotagem.

Porto	Contêineres Movimentados	Porcentagem do Total
PORTO VELHO-RO *	10816	20%
RIO GRANDE-RS	9565	18%
MANAUS-AM	6052	11%
FORTALEZA-CE	5700	10%
SANTOS-SP	5471	10%
SUAPE-PE	3476	6%
CABEDELO-PB	2923	5%
RECIFE-PE	2753	5%
ITAJAÍ-SC	2066	4%
SALVADOR-BA	1636	3%
S. F. DO SUL-SC	1563	3%
MACEIÓ-AL	940	2%
RIO DE JANEIRO-RJ	770	1%
VITÓRIA-ES	559	1%
ESTRELA-RS *	113	0%
NATAL-RN	0	0%
PARANAGUÁ-PR	0	0%
IMBITUBA-SC	0	0%
Total	54403	100%

* Incluídos Navegação de Longo Curso e Transbordo.

Fonte: Ministério dos Transportes- 1998

A tabela 3.1 apresenta dezoito portos, dos quais nos dados referentes aos portos de Porto Velho – RO e Estrela – RS incluem-se os outros tipos de navegação (longo curso e transbordo). Os dados apresentados acima se referem ao ano de 1998, quando o segmento da cabotagem encontrava-se em um contexto muito diferente do atual. Os principais *players* do setor não atuavam nesse segmento quando tais dados foram

coletados. Por essa razão, a tabela acima serve como uma referência para a análise que se segue.

Em face de inconsistência dos dados apresentados na tabela 3.1, foram coletados dados por meio de entrevistas e conferências que refletem um cenário mais atual e realista. A tabela 3.2 mostra os portos que atuaram, efetivamente, no segmento da cabotagem containerizada no ano de 1999, segundo a empresa Wilport Operadores Portuários S.A, empresa do grupo Wilson Sons.

Tabela 3.2. Portos que compõem o cenário da cabotagem.

Porto	Contêineres Movimentados	Porcentagem do Total	Participação Cabotagem
Salvador	8482	15%	24%
Santos	8443	15%	2%
Rio Grande	8356	15%	9%
Fortaleza	8037	14%	29%
Recife	7070	13%	42%
Manaus	6602	12%	37%
São Francisco do Sul	6203	11%	14%
Outros	3321	6%	
Total	56514	100%	

Fonte: Wilport, palestra concedida na Intermodal 2000.

A tabela 3.2 mostra que apenas sete portos representam aproximadamente 94% de toda carga containerizada transportada por cabotagem. Os dados são relativos ao ano de 1999, que marca o início das operações de cabotagem pelos principais *players* do setor. Essa relação mostra ausência de três portos representativos do Nordeste: Suape-PE, Cabedelo-PB e Maceió-AL, e os portos de Santa Catarina: São Francisco do Sul e Itajaí. Tais ausências são perfeitamente explicáveis pela falta de demanda de carga

nesses locais. Todos os portos mencionados apresentam infra-estrutura suficiente para receber os navios da cabotagem mas, atualmente, as cargas em potencial estão utilizando os portos próximos, Recife e Rio Grande. Os outros portos, que representam 6%, correspondem à somatória de movimentação nos portos do Nordeste acima mencionados, Rio de Janeiro e Paranaguá. A última coluna da tabela 3.2 mostra a porcentagem de carga de cabotagem em relação à movimentação total de contêineres naquele porto. Sabe-se que o Porto de Salvador teve um aumento significativo da parcela de cabotagem, chegando a representar aproximadamente 50% do total em agosto de 2000.

É importante ressaltar que o aumento da multimodalidade permite uma diversificação nas alternativas de transporte e, dessa forma, o porto ou terminal mais próximo do local de coleta/entrega da carga não necessariamente será o porto utilizado no modal marítimo. É o conceito de zona de influência ou zona de abrangência do porto. Por exemplo, um centro consumidor do interior do Nordeste, que sempre utilizou o porto mais próximo, poderá receber e enviar carga a partir de um porto mais distante, mas que ofereça melhores condições de preço e serviço. Ou seja, a distância não é o único fator que dita a utilização de um determinado porto e, sim, a qualidade, o preço e a logística integrada no transporte, isto é, as facilidades e vantagens que esse porto oferece ao usuário.

As empresas atuantes no setor apresentam suas projeções de crescimento do mercado e, seguramente, os portos do Rio de Janeiro e Vitória passarão a compor esse cenário em curto prazo. Por essa razão, serão considerados os principais portos atuantes

e, também, os portos com potencial de participação nesse cenário. A tabela 3.3 mostra a relação dos portos selecionados que serão considerados no modelo.

Tabela 3.3. Portos selecionados

Manaus
Fortaleza
Recife
Salvador
Vitória
Rio de Janeiro
Santos
São Francisco do Sul
Rio Grande

4. Modelo 1 : Geração das rotas viáveis

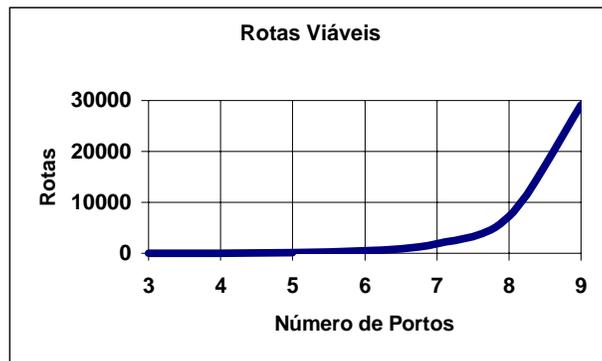
Nessa fase de concepção do modelo, serão geradas todas as rotas viáveis que poderão ser utilizadas para a cabotagem. Chamaremos de rota viável como sendo uma seqüência de portos ou um conjunto de viagens possíveis, representadas por arcos, a serem efetuadas pela embarcação. A rota será composta por itinerários de subida e de descida, pois a rota poderá ter caminhos distintos entre a ida e a volta. Na cabotagem, o roteiro não poderá apresentar alternância de sentidos até o último porto de destino, isto é, se o navio segue um itinerário rumo norte ou sul, ele deverá manter esse sentido até o final do trecho deste sentido. Naturalmente, deve-se respeitar o ciclo da rota para manter a continuidade das viagens.

4.1. *Quantificação das rotas viáveis*

A quantidade de rotas geradas depende da quantidade de portos a serem considerados, e esse número apresenta um crescimento exponencial, conforme mostrado na tabela 4.1 e gráfico abaixo.

Tabela 4.1. Número de roteiros viáveis por quantidade de portos considerados.

Portos	Rotas
3	6
4	27
5	112
6	453
7	1818
8	7279
9	29124



A tabela 4.1 foi gerada a partir da representação esquemática de roteiros levando-se em conta a restrição de ciclicidade. Eventualmente, outras restrições operacionais poderão ser consideradas, reduzindo a quantidade de roteiros.

A geração das rotas foi estruturada atribuindo-se para cada seqüência (ida e volta), uma variável binária para cada porto, sendo 1 atribuído para os portos que são escalados naquela seqüência e 0 em caso contrário. Nessa estruturação, a ordenação dos portos impõe uma seqüência lógica de viagem, evitando a alternância de sentidos, descrita anteriormente. As figuras abaixo ilustram a metodologia utilizada para calcular a quantidade de roteiros viáveis, variando a quantidade de portos a serem considerados. Cabe ressaltar que às células que contêm “X”, poderão ser atribuídos ambos os valores (1 ou 0).

subida		descida				
1	2	3	3	2	1	
1	X	1	1	X	1	= $2^2 = 4$
1	1			1	1	= $2^0 = 1$
	1	1	1	1		= $2^0 = 1$
Total=						6

Figura 4.1. Quantidade de rotas viáveis para 3 portos

subida				descida				
1	2	3	4	4	3	2	1	
1	x	x	1	1	x	x	1	= $2^4 = 16$
1	x	1			1	x	1	= $2^2 = 4$
1	1					1	1	= $2^0 = 1$
	1	x	1	1	x	1		= $2^2 = 4$
	1	1			1	1		= $2^0 = 1$
		1	1	1	1			= $2^0 = 1$
Total=								27

Figura 4.2. Quantidade de rotas viáveis para 4 portos

subida					descida					
1	2	3	4	5	5	4	3	2	1	
1	x	x	x	1	1	x	x	x	1	= $2^6 = 64$
1	x	x	1			1	x	x	1	= $2^4 = 16$
1	x	1					1	x	1	= $2^2 = 4$
1	1							1	1	= $2^0 = 1$
	1	x	x	1	1	x	x	1		= $2^4 = 16$
	1	x	1			1	x	1		= $2^2 = 4$
	1	1						1	1	= $2^0 = 1$
		1	x	1	1	x	1			= $2^2 = 4$
		1	1			1	1			= $2^0 = 1$
			1	1	1	1				= $2^0 = 1$
Total=										112

Figura 4.3. Quantidade de rotas viáveis para 5 portos

As figuras 4.1, 4.2 e 4.3 apresentam todas as alternativas de roteiros para três, quatro e cinco portos, respectivamente. As células que contém um “x”, correspondem às que poderão receber “0” ou “1”. Ao lado de cada esquema está apresentada a quantidade de roteiros viáveis em cada linha, sendo este valor a potência de dois (2) e expoente, o número de variáveis binárias na linha.

A formulação da equação que calcula o número de alternativas (R) para esse problema, onde n é a quantidade de portos considerados, é mostrada abaixo.

$$R = \sum_{l=0}^{n-2} \sum_{i=0}^{l} 2^{2i} \quad (4.1)$$

4.2. *Geração das rotas viáveis*

A geração das rotas viáveis foi executada em etapas através de rotinas de programação em planilhas, sendo, inicialmente, geradas todas as combinações de variáveis binárias para cada porto, na subida e descida. Na segunda etapa, foram eliminadas do banco de dados, todas as rotas que descaracterizavam uma viagem completa, isto é, seqüências de viagens sem origens ou sem destinos.

A terceira etapa consistiu na elaboração e aplicação de heurísticas de procura de descontinuidades de portos no início e fim de viagem. Ou seja, as rotinas de programação desenvolvidas em *Visual Basic Applications* (VBA) verificam se o último porto de subida coincide com o primeiro porto de descida e/ou se o primeiro porto de subida coincide com o último porto de descida.

Ao final, verifica-se o número de roteiros gerados com o cálculo apresentado anteriormente.

4.3. *Parâmetros das rotas viáveis*

O modelo 1 forneceu todas as alternativas viáveis do segmento de cabotagem identificando os portos por onde cada rota deverá passar. A partir disso, é possível efetuar algumas análises para caracterizar cada uma dessas rotas, no que diz respeito a distâncias percorridas, tempos de viagens, número de viagens redondas, capacidade máxima de transporte durante o horizonte de planejamento adotado e, por fim, o custo fixo da rota.

4.3.1. *Distância percorrida na rota*

A lista de rotas viáveis descrita anteriormente apresenta a seqüência de portos que aquela determinada rota estabeleceu e, portanto, é possível calcular a distância total percorrida naquela rota simplesmente pela somatória de todos os trechos. A matriz de distância, dada em milhas náuticas entre os portos considerados, é mostrada abaixo.

Tabela 4.2. Matriz de distância dos portos considerados (valores em milhas náuticas)

	RIG	SFS	SSZ	RIO	VIX	SSA	SUA	FOR	MAO
RIG	****								
SFS	449	****							
SSZ	598	161	****						
RIO	765	354	197	****					
VIX	997	580	419	232	****				
SSA	1402	958	804	656	450	****			
SUA	1772	1328	1174	1022	805	370	****		
FOR	2124	1678	1525	1377	1162	722	362	****	
MAO	3355	2909	2756	2608	2393	1953	1593	1288	****

4.3.2. Navios e suas características

Os navios podem apresentar características diversas e peculiares, o que, por si só, justificaria um estudo mais profundo na operação da cabotagem. Conforme descrito no início deste capítulo, adotar-se-ão alguns tipos de navios-padrões já existentes no mercado, sendo preferencialmente navios que já operam na cabotagem e navios que poderão operar futuramente. Os indícios de possibilidades de entrada de novos navios na operação são anunciados freqüentemente pela imprensa e podem ser confirmados ou não através dos *players* do setor.

A quantidade e características físicas dos navios por classe serão definidas inicialmente com base na frota que opera atualmente, conforme apresentado na tabela 4.3. Sendo insuficiente a quantidade de embarcações para o atendimento da demanda anual, poderão ser acrescentadas à frota embarcações semelhantes às enunciadas na tabela 4.3. Para garantir o atendimento da demanda, é necessário que haja uma quantidade de navios maior ou igual ao necessário.

Tabela 4.3. Características dos navios da frota

Navio	Velocidade(nós)	Capacidade(TEU)	Custo US\$/dia
1	19	1400	12000
2	18,5	900	9500
3	18,5	900	9500
4	17,5	670	5500
5	17,5	670	5500

Fonte: Drewry Shipping Consultants Ltda ,
Revista Trade &Transport & HSAC.

4.3.3. *Número de viagens*

A partir do cálculo da distância percorrida na rota e a caracterização dos tipos de navios candidatos a servirem tais rotas, é possível calcular o tempo de viagem redonda para cada tipo de navio, para cada rota. Esse tempo só depende da distância percorrida e do tempo despedido durante a operação no porto. Os tempos nos portos, incluindo tempos de espera, atracação, operação e desatracação do navio foram levantados segundo dados reais de produtividade em cada terminal, conforme apresentada na tabela 4.4.

Tabela 4.4. Tempo de Porto.

Porto	Tempo Total (hs)
RIG	22,0
SSZ	18,0
SUA	30,0
FOR	20,0
MAO	36,0
SFS	30,0

Essas informações permitem avaliar a quantidade de viagens redondas, possíveis de se realizar, naquela dada rota, por aquele tipo de navio, em um horizonte de tempo de um ano, período este estabelecido para o planejamento do modelo.

4.4. *Custos de Transporte*

Os custos considerados nessa modelagem estão associados às rotas e podem ser considerados como sendo apenas custos fixos do navio, isto é, os custos não dependem

da quantidade de contêineres transportados (movimentadas) em uma viagem. Os custos de movimentação nos portos são redundantes nessa abordagem, visto que toda a demanda de transporte será atendida, ou seja, tais custos não dependem da viagem ou embarcação alocada. É importante ressaltar que a abordagem do problema é do ponto de vista do armador, que pretende operar a cabotagem com frota própria, como acontece, atualmente, com a HSAC.

Na tabela 4.3, também são apresentadas, na última coluna, o custo diário de cada navio, na qual estão contabilizados os custos fixos diários de afretamento. Os custos relacionados a combustíveis e óleos em geral foram considerados de acordo com o tempo de viagem e consumo de cada navio e tempo de porto. As parcelas consideradas foram: custo de “bunker HFO” (*Heavy Fuel Oil*, combustível para viagem), custos de “bunker MDO” (*Middle Diesel Oil*, utilizados quando parado nos portos).

A partir dos dados de tempo de viagem redonda da rota e escalas programadas, é possível calcular o custo total da rota no período considerado. Portanto, o custo considerado no problema está associado à classe da embarcação e à rota em que esta foi alocada.

A figura 4.4 ilustra o procedimento descrito nesta seção.

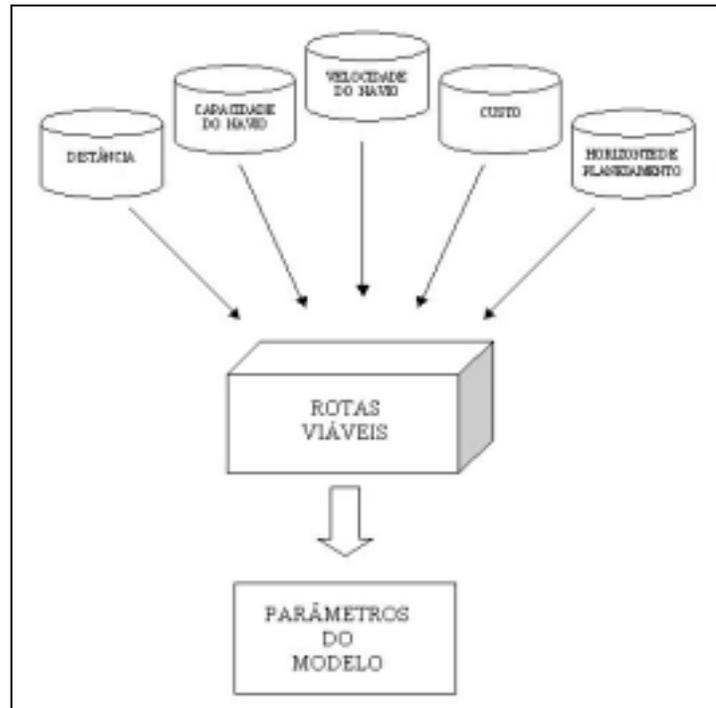


Figura 4.4- Esquema do Modelo 1

4.5. *Parâmetros de demanda de contêineres*

A demanda requerida por par de portos (origem-destino) será mais um dado de parâmetro do modelo. Esse dado corresponde à quantidade de contêineres necessária para transportar de um porto a outro durante um ano operacional, independentemente do caminho e cadência do transporte. Tais dados foram estimados com base na documentação existente de movimentação portuária junto ao Ministério dos Transportes e também através de entrevistas junto aos operadores. Novamente, esses dados deverão ser validados e calibrados através de um estudo de caso, bem como por análises de sensibilidade para os portos mais relevantes.

5. Formulação Matemática do Modelo 2

Os resultados obtidos a partir do modelo 1 servirão como base de entrada para o modelo 2, formulado como um modelo matemático em programação linear mista. O modelo dois deverá estar estruturado de forma a selecionar a melhor rota para cada embarcação da frota que atenda às restrições de demanda entre cada par origem-destino considerado. O parâmetro de demanda corresponde a um valor equivalente a um ano de movimentação; portanto, essa transferência de carga poderá ser feita em várias viagens, por rotas distintas e por navios distintos. A escolha e divisão da maneira como será o transporte deverão ser a resposta esperada do modelo.

O dimensionamento ótimo da frota será feito a partir da geração dos cenários avaliando o ponto de equilíbrio entre o custo global e o nível de serviço, no caso, o intervalo de escalas em portos. A quantidade de navios será um dado de entrada do modelo e, portanto, um problema com recursos limitados.

Por se tratar de um modelo com enfoque estratégico/tático, um navio não deverá mudar de rota durante o período. A rota estará vinculada ao navio.

5.1. *Nomenclatura dos Índices*

Ao longo da apresentação do modelo matemático, serão utilizados os seguintes índices:

- r , que indica a rota, composta por uma seqüência de portos em dois sentidos (Sul-Norte e Norte-Sul). Varia de 1 a R , em que R é a quantidade

de rotas disponibilizadas ao modelo e que depende da quantidade de portos considerada. A rota r é representada pelo vetor $T(r,l)$, sendo:

$$T(r,l) \begin{cases} =1, \text{ se o porto de índice } l \text{ pertence à rota de índice } r; \\ =0 \text{ em caso contrário.} \end{cases}$$

- i , que indica os portos de origem e recebe o código do porto, que poderá receber qualquer denominação desde que padronizada com os dados de entrada. Para o presente trabalho, foram utilizadas as denominações de portos segundo o código internacional, que poderá ser RIG, SFS, SSZ, SUA, FOR ou MAO, conforme os portos considerados em cada cenário.
- j , que indica os portos de destino e poderá receber qualquer um dos códigos de portos apresentados anteriormente.
- k , que indica o navio. Representa apenas uma unidade de embarcação, independentemente do tipo. Varia de 1 a n , onde n é o número máximo de navios disponibilizados. Poderá existir mais do que um navio de um mesmo tipo e nesse caso, cada navio receberá uma atribuição k diferente.

5.2. *Nomenclatura dos Parâmetros*

$C_{r,k}$: Custo anual da rota de índice r , operado pelo navio tipo k ;

Cap_k : Capacidade do Navio de índice k , em TEUs;

$D_{i,j}$: Demanda anual do porto de índice j a partir do porto de índice i , em TEUs;

$N_{r,k}$: Número máximo de viagens inteiras do navio de índice k na rota de índice r , calculada no modelo 1.

5.3. Variáveis de decisão

5.3.1. Escolha das rotas

A escolha das rotas será feita utilizando uma variável binária, associada a um navio e a uma rota.

$$X_{r,k} : \text{Variável Binária} \begin{cases} =1 & \text{se a rota de índice } r \text{ for escolhida para o navio de índice } k; \\ =0 & \text{em caso contrário.} \end{cases}$$

5.3.2. Fluxo de carga na rota

É a variável que define o fluxo de carga entre o porto de origem de índice i e o porto de destino de índice j na rota em uma viagem. Essa variável foi criada para ter um controle sobre a quantidade de carga embarcada no navio, a fim de se respeitar a capacidade máxima do navio em cada viagem. Vale ressaltar que o modelo considerará o valor $M_{r,k,i,j}$ como sendo o mesmo em todas as viagens durante o ano, da rota selecionada e que será permitida uma relaxação da variável definindo-se o tipo como sendo real e não nula. A otimalidade do problema poderá ser comprometida nos casos em que a variável assumir valores menores que 1. As considerações a respeito desta premissa serão abordadas nas apresentações dos resultados.

$M_{r,k,i,j}$: Quantidade de carga transportada do porto de índice i para o porto de índice j , pelo navio de índice k , na rota de índice r , numa viagem.

5.4. *Função Objetivo*

O principal objetivo do modelo é uma programação adequada para cada embarcação, respeitando as restrições, através da minimização do custo global da operação de cabotagem. A expressão abaixo é a somatória de todas as embarcações e, conseqüentemente, todas as rotas escolhidas, do produto entre o custo associado a cada embarcação em sua rota e a variável de escolha.

$$\text{Minimização do Custo Total} = \sum_r^R \sum_{k=1}^{k=n} C_{r,k} X_{r,k} \quad (1)$$

5.5. *Restrições*

5.5.1. *Restrição de exclusividade da embarcação em uma rota*

A expressão abaixo garante que para cada navio seja atribuída no máximo uma rota, durante todo o horizonte de tempo. A embarcação não poderá ser designada para mais de uma rota ao longo do processo. Uma vez atribuída uma rota, esta estará sendo servida até o final do horizonte de planejamento adotado. Por outro lado, a restrição permite que mais do que uma embarcação seja alocada em uma mesma rota.

$$\sum_r^R X_{r,k} \leq 1 ; \quad \text{para todo } k, k = 1 \dots n. \quad (2)$$

5.5.2. Restrição do atendimento de demanda

Essa restrição garante o atendimento da demanda anual do porto de índice i para o porto de índice j por todas as rotas escolhidas, por todos os navios. A quantidade de navios disponíveis para o modelo será superior ou igual à necessária para poder cobrir toda a demanda requerida. A expressão abaixo apresenta as somatórias, de todas as rotas e todos os navios, do produto entre a quantidade de viagens realizada pelo navio naquela rota e a quantidade de carga transportada entre os portos, no primeiro membro, sendo esta menor ou igual à demanda anual de carga entre o porto de índice i e o porto de índice j .

$$\sum_r^R \sum_{k=1}^{k=n} N_{r,k} M_{r,k,i,j} \geq D_{i,j} \quad \forall i, j ; \quad (3)$$

5.5.3. Restrição de correlação e vínculo

Essa restrição estabelece uma correlação entre a existência da variável de fluxo (M) e a existência desse arco na rota. Somente haverá transferência de carga entre os portos da rota de índice r utilizando o navio de índice k , se este for designado à rota de índice r . Matematicamente, qualquer $M_{r,k,i,j}$ será maior que zero quando $X_{r,k}$ receber o valor igual a um.

$$\sum_i \sum_j M_{r,k,i,j} \leq X_{r,k} * \sum_i \sum_j D_{i,j} \quad , \quad \forall r,k ; \quad (4)$$

5.5.4. Restrição de capacidade do navio

Essa restrição deve garantir que, para cada par de portos de índices i-j entre dois portos consecutivos em uma única viagem, toda carga transferida não ultrapasse a capacidade máxima do navio. Isto é, a restrição será caracterizada segundo a seguinte formulação:

$$\sum_i \sum_j M_{r,k,i,j} * F(T(r,i), T(r,j)) \leq Cap_k \quad , \quad \forall r,k ; \quad (5)$$

Na equação 5, o fator multiplicador da somatória de movimentação representa a condição presente em cada um dos pares de portos de índices i-j, que depende da característica da viagem e da rota em que este par i-j está inserida, ou seja, para cada par de portos de índices i-j haverá condições distintas dependendo da seqüência e sentido em que os portos serão visitados. A grande dificuldade de se expressar matematicamente tal restrição se deve ao fator de ciclo da rota, isto é, um mesmo porto se caracteriza como sendo origem e/ou destino.

Para cada par origem-destino de uma viagem, é preciso considerar todas as cargas que potencialmente podem estar presentes. A figura 5.1 mostra um exemplo de

uma rota, para cinco portos, na qual as cargas com os seguintes pares de origem-destino devem ser considerados na composição de carga em cada trecho:

- Trecho **A-B**: A-B; A-C; A-D; A-E; D-E; D-B; C-B; E-B.
- Trecho **B-C**: B-C; B-D; B-E; B-A; A-C; A-D; A-E.
- Trecho **C-E**: C-E; C-D; A-E; A-D; B-D; B-E; D-E.
- Trecho **E-D**: E-D; E-C; E-B; E-A; C-D; A-D; B-D;.
- Trecho **D-C**: D-C; D-B; D-A; D-E; E-C; E-A; E-B.
- Trecho **C-A**: C-A; C-B; D-A; D-B; E-A; E-B; B-A.

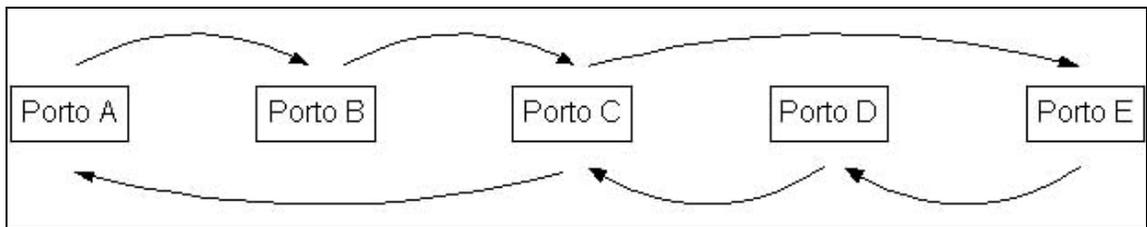


Figura 5.1- Exemplo da rota

Em suma, para o trecho entre o porto de índice i e o porto de índice j , podem existir cargas embarcadas no porto de índice i com destino aos portos de índice j e seus sucessores, cargas embarcadas em portos antecedentes ao porto de índice i com destino a portos de índice j e seus sucessores. A somatória de todos os pares origem-destino das cargas deverá ser menor que a capacidade do navio alocado na rota.

Cabe convencionar algumas terminologias que serão bastante utilizadas no decorrer da explicação da modelagem; adotar-se-ão os termos “porto de início da rota” e “porto de fim da rota” como sendo os portos localizados fisicamente nos extremos da

rota. Os portos de início e de fim estão vinculados ao sentido da viagem. Necessariamente, o ciclo da rota está dividido em duas partes, o qual convencionaremos como sendo o sentido crescente, as viagens de subida ou de ida, que ocorrem quando os portos visitados vão se afastando do porto de origem; e decrescente, o sentido inverso, quando os portos visitados vão se aproximando do porto de início. Em termos práticos e de aplicação do modelo, a geração das rotas respeitou a ordem física dos portos, sendo o sentido crescente quando as viagens são feitas rumo norte (*Northbound*) e sentido decrescente, quando as viagens são feitas rumo sul (*Southbound*).

O fator de ciclo das rotas permite que os portos sejam visitados em ambos os sentidos, ora no sentido crescente, ora no sentido decrescente ou até em ambos os sentidos. Tais diferenças resultam em parcelas de cargas distintas que poderão estar presentes na viagem e que dependem da seqüência dos demais portos visitados.

Para a discretização das parcelas, inicialmente, agrupou-se em três grupos de portos de acordo com a sua localização física em relação ao porto de saída do trecho considerado. Adotemos a notação de índice l como sendo o porto de saída da viagem que será estudada e este porto por si só representará o primeiro grupo. O segundo e terceiro grupos representarão os portos antecessores e sucessores a l , respectivamente. A figura 5.2 ilustra os três grupos de portos.

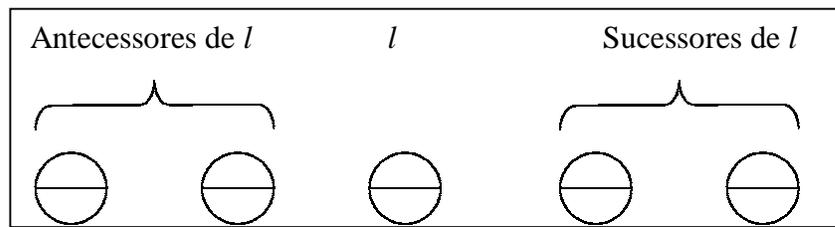


Figura 5.2. Representação dos Grupos de Portos

Na figura 5.2, as circunferências representam os portos, sendo cada uma delas dividida ao meio para representar em que sentido o porto é visitado, ou seja, quando a parte superior estiver preenchida, significa que o porto é visitado no sentido crescente e se preenchida na parte inferior, significa que é visitado no sentido decrescente.

Vale ressaltar que o conceito de portos extremos em uma rota cíclica deste trabalho se baseia em sua localização física e tal interpretação matemática será feita através dos dados de entrada, que respeitaram tal ordem.

Definidos os grupos de portos, pode-se enumerar nove possibilidades de carregamentos entre os grupos, são eles:

1. Origens no grupo de antecessores de l e destinos em portos do mesmo grupo;
2. Origens no grupo de antecessores de l e destinos no porto de saída l ;
3. Origens no grupo de antecessores de l e destinos em portos do grupo de sucessores de l ;
4. Origens no porto de saída l e destinos em portos do grupo de antecessores de l ;
5. Origens no porto de saída l e destino no porto do mesmo grupo;
6. Origens no porto de saída l e destinos em portos do grupo de sucessores de l ;

7. Origens no grupo de sucessores de l e destinos em portos do grupo de antecessores de l ;
8. Origens no grupo de sucessores de l e destinos no porto de saída l ;
9. Origens no grupo de sucessores de l e destinos em portos do mesmo grupo.

Dentre as possibilidades apresentadas acima, existem aquelas que jamais farão parte das somatórias, pois nesses casos, a carga é desembarcada no porto de saída l ou antes e, portanto, não estarão presentes na embarcação (casos 2, 7 e 8) ou mesmo o caso da origem e destino serem o mesmo porto (caso 5). Entretanto, quando os portos de origens e portos de destinos se encontram em um mesmo grupo de portos (casos 1 e 9), podem existir dois subgrupos que dependerão da ordem em que os portos de origens e destinos estiverem.

Tomemos como exemplo a rota apresentada na figura 5.1, onde existem seis trechos de viagens em uma rota e está apresentada na figura 5.3 da forma como será modelado.

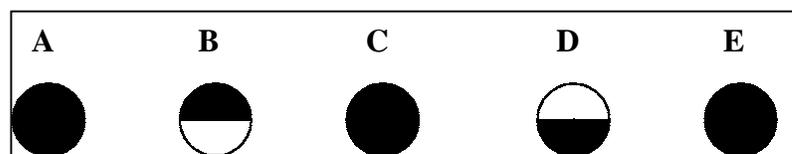


Figura 5.3. Representação da rota adotada como exemplo.

O primeiro trecho A-B representa uma viagem cujo porto de saída (A) está localizado em um dos extremos da rota. Nesse caso, o índice l receberá o valor 1 e não

existirão casos de portos antecessores. As cargas que podem estar presentes nesta viagem são referentes a:

- Casos de origem no porto de saída l e destinos em portos sucessores de l , ou caso 6 (A-B, A-C, A-D, A-E);
- Casos de origem em portos sucessores a l e destinos no mesmo grupo, ou caso 9, sendo portos de origens antecessores aos portos de destinos (D-E) e portos de origens sucessores aos portos de destinos (D-B,C-B,E-B).

O segundo trecho B-C representa uma viagem cujo porto de saída (B) está localizado logo após o primeiro porto (A) e é visitado apenas no sentido crescente. Nesse caso, o índice l receberá o valor 2. As cargas que podem estar presentes nesta viagem são referentes a:

- Casos de origem em portos antecessores a l (A) e destinos em portos sucessores de l , ou caso 3 (A-C, A-D, A-E);
- Casos de origem no porto de saída l (B) e destinos no porto antecessor de l (A), ou caso 4 (B-A);
- Casos de origem no porto de saída l (B) e destinos no porto sucessores de l , ou caso 6 (B-C, B-D, B-E).

O terceiro trecho C-E representa uma viagem cujo porto de saída (C) é visitado em ambos os sentidos. Tal fato reduz as possibilidades de carregamento, pois as cargas com destinos em portos antecessores a C deverão ser embarcadas no sentido correto, de

menor distância. O destino desta viagem será o porto do extremo superior (E). Nesse caso, o índice l receberá o valor 3. As cargas que podem estar presentes nesta viagem são referentes a:

- Casos de origem em portos antecedentes a l e destinos em portos sucessores de l , ou caso 3 (A-D, A-E, B-D, B-E);
- Casos de origem no porto de saída l (C) e destinos em portos sucessores de l (A), ou caso 6 (C-D, C-E);
- Casos de origem no porto sucessor de l e destinos no porto do mesmo grupo, ou caso 9 (D-E).

O quarto trecho E-D já é uma viagem que teve o sentido invertido. É importante ressaltar que os portos sucessores são os portos que poderão ser visitados no sentido vigente e antecedentes, os portos que eventualmente já teriam sido visitados. As características desta viagem se assemelham à da primeira (A-B) devido à simetria na rota cíclica. Nesse caso, o índice l receberá o valor 5, relativo ao índice do porto de saída (E). As cargas que podem estar presentes nesta viagem são referentes a:

- Casos de origem em portos sucessores a l e destinos em portos do mesmo grupo, ou caso 9 (A-D, C-D, B-D);
- Casos de origem no porto de saída l (E) e destinos em portos sucessores de l , ou caso 6 (E-A, E-B, E-C, E-D);

O quinto trecho D-C também apresenta características semelhantes à viagem simétrica (B-C). Nesse caso, o índice l receberá o valor 6. As cargas que podem estar presentes nesta viagem são referentes a:

- Casos de origem em portos antecedentes a l (E) e destinos em portos sucessores de l , ou caso 3 (E-A, E-B, E-C);
- Casos de origem no porto de saída l (D) e destinos no porto antecedente de l (E), ou caso 4 (D-E);
- Casos de origem no porto de saída l (D) e destinos no porto sucessores de l , ou caso 6 (D-A, D-B, D-C).

O sexto e último trecho C-A representa a viagem, cujo destino é a origem inicial da rota, ou seja, a última viagem da rota para completar o ciclo. A origem desta viagem é o porto C, que já tinha sido visitado no sentido crescente. Nesse caso, o índice l receberá o valor 7. As cargas que podem estar presentes nesta viagem são referentes a:

- Casos de origem em portos antecedentes a l e destinos em portos sucessores de l , ou caso 3 (D-A, D-B, E-A, E-B);
- Casos de origem no porto de saída l (C) e destinos em portos sucessores de l , ou caso 6 (C-A, C-B);
- Casos de origem no porto sucessor de l e destinos no porto do mesmo grupo, ou caso 9 (B-A).

Seguindo essa mesma metodologia, será apresentada em seguida, a formulação matemática para descrever cada uma das parcelas apresentadas, de uma forma mais genérica e matematicamente coerente.

A parametrização das escalas em uma rota, obtida a partir da tabela de rotas, é feita através do vetor $T(r,l)$, conforme apresentado na seção de apresentação das nomenclaturas, onde r identifica a rota e l o porto de saída da viagem. Este vetor recebe o valor “1” quando o porto é visitado e “0” em caso contrário.

Definir-se-ão alguns vetores auxiliares que permitirão a modelagem matemática dos limites inferiores e superiores, isto é, das origens e destinos de cada parcela presente na somatória que será descrita em seguida. A dimensão dos vetores varia de acordo com a quantidade de portos considerados. O primeiro vetor, VO, define a seqüência lógica de ordenação dos portos, variando de 1 a n no sentido crescente e, em seguida, de n até 1 no sentido decrescente dos portos, sendo n o número de portos. O segundo vetor auxiliar define o porto de origem do trecho em cada posição, isto é, a todos os trechos presentes na seqüência crescente será atribuído o valor um indicando que o trecho se refere a uma viagem de ida ou crescente. Aos trechos de índices maiores que n , serão atribuídos valores iguais a n , indicando que o trecho refere-se à viagem de volta ou decrescente. O terceiro e último vetor é similar ao anterior, diferenciando-se apenas pelo fato de representar o porto de destino, isto é, o final da viagem. Nesse caso, todos os trechos de ida ou crescente receberão o valor equivalente ao último porto n , e os trechos de volta ou decrescente receberão um valor equivalente a $[2*(n-1)]$. Em suma, os vetores auxiliares

permitem identificar e classificar os trechos de viagem quanto à origem, destino e sentido e, dessa forma, permite caracterizar a rota como um ciclo de viagens.

$$VO(l) \dots 1, 2, \dots, n-1, n, n-1, \dots, 2, 1. \text{ Com } [2*n - 1] \text{ elementos;} \quad (5)$$

$$VI(l) \dots \begin{cases} = 1 & [1 \dots (n-1)] ; \\ = n & [n \dots (2*n - 1)]; \end{cases} \quad (6)$$

$$VF(l) \begin{cases} = n & [1 \dots (n-1)] ; \\ = 2*n - 1 & [n + 1 \dots (2*n - 1)]. \end{cases} \quad (7)$$

Os vetores utilizados para o caso de 5 portos estão exemplificados abaixo.

$$VO(l) \dots [1 2 3 4 5 4 3 2 1] ;$$

$$VI(l) \dots [1 1 1 1 5 5 5 5] ;$$

$$VF(l) \dots [5 5 5 5 9 9 9 9] .$$

Tomando como exemplo a rota apresentada na figura 5.3, as designações dos índices l , bem como dos vetores $VO(l)$, $VI(l)$, $VF(l)$ serão da forma como está apresentada na figura 5.4.

	A	B	C	D	E
l :	1	2	3	4	5
$VO(l)$:	1	2	3	4	5
$VI(l)$:	1	1	1	1	1
$VF(l)$:	5	5	5	5	5
					
l :	9	8	7	6	5
$VO(l)$:	1	2	3	4	5
$VI(l)$:	5	5	5	5	5
$VF(l)$:	9	9	9	9	9

Figura 5.4. Exemplos das designações dos vetores.

As condições de existência das parcelas da restrição foram definidas de acordo com o sentido da escala no porto tanto para as origens quanto para os destinos. Eventualmente, uma das condições assumirá sempre valor 1 quando indiferente. Foram utilizados operadores lógicos na formulação matemática das condições de existência, que poderão ser interpretadas das seguintes formas:

Tabela 5.1. Operadores Lógicos Utilizados.

X	1	0	1	0
Y	1	1	0	0
X AND Y	1	0	0	0
X OR Y	1	1	1	0
NOT X	0	1	0	1

Tomemos um caso genérico de um trecho l em uma rota qualquer, em que devemos considerar todas as cargas que potencialmente poderão estar presentes. A equação de restrição será composta pelas seguintes parcelas:

- a) Cargas com origens em todos os portos antecedentes à l e destinos em portos visitados e antecessores aos portos de origem

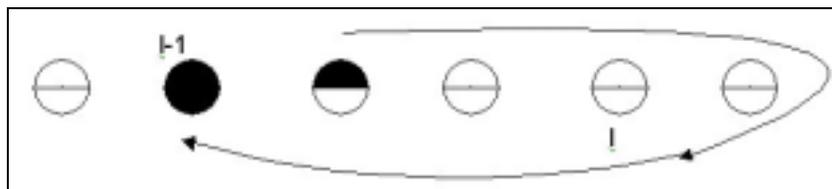


Figura 5.5. Esquema da parcela 8a da restrição de capacidade.

Esta parcela corresponde às cargas com origem em qualquer porto menor que o porto de saída l , que seja visitado apenas no sentido crescente e destino em qualquer porto menor do que o de origem, em ambos os sentidos (crescente e decrescente). Dessa forma, a formulação matemática desta parcela fica:

Origem: $\forall l_i < l$ no sentido crescente;

Destino: $\forall l_j < l_i$ em qualquer que seja o sentido.

$$\sum_{l_i=VI(l)}^{l-1} \sum_{l_j=l+1}^{l_i-1} M_{r,k,i=VO(l_i),j=VO(l_j)} * [T(r,l_i)] * [NOT[T(r,N-l_i)] * [T(r,l_j) or T(r,N-l_j)]] \quad (8a)$$

As parcelas entre colchetes estabelecem, respectivamente, a condição de que o porto de origem deverá ser visitado no sentido crescente, que o porto de origem não poderá ser visitado no sentido decrescente, e por último, que o porto de destino seja visitado, quaisquer que seja o sentido.

- b) Cargas com origem em portos antecedentes à l e destinos em portos visitados sucessores aos portos de origem e antecedentes à l

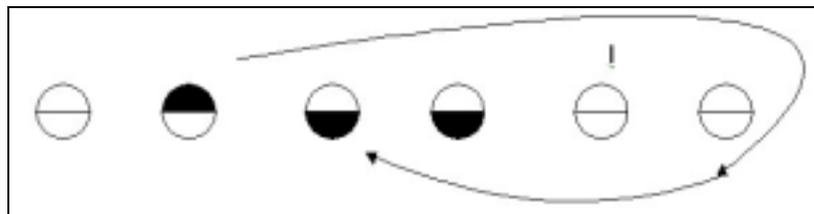


Figura 5.6. Esquema da parcela 8b da restrição de capacidade.

Esta parcela corresponde às cargas com origem em qualquer porto menor ou igual a $l-1$, podendo ser visitado em qualquer que seja o sentido, e destino em qualquer porto maior do que o de origem e menores que l , desde que sejam visitados apenas no sentido decrescente. Dessa forma, a formulação matemática desta parcela fica:

Origem: $\forall l_i \leq l-1$ em qualquer que seja o sentido;

Destino: $\forall l_j$ tal que $l-1 \leq l_j \leq l'$ apenas no sentido decrescente, sendo l' o porto localizado entre l_i e $l-1$

$$\sum_{l_i=VI(l)}^{l-1} \sum_{l_j=l_i+1}^{l-1} M_{r,k,i=VO(l_i),j=VO(l_j)} * [T(r,l_i) \text{ or } T(r,N-l_i)] * [NOT[T(r,l_j)] * [T(r,N-l_j)]]$$

(8b)

As parcelas entre colchetes estabelecem, respectivamente, a condição de que o porto de origem deverá ser visitado em qualquer que seja o sentido, que o porto de destino não poderá ser visitado no sentido crescente e, por último, que o porto de destino seja visitado no sentido decrescente.

- c) Cargas com origens em todos os portos visitados e antecessores à l e destinos em todos os portos visitados sucessores à l



Figura 5.7. Esquema da parcela 8c da restrição de capacidade.

Esta parcela corresponde às cargas com origem em qualquer porto anterior a l em ambos os sentidos e destino em qualquer porto posterior a l em ambos os sentidos (crescente e decrescente). As condições necessárias para essa parcela são apenas que os portos de origem e destino sejam visitados. Dessa forma, a formulação matemática desta parcela fica:

$$\sum_{l_i=VI(l)}^{l-1} \sum_{l_j=l+1}^{VF(l)} M_{r,k,i=VO(l_i),j=VO(l_j)} * [T(r,l_i)orT(r,N-l_i)] * [T(r,l_j)orT(r,N-l_j)] \quad (8c)$$

Origem: $\forall l_i < l$ em qualquer que seja o sentido;

Destino: $\forall l_j \geq l$ em qualquer que seja o sentido.

As parcelas entre colchetes estabelecem a condição de que o porto de origem poderá ser visitado tanto no sentido crescente quanto no decrescente e igualmente, que o porto de destino poderá ser visitado em qualquer que seja o sentido, respectivamente.

- d) Cargas com origem em l e destinos em todos os portos visitados antecessores à l

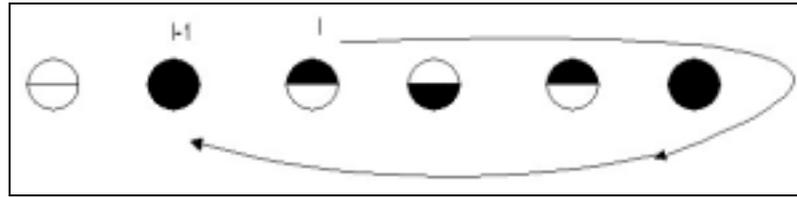


Figura 5.8. Esquema da parcela 8d da restrição de capacidade.

Esta parcela corresponde às cargas com origem em l quando visitados apenas no sentido crescente, e destino em qualquer porto menor ou igual a $l-1$ em ambos os sentidos (crescente e decrescente). Dessa forma, a formulação matemática desta parcela fica:

$$\sum_{l_j=VI(l)}^{l-1} M_{r,k,i=VO(l),j=VO(l_j)} * [T(r,l_j) \text{ or } T(r,N-l_j)] * [NOT(T(r,N-l))] \quad (8d)$$

Origem: l_i no sentido crescente, e não visitado no sentido decrescente;

Destino: $\forall l_j \leq l-1$ no sentido crescente e decrescente.

Os limites da somatória definem quais portos deverão ser considerados nesta parcela, no caso. As parcelas entre colchetes estabelecem a condição de que o porto de destino poderá ser tanto no sentido crescente quanto no decrescente e que o porto de origem não poderá ser visitado no sentido decrescente.

- e) Cargas com origem no porto de índice l e destinos em todos os portos visitados sucessores à l



Figura 5.9. Esquema da parcela 8e da restrição de capacidade.

Esta parcela corresponde às cargas com origem em l no sentido crescente e destino em qualquer porto maior ou igual a $l+1$ em ambos os sentidos (crescente e decrescente), isto é, todos os portos que se encontram posteriores a l , fazem parte desta parcela. Dessa forma, a formulação matemática desta parcela fica:

Origem: l_i – no sentido crescente;

Destino: $\forall l_j \geq l+1$ no sentido crescente e decrescente.

$$\sum_{l_j=l+1}^{VF(l)} M_{r,k,i=VO(l),j=VO(l_j)} * [T(r,l_j) \text{ or } T(r,N-l_j)] \quad (8e)$$

Os limites da somatória, inferior e superior, foram definidos apenas para os portos de destino, como sendo $l_j = l+1$ e $VF(l)$, respectivamente. Os portos de origem foram definidos como sendo $VO(l)$, que indica o porto de início de cada trecho, conforme descrito acima. A parcela entre colchetes estabelece a condição de que o porto de destino poderá ser tanto no sentido crescente quanto no decrescente.

- f) Cargas com origem em todos os portos sucessores a l e destinos em portos visitados sucessores aos portos de origem

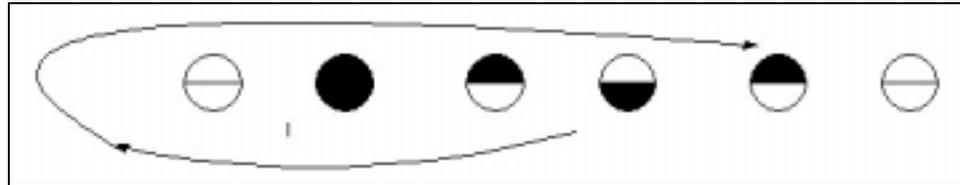


Figura 5.10. Esquema da parcela 8f da restrição de capacidade.

Esta parcela corresponde às cargas com origem em qualquer porto maior que l , devendo ser visitado apenas no sentido decrescente, e destino em qualquer porto maior do que o de origem em qualquer que seja o sentido. Dessa forma, a formulação matemática desta parcela fica:

$$\sum_{l_i=l+1}^{VF(l)} \sum_{l_j=l_i+1}^{VF(l)} M_{r,k,i=VO(l_i),j=VO(l_j)} * [T(r, N - l_i)] * [NOT[T(r, l_i)]] * [T(r, l_j) or T(r, N - l_j)]$$

(8f)

Origem: $\forall l_i \geq l+1$ apenas no sentido decrescente;

Destino: $\forall l_j \geq l_i$ em qualquer que seja o sentido.

As parcelas entre colchetes estabelecem, respectivamente, a condição de que o porto de origem deverá ser visitado no sentido crescente, que o porto de origem não poderá ser visitado no sentido decrescente e, por último, que o porto de destino seja visitado em qualquer que seja o sentido.

- g) Cargas com origem em portos sucessores a l e destinos em portos visitados sucessores à l e antecessores à origem.

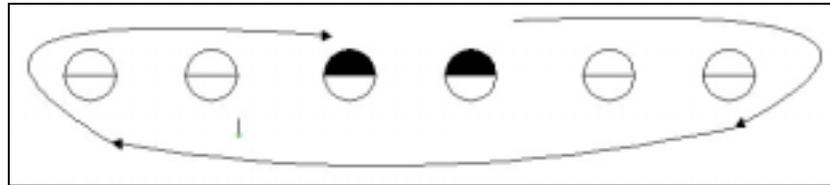


Figura 5.11. Esquema da parcela 8g da restrição de capacidade.

Esta parcela corresponde às cargas com origem em qualquer porto maior que $l+1$, podendo ser visitado em qualquer que seja o sentido e destino em qualquer porto menor do que o de origem, desde que sejam visitados apenas no sentido crescente. Dessa forma, a formulação matemática desta parcela fica:

$$\sum_{l_i=l+1}^{VF(l)} \sum_{l_j=l+1}^{l_i-1} M_{r,k,i=VO(l_i),j=VO(l_j)} * [T(r,l_i) \text{ or } T(r,N-l_i)] * [T(r,l_j)] * [NOT[T(r,N-l_j)]] \quad (8g)$$

Origem: $\forall l_i \geq l+1$ em qualquer que seja o sentido;

Destino: $\forall l_j$ tal que $l+1 \leq l_j \leq l_i$, apenas no sentido crescente.

As parcelas entre colchetes estabelecem, respectivamente, a condição de que o porto de origem deverá ser visitado qualquer que seja o sentido, que o porto de destino seja visitado no sentido crescente e, por último, que o porto de destino não poderá ser visitado no sentido decrescente.

A expressão final da restrição de capacidade do navio por trecho será a somatória de todas as sete parcelas descritas anteriormente, como se pode ver abaixo.

$$\sum_{l_i=VI(l)}^{l-1} \sum_{l_j=l+1}^{l_i-1} M_{r,k,i=VO(l_i),j=VO(l_j)} * [T(r,l_i)] * [NOT[T(r,N-l_i)]] * [T(r,l_j) or T(R,N-l_j)] + \quad (8a)$$

$$\sum_{l_i=VI(l)}^{l-1} \sum_{l_j=l_i+1}^{l_i-1} M_{r,k,i=VO(l_i),j=VO(l_j)} * [T(r,l_i) or T(r,N-l_i)] * [NOT[T(r,N-l_j)]] * [T(r,l_j)] + \quad (8b)$$

$$\sum_{l_i=VI(l)}^{l-1} \sum_{l_j=l+1}^{VF(l)} M_{r,k,i=VO(l_i),j=VO(l_j)} * [T(r,l_i) or T(R,N-l_i)] * [T(r,l_j) or T(R,N-l_j)] + \quad (8c)$$

$$\sum_{l_j=VI(l)}^{l-1} M_{r,k,i=VO(l),j=VO(l_j)} * [T(r,l_j) or T(R,N-l_j)] * [NOT(T(r,N-l))] + \quad (8d)$$

$$\sum_{l_j=l+1}^{VF(l)} M_{r,k,i=VO(l),j=VO(l_j)} * [T(r,l_j) or T(R,N-l_j)] + \quad (8e)$$

$$\sum_{l_i=l+1}^{VF(l)} \sum_{l_j=l_i+1}^{VF(l)} M_{r,k,i=VO(l_i),j=VO(l_j)} * [T(r,N-l_i)] * [NOT[T(r,l_i)]] * [T(r,l_j) or T(r,N-l_j)] \quad (8f)$$

$$\sum_{l_i=l+1}^{VF(l)} \sum_{l_j=l+1}^{l_i-1} M_{r,k,i=VO(l_i),j=VO(l_j)} * [T(r,l_i) or T(r,N-l_i)] * [T(r,l_j)] * [NOT[T(r,N-l_j)]] \quad (8g)$$

$$\leq Cap_k \quad (8)$$

5.5.5. Restrições de não-negatividade

Essas restrições garantem a não negatividade das variáveis de decisão.

$$M_{r,k,i,j} \geq 0. \quad (9)$$

5.5.6. Restrições de variáveis binárias

Essas restrições atribuem valores binários às variáveis de decisão.

$$X_{r,k} = \text{binária}. \quad (10)$$

6. Implementação Computacional e Resultados

O modelo foi desenvolvido em programação linear mista e a resolução e/ou implementação computacional em linguagem matemática ou programação matemática permite a utilização de diversos métodos para resolvê-lo. Os softwares existentes diferem entre si das facilidades de entrada e saída dos dados, da linguagem de programação utilizada e das interfaces com o usuário. Os métodos algorítmicos (ou *solvers*) utilizados diferenciam-se quanto ao tipo de modelagem. Por exemplo, para modelos inteiros, lineares e mistos, os *solvers* mais indicados são o CPLEX e o OSL, para modelos não-lineares, recomenda-se o uso do ZOOM ou MINOS.

Existem dois grandes pacotes computacionais no mercado indicados para resoluções de modelos matemáticos em programação linear, inteira e mista. O primeiro é o GAMS, sistema geral de modelagem algébrica, versão 2.3 (disponível no Depto. de Engenharia Naval e Oceânica da USP) cujos algoritmos disponíveis para esta modelagem são o OSL, versão 2.1 e o CPLEX, versão 3.0.

O modelo em GAMS v.2.3 é elaborado em qualquer editor de texto, na linguagem, formatação e padrões convenientes e pode ser executado a partir do sistema operacional em DOS, que através do comando de execução realiza a compilação e em seguida a busca ou execução propriamente dita do programa. Primeiramente, o modelo é carregado e compilado sendo que nessa fase, os eventuais erros e inconsistências do modelo são verificados. O modelo desenvolvido neste presente trabalho foi estruturado de tal forma a ler outros arquivos externos, que consistem nas tabelas de dados de

entrada dos valores de seqüência de portos, custos das rotas por tipo de navio, número de viagens redondas realizadas por cada embarcação em cada rota e, por último, a demanda de carga entre os portos envolvidos no modelo.

Vale lembrar que qualquer alteração efetuada no modelo, deverá ser gravada em um arquivo separado, não permitindo alteração de parâmetros externamente, sem que seja efetuada a modificação adequada nos arquivos. Por exemplo, para criar cenários com quantidade de portos ou quantidade de embarcações diferentes, deve-se criar um modelo exclusivo para cada caso.

O modelo desenvolvido permite ao usuário variar algumas condições, como quantidade de portos e, conseqüentemente, o número de rotas, quantidade, velocidade, capacidade e custos das embarcações, demandas de cargas. Enfim, todos os dados de entrada descritos nos capítulos anteriores são parâmetros que poderão ser modificados, testados e avaliados pelo usuário. Dessa forma, serão apresentados a seguir alguns casos testados e avaliados para posterior análise dos resultados.

6.1. *Caso 1 – Quatro portos e dois navios*

Tomemos como exemplo um cenário fictício com quatro portos e duas embarcações. Este cenário conta com vinte e oito tipos distintos de rotas que o modelo se incumbirá de alocar às embarcações. Desta lista de rotas possíveis, existe uma cujos valores são nulos para permitir que o modelo não aloque nenhuma rota à embarcação no caso de apenas uma delas ser suficiente para atender aos requisitos modelados. Os dados

de entrada referentes à tabela de rotas, custos das rotas, quantidade de viagens e demandas, são apresentados no anexo A.

O modelo executado com estes dados gerou o resultado ótimo instantaneamente, isto é, a solução ótima é atingida com relativa rapidez e facilidade, comprovando que, para modelos de pequeno porte, o modelo satisfaz plenamente os objetivos almejados. A grande facilidade de se encontrar a solução ótima se deve ao fato de ser um modelo bastante reduzido, com apenas vinte e oito rotas e dois navios.

Foram executados alguns cenários com o objetivo de validar e verificar a sensibilidade e impacto das alterações de alguns dos parâmetros de entrada. Primeiramente, com o objetivo de verificar o aproveitamento da frota disponibilizada, foram executados cenários variando a quantidade de carga que deveria ser movimentada, ou seja, a demanda requerida. Em seguida, foram testados cenários variando a capacidade das embarcações, fixando-se os valores de demanda, com o objetivo de apresentar a configuração de frota mais conveniente para aquela condição de demanda. Nesse caso em que a frota é composta por apenas dois navios, é possível realizar análises de dimensionamento das capacidades dos navios. Para um valor fixo de demanda, com a variação do porte da embarcação, ou mesmo a alteração de classe, pode-se ter resultados totalmente diferentes dos originais.

Para as condições apresentadas acima, o modelo atingiu a solução ótima com os seguintes resultados:

Tabela 6.1. Resultado para o caso de 4 portos

	Custo Total	R\$ 933.150,00
	Intervalo Médio	4 dias
Navio K_1	Capacidade (TEU)	670
	Rota:	R_2
	Ocupação	5%
Navio K_2	Capacidade (TEU)	900
	Rota:	R_23
	Ocupação	70%

A tabela 6.1 apresenta a alocação de rotas para os navios e a ocupação média resultante de cada navio, além do valor de custo total, que é a figura de mérito do modelo e a frequência média de atendimento (calculado das rotas), na verdade, o intervalo médio entre escalas em um porto, calculado segundo n processos de chegada do tipo D/D/1, ou seja, taxas de chegada e atendimento determinísticos e um ponto de atendimento. Dentre as vinte e oito rotas candidatas inseridas nos dados de entrada do modelo, a solução ótima foi atingida com a seleção das rotas de número 2 e número 23, para os navios K_1 e K_2 respectivamente. As rotas selecionadas são formadas pelas seqüências de portos apresentadas na tabela 6.2, abaixo.

Tabela 6.2. Seqüência de portos das rotas selecionadas

R_2	RIG	SSZ	0	0	0	SSZ	RIG
R_23	RIG	0	FOR	MAO	FOR	SSZ	RIG



Figura 6.1. Esquema das rotas selecionadas para o caso de 4 portos.

A tabela 6.2 e a figura 6.1 mostram que a rota R_2, selecionada para o navio K_1, realiza viagens visitando apenas os portos de Rio Grande (RIG) e Santos (SSZ). Enquanto que a rota R_23, selecionada para o navio K_2, visita todos os portos, iniciando a viagem a partir do porto de Rio Grande (RIG), em seguida, visita o porto de Fortaleza (FOR) e por último Manaus (MAO), encerrando a viagem de subida. De Manaus, a embarcação segue rumo ao seu porto de origem, Rio Grande, rumo sul, visitando todos os portos intermediários (FOR e SSZ).

A rota R_2 apresentou as seguintes características de viagem:

Tabela 6.3. Características da rota R_2

Trecho	Origem	Destino	Carga (TEUs)	Ocupação
L_1	RIG	SSZ	11,82	2%
L_6	SSZ	RIG	58,82	9%

A tabela 6.3 apresenta a ocupação do navio K_1 em cada trecho de viagem realizado. A nomenclatura de trecho é a mesma apresentada no capítulo referente à

modelagem, sendo L_1 e L_6 os trechos cujas origens foram os portos 1 (RIG, no sentido normal) e 6 (SSZ, no sentido oposto). A partir dos resultados de ocupação apresentados, é possível concluir de antemão que a embarcação K_1 foi alocada apenas para cobrir uma parcela marginal da embarcação K_2. Certamente, por esses dados, é possível concluir que existe capacidade ociosa para cumprimento desta demanda.

Analogamente, a rota R_23 apresentou os seguintes resultados:

Tabela 6.4. Características da rota R_23

Trecho	Origem	Destino	Carga (TEUs)	Ocupação	Composição
L_1	RIG	FOR	889,91	99%	1,2,3,4
L_3	FOR	MAO	661,55	74%	2,4,7
L_4	MAO	FOR	331,82	37%	8,9,10
L_5	FOR	SSZ	365,05	41%	5,6,8,9
L_6	SSZ	RIG	607,23	67%	3,4,5,8

A tabela 6.4 mostra a característica operacional de cada trecho da viagem realizada pelo navio K_2 na rota 23. A partir de tais dados, pode-se verificar um excelente aproveitamento do navio para as viagens de rumo norte (L_1 e L_3) e uma performance regular para as demais, com exceção do trecho L_4. Esse problema ocorre exatamente desta forma na prática. Isto é, existe um desbalanceamento entre os fluxos norte e sul. Os navios fazem a viagem do sul do país para o norte carregados e no sentido inverso fazem viagens com ociosidade.

É importante ressaltar que em ambas as tabelas que contém as características de carregamento, foram apresentados os valores brutos de carga transportadas entre dois portos. Tais valores não são inteiros devido a modelagem, que considerou a variável de

movimentação como sendo real. Essa premissa não afetou a otimalidade dos resultados, pois em todos os casos, foram verificados valores bem superiores a 1 TEU.

Para melhor entendimento dos resultados acima, é importante verificar a composição de cargas do navio em cada trecho. A última coluna da tabela 6.4 relaciona os arcos presentes no trecho, que será apresentado na tabela 6.5, abaixo.

Tabela 6.5. Distribuição do fluxo de cargas na rota R_23

Arcos	Origem	Destino	Ocupação
1	RIG	FOR	29%
2	RIG	MAO	13%
3	SSZ	FOR	16%
4	SSZ	MAO	40%
5	FOR	RIG	3%
6	FOR	SSZ	5%
7	FOR	MAO	20%
8	MAO	RIG	8%
9	MAO	SSZ	25%
10	MAO	FOR	4%

A tabela 6.5 apresenta um resultado operacional de como deverá ser feito o carregamento do navio em cada trecho. Por exemplo, quando o navio atracar em Rio Grande (RIG), seu carregamento será composto de cargas que irão para Fortaleza, preenchendo 29% da capacidade do navio e cargas que irão para Manaus, com 13 % da capacidade do navio. Um segundo exemplo, para origem no porto de Manaus (MAO), o navio deverá ser carregado com cargas para RIG (8%), SSZ (25%) e FOR (4%).

Os valores de ocupação apresentados na tabela 6.4 são resultados da somatória de todas as cargas presentes em cada trecho. Nesta tabela são apresentadas na última coluna, as composições de cargas em cada trecho. Isto é, para o trecho L_1, cuja origem

é RIG e destino FOR, o navio estará carregado com cargas com origem em RIG e destinos em FOR e MAO, além de cargas com origem em SSZ e destinos em FOR e MAO. Dessa forma, o modelo auxilia a formação de carga do navio, de modo a respeitar a sua capacidade e cumprir o atendimento da demanda ao menor custo.

6.1.1. Análise de demanda

Dadas as condições normais de operação, foi possível verificar que existe uma capacidade ociosa da frota para esse nível de demanda. Dessa forma, foram rodados alguns cenários variando-se a demanda para uma frota fixa, isto é, avaliou-se qual o nível de movimentação condizente com a frota disponibilizada que apresente resultados satisfatórios em termos de ocupação média, custos totais, frequência e quantidade de navios alocados.

A matriz de demanda para esse caso foi elaborada seguindo os padrões e proporções de carga levantada segundo os dados da HSAC, portanto, respeitando-se os dados reais de uma operação já realizada. Os tamanhos dos navios para geração deste conjunto de cenários são os mesmos do modelo padrão, de 670 e 900 TEUs, que são os valores dos navios Aliança Amazônia e Flamengo, respectivamente, que atualmente operam nesse segmento.

Foram rodados cenários variando-se a demanda com um intervalo de dez por cento, partindo-se de inicialmente de trinta por cento da demanda inicial ($0,3*D$) até o valor limite para uma solução ótima e viável que foi de setenta por cento a mais da demanda ($1,7*D$).

Os resultados desta análise são apresentados na tabela 6.6, abaixo.

Tabela 6.6. Resultados da análise de demanda

Demanda	Custo Total (R\$)	Ocupação Média	Intervalo Médio (dias)	Qtde. Navios	Navios
0,2D	659426	30%	17,1	1	K_1
0,3D	659426	44%	17,1	1	K_1
0,4D	659426	59%	17,1	1	K_1
0,5D	659426	74%	17,1	1	K_1
0,6D	663852	59%	17,1	1	K_1
0,7D	759524	74%	16,4	1	K_2
0,8D	760933	56%	16,4	1	K_2
0,9D	760933	63%	16,4	1	K_2
1,0D	933150	39%	4,0	2	K_1 / K_2
1,1D	1094385	43%	6,0	2	K_1 / K_2
1,2D	1176120	54%	6,5	2	K_1 / K_2
1,3D	1176120	59%	6,5	2	K_1 / K_2
1,4D	1297264	53%	7,8	2	K_1 / K_2
1,5D	1297264	56%	7,8	2	K_1 / K_2
1,6D	1323971	64%	8,0	2	K_1 / K_2
1,7D	1323971	66%	8,0	2	K_1 / K_2

A partir da tabela 6.6, é possível identificar os cenários atrativos e/ou convenientes para a operação, através da análise das relações existentes entre os índices apresentados. O custo total da operação é crescente de acordo com o aumento de demanda, entretanto, é possível verificar que para alguns patamares, esse valor não se altera, pois para um mesmo conjunto de rotas alocadas, a demanda requerida pode ser atendida, aumentando a ocupação da frota. A ocupação foi calculada como sendo uma média entre as duas embarcações, quando ambas são utilizadas; dessa forma, tais valores estão intimamente relacionados com a capacidade total dos navios utilizada. O intervalo de escalas também depende muito do número de embarcações utilizado.

Os gráficos das figuras 6.2 abaixo mostram a relação entre o custo total da operação e a ocupação média da frota, e a relação entre o intervalo de escalas e a quantidade de navios para diversos valores de demanda.

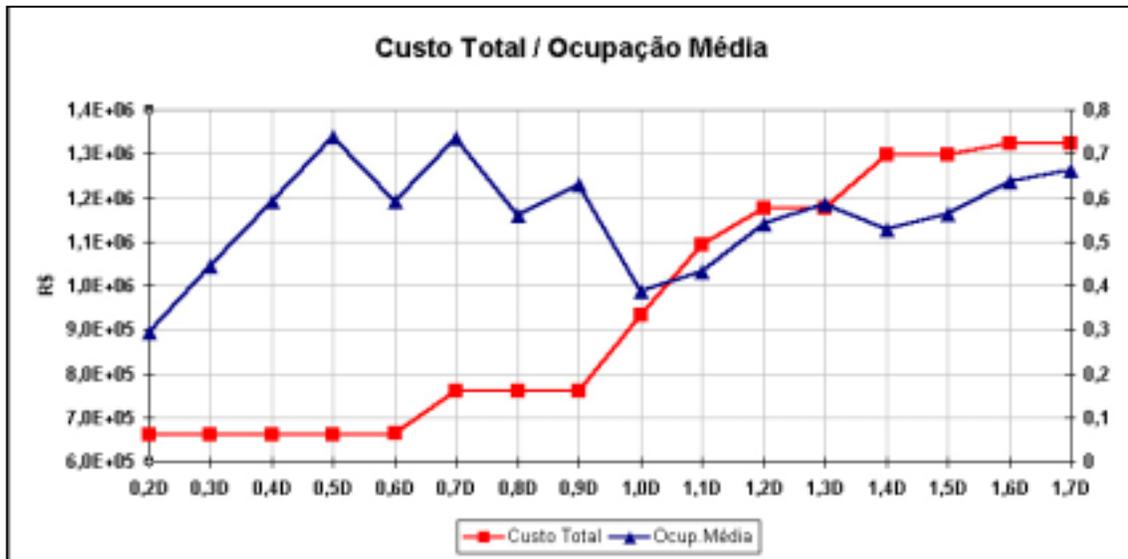


Figura 6.2. Gráfico de Custo / Ocupação

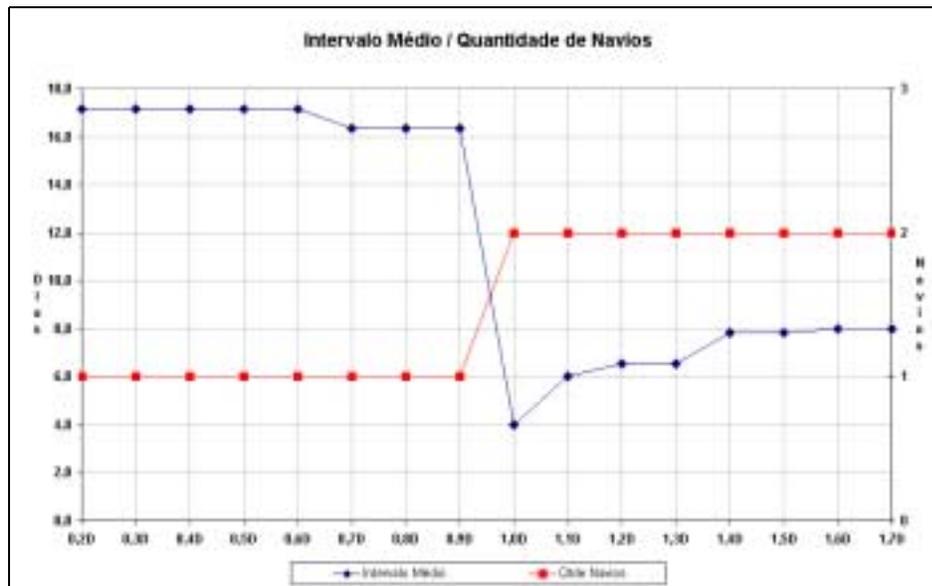


Figura 6.3. Gráfico de Intervalo de Escalas / Quantidade de Navios

A figura 6.2 mostra que para valores de demanda de 20 % a 50% do valor padrão, o custo total praticamente se mantém, apresentando aumentos gradativos na ocupação da frota. Para o valor de 60%, o valor de custo praticamente se mantém, mas a ocupação tem uma ligeira queda, igualando ao patamar de 40 %. Esse fenômeno ocorre devido à mudança de rota escolhida. Isto é, a rota selecionada para o primeiro caso comporta uma capacidade de movimentação equivalente a no máximo o valor de 50%; para um valor maior que esse, esta mesma rota já não cumpre a restrição de demanda e portanto o modelo selecionou uma outra rota de custo próximo, que fez alterar a seqüência de visitas nos portos e conseqüentemente alteração na ocupação. Nessa mesma figura, é importante observar o comportamento da curva de ocupação entre os pontos correspondentes a 0,9 e 1 da demanda. Existe uma queda brusca que é explicado pelo aumento repentino da capacidade de transporte, isto é, a partir deste valor de demanda, só é possível atender os requisitos com duas embarcações. A introdução de mais uma embarcação no sistema implica em aumento de disponibilidade com conseqüente queda na ocupação e aumento do custo. Com o aumento gradativo da demanda, esse espaço ou disponibilidade será preenchida até que o sistema requeira uma outra embarcação. Esse fato ocorre por volta de 1,7 vezes a demanda padrão.

A figura 6.3 apresenta a mesma análise com o intuito de avaliar o nível de serviço associado a cada um dos cenários. Pode-se verificar que a introdução de uma embarcação no sistema causa grandes impactos, tanto no custo global, ocupação, mas principalmente no intervalo de atendimento nos portos. Naturalmente, uma operação

utilizando apenas uma embarcação tende a apresentar um custo baixo, um ótimo aproveitamento, mas uma frequência de atendimento péssima. O gráfico mostra que para o patamar de até 0,9 vezes a demanda, é possível efetuar o serviço com apenas um navio a um intervalo de escalas de aproximadamente 17 dias. Para valores de demanda maiores, é necessária a introdução de uma embarcação adicional, que traz benefícios no atendimento através da redução do intervalo aproximado para 4 a 8 dias.

Nestas análises, a frota disponibilizada era de dois navios, um de 670 TEUs e uma outra de 900 TEUs. O modelo desenvolvido selecionou a rota conveniente para cada valor de demanda requerido e portanto nas análises anteriores percebeu-se que a característica da frota influi muito no custo, aproveitamento da frota e nível de serviço. Na análise anterior foi levado em consideração apenas a quantidade de embarcações alocadas. A figura 6.4 mostra a relação entre o aumento relativo do custo total e a capacidade máxima utilizada pela frota.

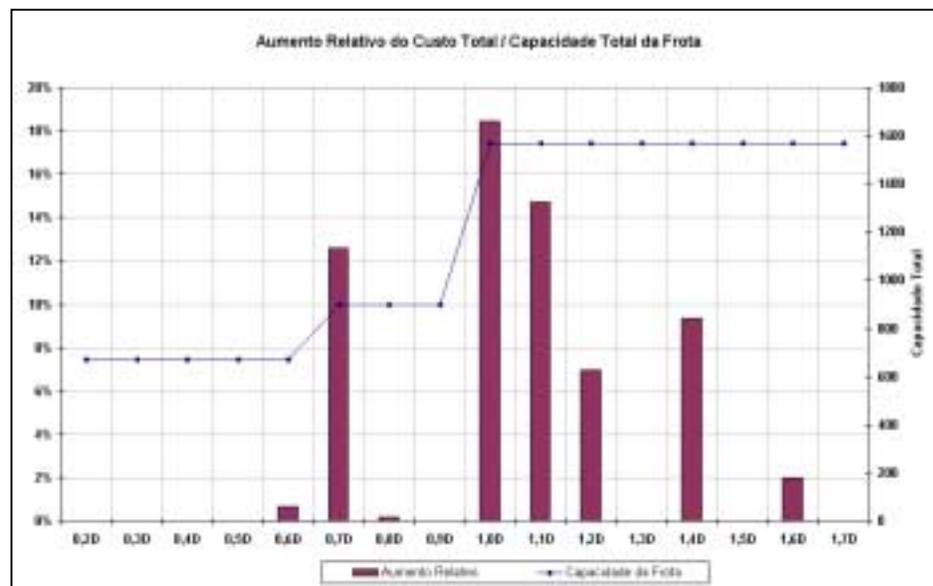


Figura 6.4. Gráfico do Aumento relativo dos Custos / Capacidade Total da Frota

A figura 6.4 mostra um gráfico em que as barras representam o aumento relativo no custo total em relação ao dado anterior e a curva representa a somatória das capacidades dos navios utilizados em cada cenário. Foi verificado que até o valor correspondente a 0,9 vezes a demanda, utiliza-se apenas um navio, entretanto para o valor superior a 0,6 vezes a demanda, a embarcação é trocada pela de maior capacidade. Os outros aumentos relativos mais significantes que ocorrem após a utilização de duas embarcações ocorrem devido a alteração de rotas alocadas.

Em suma, é possível concluir que para os recursos disponibilizados nessa operação poder-se-ia atender uma demanda de até 70 % maior do que a da utilizada no modelo padrão. Entretanto deve-se levar em consideração que um bom aproveitamento da frota ou bons níveis de ocupação implicam em queda do nível de serviço no atendimento aos portos. A decisão de faixas de operação interessantes, viáveis e rentáveis dependerá das condições requeridas e desejadas pelo armador.

6.1.2. *Análise de Capacidade de cada Navio*

Para o caso de quatro portos e dois navios, é possível realizar a análise de dimensionamento da frota no sentido de definir as melhores combinações de classes de navios necessárias para atendimento dos requisitos da operação. Para um determinado nível de demanda, admitida como sendo a matriz de demanda padrão, verificou-se o comportamento do sistema variando-se o porte, a capacidade dos navios que poderão ser alocadas à operação de cabotagem.

Nas análises apresentadas na seção anterior foram utilizadas embarcações que operam atualmente na cabotagem; entretanto, foi constatado que para o nível de demanda trabalhado, a frota está superdimensionada. Com o objetivo de reduzir custos e manter o mesmo nível de serviço ou até aperfeiçoar a operação, foram estudadas outras alternativas de composição de frota para dar suporte ao armador na seleção dos navios destinados à operação. Na prática, quando se busca uma embarcação para uma nova linha de operação no transporte marítimo, o armador deve dispor de informações relativas a essa operação e, principalmente, deve especificar a classe da embarcação desejada. Para tal necessidade, o modelo permite testar cenários introduzindo-se características distintas da frota alterando capacidades, velocidades e custos.

Para essa análise foram testadas as seguintes configurações de frota, onde os dois valores correspondem à capacidade nominal dos navios K_1 e K_2 em TEUs, respectivamente:

Tabela 6.7. Configurações das Frotas Testadas

500_500	600_600	700_700	800_1000
500_600	600_700	700_800	900_900
500_700	600_800	700_900	400_500
500_800	600_900	700_1000	
500_900	600_1000		
500_1000			
500_1200			

Analogamente às análises apresentadas na seção anterior, foram geradas as tabelas de custo, ocupação média, intervalo de atendimentos, quantidade de navios alocados e rotas alocadas para cada uma das alternativas. Os resultados estão apresentados na tabela 6.8 abaixo.

Tabela 6.8. Resultados da Análise de Dimensionamento da Frota.

Frota	Custo Total (R\$)	Ocupação Média	Intervalo Médio (dias)	Qtde. Navios	Navios	Capacidade Máxima Disponível
500_1000	760.933	63%	16,4	1	K_2	1000
600_1000	760.933	63%	16,4	1	K_2	1000
700_1000	760.933	63%	16,4	1	K_2	1000
800_1000	760.933	63%	16,4	1	K_2	1000
500_1200	760.933	52%	16,4	1	K_2	1200
900_900	933.150	34%	4,0	2	K_1 / K_2	1800
700_900	933.150	38%	4,0	2	K_1 / K_2	1600
600_900	933.150	40%	4,0	2	K_1 / K_2	1500
500_900	933.150	43%	4,0	2	K_1 / K_2	1400
700_800	1.094.385	41%	6,0	2	K_1 / K_2	1500
600_800	1.094.385	44%	6,0	2	K_1 / K_2	1400
500_800	1.094.385	47%	6,0	2	K_1 / K_2	1300
700_700	1.137.670	52%	6,4	2	K_1 / K_2	1400
600_700	1.176.120	54%	6,5	2	K_1 / K_2	1300
500_700	1.176.120	57%	6,5	2	K_1 / K_2	1200
600_600	1.285.352	49%	7,7	2	K_1 / K_2	1200
500_600	1.297.264	54%	7,8	2	K_1 / K_2	1100
500_500	1.315.380	56%	7,8	2	K_1 / K_2	1000
400_500	1.325.960	64%	7,8	2	K_1 / K_2	900

A tabela 6.8 mostra que o dimensionamento da frota é bastante sensível aos valores de demanda requeridos. Para um mesmo valor de capacidade disponibilizada, é necessário distribuí-la convenientemente entre os dois navios de acordo com o fluxo de carga necessários para o atendimento da demanda. Vale ressaltar que o modelo foi elaborado de forma que, se o fluxo de cargas em um determinado trecho de viagem exceder a capacidade do navio, essa alocação é considerada inviável e, conseqüentemente, descartada. Dessa forma, é possível perceber que, quando o transporte requerer duas embarcações, deve-se procurar manter o fluxo balanceado entre os navios.

As figuras 6.5, 6.6 e 6.7 abaixo ilustram claramente esse fato.

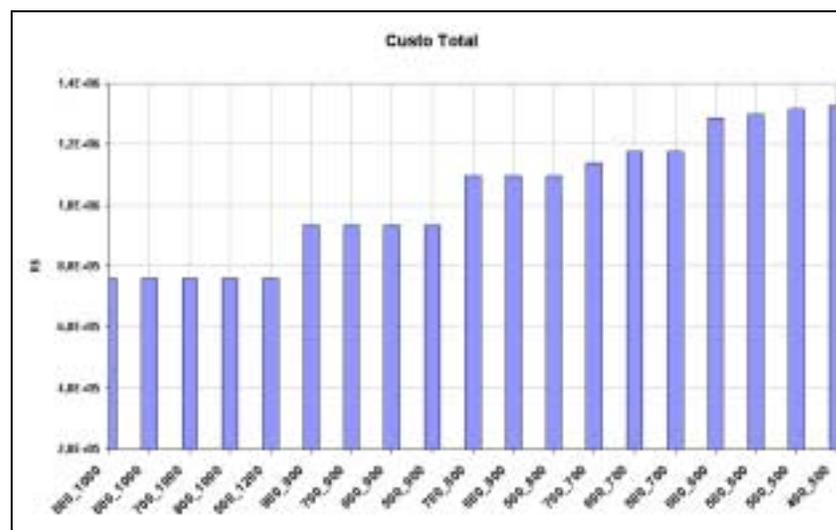


Figura 6.5. Custos Totais no Dimensionamento da Frota.

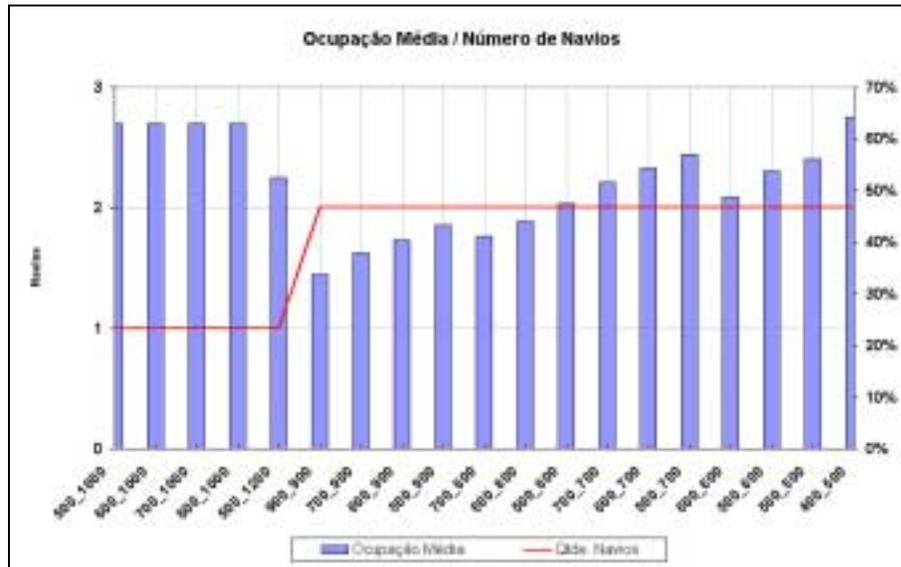


Figura 6.6. Ocupação Média / Quantidade de Navios alocados.



Figura 6.7. Intervalos Médios de Atendimento nos Portos

A partir das figuras 6.5 e 6.6, pode-se constatar comportamentos de custos e ocupações médias similares às apresentadas na seção anterior; existe uma diferença muito significativos no número de navios utilizados. Mas, nesta análise, é possível efetuar um estudo mais profundo na utilização e aproveitamento da frota. Por exemplo,

tomemos o último caso apresentado, utilizando um navio de 400 TEUs e o segundo, de 500 TEUs. Apesar de estar utilizando dois navios de pequeno porte, os custos são os mais elevados, a ocupação média é baixa e os intervalos de atendimento são os melhores. Tais fatos podem ser explicados ao serem analisadas as rotas a que os navios foram alocados, conforme tabela 6.9 e figura 6.8.

Tabela 6.9. Seqüência de Portos em Cada Rota Alocada.

R_12	0	SSZ	FOR	MAO	FOR	SSZ	0
R_23	RIG	0	FOR	MAO	FOR	SSZ	RIG

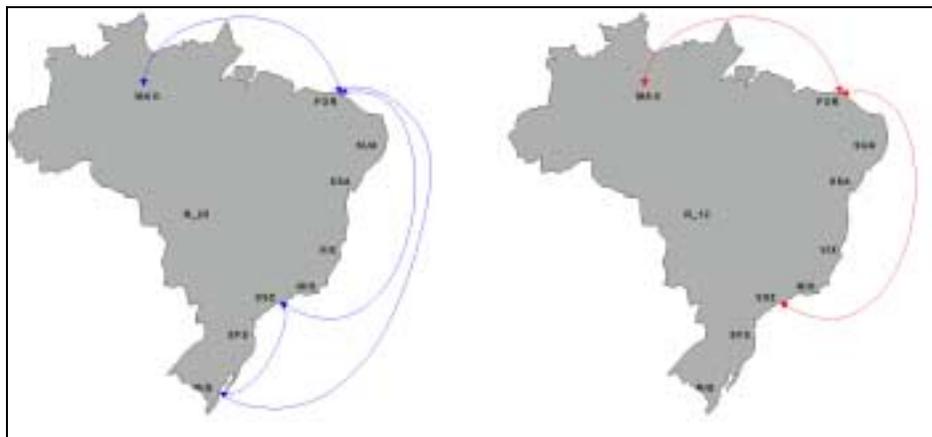


Figura 6.8. Itinerários de cada embarcação do caso de navios de 400 e 500 TEUs

Para esse caso em particular, foram selecionadas rotas que efetuam muitas escalas ao longo da viagem, isto é, a rota R_12 visita todos os portos com exceção de Rio Grande (RIG) nos dois sentidos e também a rota R_23 visita todos os portos nos dois sentidos, com exceção apenas para Santos (SSZ) na subida. No mapa, vale lembrar que, nesse caso, não estão sendo considerados todos os portos apresentados.

Portanto, o elevado valor para o custo se deve, entre outros, a um alto custo portuário, pois os números de atracções nos portos em uma rota representam uma parcela no custo global da rota. Por outro lado, a elevada quantidade de escalas reduz significativamente os intervalos de atendimento nos portos e, conseqüentemente, a ocupação do navio.

Percebe-se que, para esse caso, um navio da classe de 1.000 TEUs é capaz de cumprir plenamente os requisitos de demanda, ao menor custo. Na hipótese de se adotar duas embarcações, as configurações mais favoráveis tendem a ser de navios de portes semelhantes, acima de 600 TEUs, procurando sempre balancear os fluxos de cargas.

Analogamente à análise apresentada anteriormente, cada um dos cenários apresentados possui sua peculiaridade com vantagens e desvantagens que devem ser ponderadas e priorizadas conforme a necessidade do contexto em que se pretende operar a cabotagem. Em suma, é possível verificar a versatilidade do modelo desenvolvido, permitindo diversas outras análises que serão comentadas nas seções seguintes.

6.2. *Caso 2 – Cinco portos e cinco navios*

O acréscimo de um porto implica em um acréscimo do número de rotas viáveis para 114 possibilidades, conforme apresentado no capítulo de preparação dos dados de entrada. Naturalmente, a eficiência em termos de recursos utilizados e tempo dispendido também muda nessa mesma proporção. Devido a dificuldades computacionais encontradas, introduziu-se uma restrição operacional para os casos que serão apresentados a seguir.

A restrição considerada refere-se a uma distância mínima entre dois portos, estipulada pelo armador. Por questões mercadológicas, um percurso menor que 600 milhas náuticas realizada pelo modal marítimo é inviabilizada pela competitividade com o modal rodoviário. Os custos e o tempo de viagem são os fatores preponderantes na opção pelo modal rodoviário para viagens menores que 600 milhas náuticas. Dessa forma, foram eliminadas do banco de dados de entrada do modelo as rotas que continham trechos com percursos menores que 600 milhas náuticas. Em termos práticos, com a introdução do porto de Suape no modelo, foram eliminadas as rotas que continham trechos de viagens entre os portos de Suape e Fortaleza, e entre Rio Grande e Santos.

Foram eliminadas no total cerca de setenta e seis rotas candidatas, tendo reduzido a quantidade de rotas para apenas quarenta e uma rotas viáveis. A significativa redução na dimensão de rotas propiciaria uma melhor performance do modelo; entretanto, foram

introduzidas mais três embarcações nesta configuração, o que resultou em esforços computacionais consideráveis.

Foram testados, para esse caso, cerca de cinco cenários ao redor do cenário de demanda-padrão. Os resultados alcançados para este caso são mostrados na tabela 6.10 abaixo.

Tabela 6.10. Resultado para o caso de 5 portos e 5 navios.

Demanda	Custo Total (R\$)	Ocupação Média	Intervalo Médio (dias)	Qtde. Navios	Navios	T.Process. (min.)
08d	1650234	54%	4,0	3	K_1, K_4, K_5	10
09d	1670278	68%	4,3	3	K_1, K_3, K_5	50
1d	1796461	72%	5,0	3	K_1, K_2, K_5	80
1,1d	1816270	71%	4,9	3	K_2, K_3, K_5	120
1,2d	1878935	73%	7,8	3	K_3, K_4, K_5	720

Além dos resultados almeçados nas análises já executadas para o caso anterior, a geração dos cenários apresentados acima tem como objetivo testar a eficiência do modelo na escolha da melhor combinação de navios. Isto é, foram disponibilizadas ao modelo, cinco embarcações, de três classes distintas, com o objetivo de que o modelo selecionasse dentre todas as opções possíveis a solução ótima. Para todos os casos, foram utilizadas apenas três embarcações; entretanto, as embarcações foram alocadas de acordo com a conveniência do nível de demanda requerido.

A tabela 6.10 mostra também o tempo de execução dispendido para cada um dos cenários e pode-se notar que o esforço computacional empregado aumenta exponencialmente com o aumento da demanda.

As figuras 6.9 e 6.10 abaixo mostram os resultados gráficos para este caso.

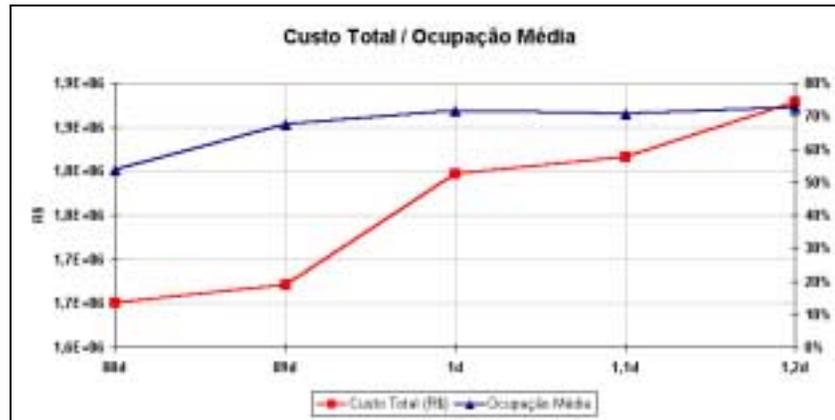


Figura 6.9. Custo Total e Ocupação Média para o caso de 5 portos e 5 navios.

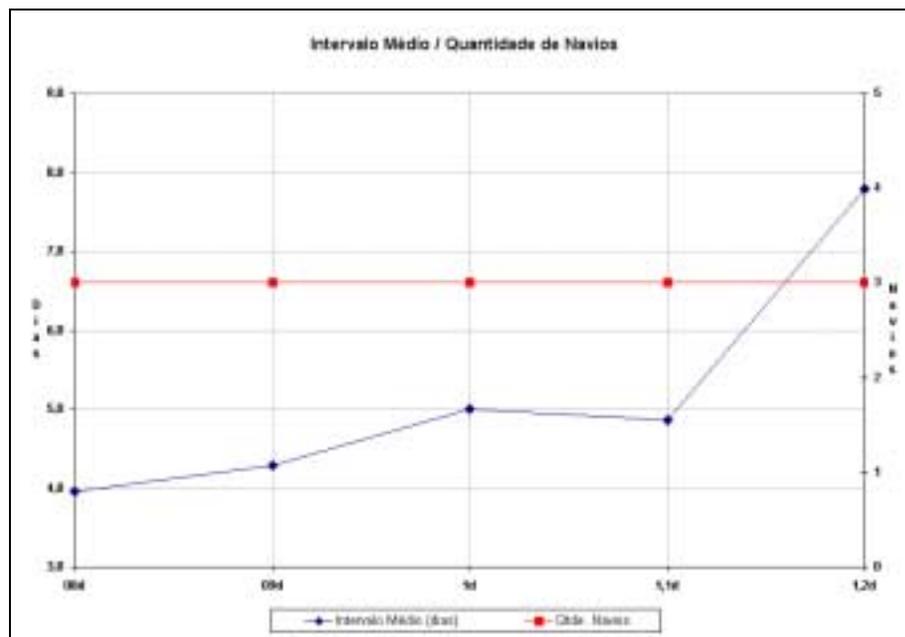


Figura 6.10. Intervalo Médio/Quantidade de Navios para o Caso de 5 Portos e 5 Navios.

A oscilação das curvas de ocupação média e, principalmente, da de intervalo médio é devido à alteração da composição da frota entre os cenários adjacentes. Apesar de sempre estar operando com três navios, é importante ressaltar que a capacidade total disponibilizada sofre alterações ao longo das rodadas, como pode ser visto na tabela 6.11 e figura 6.11 abaixo.

Tabela 6.11. Análises da Frota e Aumento Relativo do Custo Total.

Demanda	Capacidade da Frota	Aumento Relativo
08d	2970	
09d	2970	1%
1d	2740	7%
1,1d	2970	1%
1,2d	3200	3%

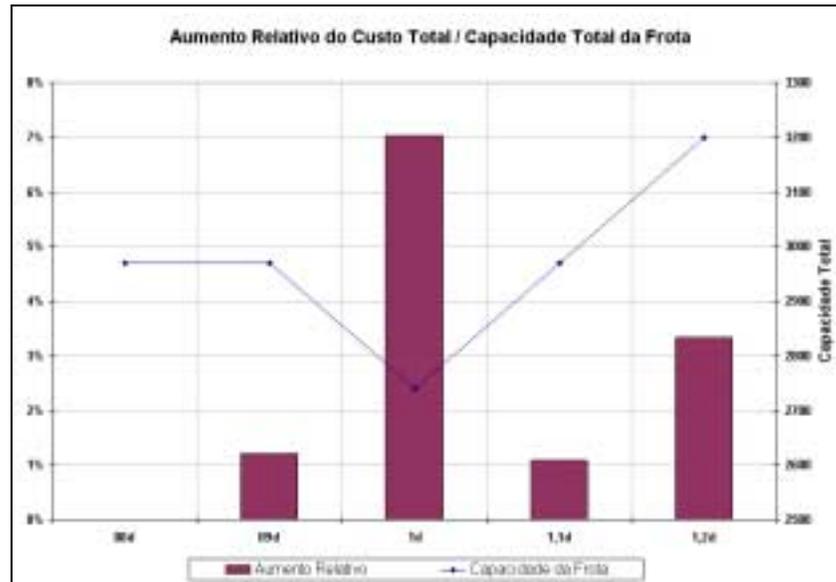


Figura 6.11. Aumento relativo do custo total / Capacidade da Frota para o caso de 5 portos e 5 navios.

A figura 6.11 evidencia um fato inesperado, mas perfeitamente possível, que é o aumento do custo total e diminuição da capacidade total da frota. Esse caso será melhor compreendido através da apresentação das características das rotas e navios selecionados.

As tabelas 6.12 e 6.13 mostram as rotas escolhidas para ambos os cenários, bem como as figuras ilustrativas das rotas são mostradas nas figuras 6.12 e 6.13 abaixo.

Tabela 6.12. Rotas selecionadas para o cenário de 0,9 vezes a demanda.

Navio	Capac.(TEUs)	Rota	Cenário: 0,9 * D								
K_1	670	R_4	0	SSZ	0	FOR	0	FOR	0	SSZ	0
K_3	900	R_10	0	SSZ	0	0	MAO	0	0	SSZ	0
K_5	1400	R_35	RIG	SSZ	SUA	0	MAO	FOR	0	0	RIG

Tabela 6.13. Rotas selecionadas para o cenário de padrão.

Navio	Capac.(TEUs)	Rota	Cenário:1,0 * D								
K_1	670	R_9	RIG	SSZ	0	FOR	0	FOR	0	0	RIG
K_5	1400	R_17	0	SSZ	SUA	0	MAO	FOR	0	SSZ	0
K_2	670	R_28	RIG	0	0	FOR	MAO	0	SUA	0	RIG



Figura 6.12. Esquema das rotas para o cenário de 0,9 vezes a demanda.



Figura 6.13. Esquema das rotas para o cenário de 1,0 vezes a demanda.

Pelos esquemas apresentados acima, pode-se observar claramente a diferença entre as duas configurações adotadas. Para um incremento de dez por cento na demanda em um patamar crítico de operação ($0,9 * D$) as alocações devem ser feitas de forma totalmente distintas para se alcançar um valor de custo compatível. Apesar de ambos os casos estarem utilizando o mesmo número de embarcações, o acréscimo na demanda implica na viabilidade de alocação de uma determinada rota conjunta que antes era inviável. O novo conjunto de rotas apresentou um melhor aproveitamento da capacidade do navio e por fim resultou na redução da capacidade total da frota. Em termos gerais, o aumento de demanda relativa pôde ser distribuído de tal forma que a performance geral de ocupação melhorasse, permitindo essa redução.

A partir das análises efetuadas para este caso, foi verificado que, em todos os casos, apenas três embarcações foram necessárias. Dessa forma, pretende-se aprofundar esta análise estudando um caso com o mesmo número de portos e apenas três embarcações, sendo uma de cada classe, e comparar os resultados. Esse estudo será apresentado na seção seguinte.

6.3. Caso 3 – Cinco portos e três navios

Na seção anterior foi apresentado um caso mais genérico para cinco portos, verificando que um estudo com apenas três embarcações seria necessário com o intuito de refinar a solução desta configuração. Além disso, através de novos experimentos com esta configuração, pretende-se avaliar a sensibilidade computacional na resolução do modelo, visto que para o caso genérico a execução do modelo tornou-se demorada e extensa, possibilitando incidências de falhas no algoritmo computacional adotado pelo software para modelos deste porte.

Nesta seção, serão apresentados os resultados alcançados utilizando-se três embarcações com capacidades de 670, 900 e 1.400 TEUs. Naturalmente, espera-se que as soluções sejam atingidas em um tempo significativamente menor, sem comprometimento nos resultados finais.

A seguir, são apresentados os resultados alcançados para este caso.

Tabela 6.14. Resultados para o caso de 5 portos e 3 navios.

Demanda	Custo Total (R\$)	Ocupação Média	Intervalo Médio (dias)	Qtde. Navios	Navios	Tempo (min.)
05d	1339590	55%	8,4	2	K_1, K_3	1
06d	1339590	66%	8,4	2	K_1, K_3	1
07d	1380173	65%	8,2	2	K_2, K_3	1
08d	1650234	54%	4,0	2	K_2, K_3	4
09d	1670278	68%	4,1	3	K_1, K_2, K_3	5
1d	1801824	71%	4,9	3	K_1, K_2, K_3	6
1,1d	1816270	71%	4,9	3	K_1, K_2, K_3	10

Conforme resultado esperado, pode se verificar a consistência entre os valores alcançados nas faixas coincidentes com o caso analisado na seção anterior. Para o valor de demanda padrão, este caso apresentou resultados compatíveis, pois o custo total é ligeiramente maior, causado pela utilização do segundo navio de 900 TEUs e com uma ocupação menor. O maior ganho deste estudo está na diferença do tempo utilizado. No primeiro caso, o modelo chegou a sua solução em aproximadamente oitenta minutos, enquanto que, para este caso, a solução ótima foi atingida em apenas seis minutos. A redução de duas embarcações implica, para este caso, em uma redução de aproximadamente 40% no número de arcos e nós na busca pela solução. Esta metodologia deverá ser muito útil na resolução de modelos de dimensões maiores.

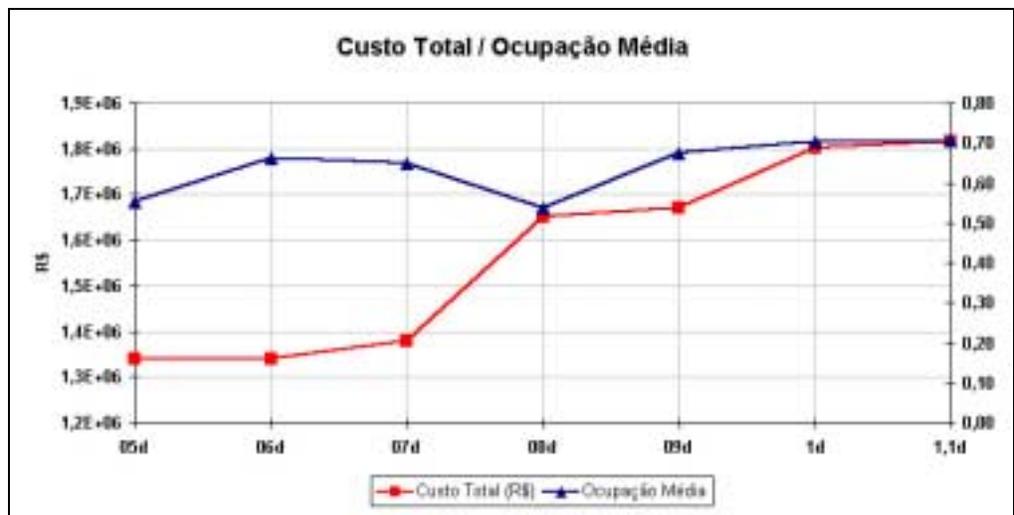


Figura 6.14. Custo Total e Ocupação Média para o caso de 5 portos e 3 navios.

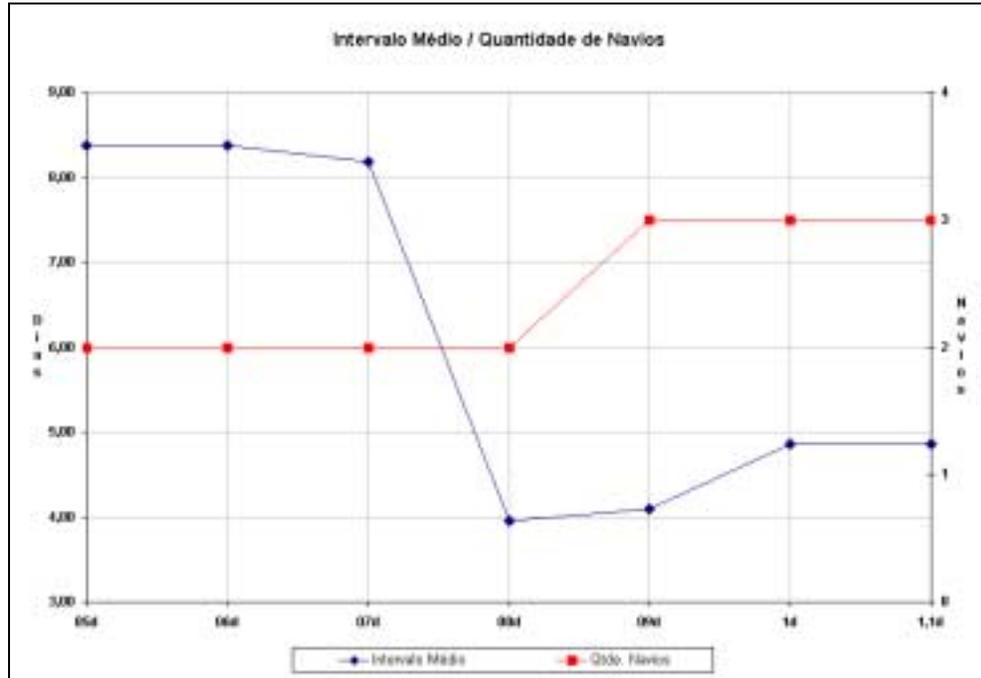


Figura 6.15. Intervalo Médio / Quantidade de Navios para o caso de 5 portos e 3 navios.

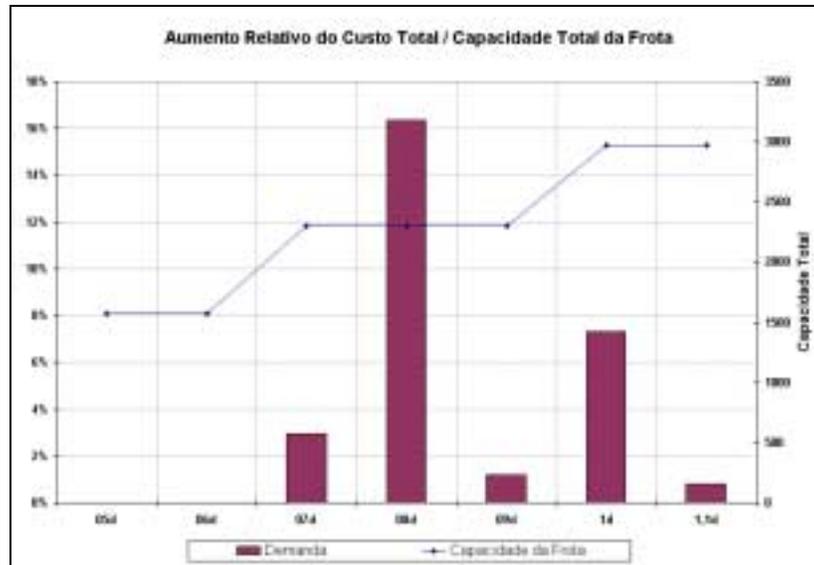


Figura 6.16. Aumento relativo do custo total / Capacidade da Frota para o caso de 5 portos e 3 navios.

A partir das figuras 6.14, 6.15 e 6.16 e da comparação com os casos já apresentados, é possível comprovar a variabilidade no comportamento das curvas de aumento relativo dos custos totais. Num modelo em que se trabalha muito com variáveis binárias, uma pequena alteração poderá apresentar resultados inesperados e inusitados, isto é, não existe, necessariamente uma regra ou uma lógica matematicamente calculável que estimem a resposta de uma perturbação. Naturalmente, uma análise qualitativa bem-sucedida deve ser seguida de uma análise quantitativa.

Neste caso, pode ser verificado novamente o *gap*, aumento relativo, existente quando uma nova embarcação é introduzida no sistema. Tal fato acarreta em um aumento significativo no custo total, redução brusca na ocupação média e melhora no intervalo de escalas nos portos.

6.4. Caso 4 - Estudo de caso real - HSAC

A validação final do modelo deverá ser feita através de um estudo de caso baseado em dados reais da empresa HSAC, cuja operação de cabotagem é realizada pela Aliança Navegação e Logística. Conforme descrita nas seções anteriores, a Aliança foi uma das empresas pioneiras no segmento e, atualmente, mantém-se como um dos maiores *players* do setor. Naturalmente, as informações que serão apresentadas abaixo não representam dados reais na íntegra, mas caracterizam a operação real.

Atualmente, a HSAC opera na cabotagem em seis portos, e a frota dedicada para esse serviço é de apenas duas embarcações de pequeno porte. Os portos que participam desse cenário são Rio Grande (RS), São Francisco do Sul (SC), Santos (SP), Suape (PE), Fortaleza (CE) e Manaus (AM).

O serviço é realizado regularmente com uma embarcação de 670 TEUs de capacidade a uma velocidade de 17,5 nós e outra de 900 TEUs de capacidade e velocidade de 18,5 nós. Entretanto, nos últimos meses a oferta de cargas na cabotagem tem crescido expressivamente, fazendo com que navios de outras operações sejam utilizadas para cobrir a oferta excedente. Isto é, o serviço *feeder* dos navios de longo curso passou a incorporar cargas totalmente nacionais pela costa brasileira. Dessa forma, o modelo foi testado com uma configuração de cinco navios disponíveis para que fosse possível analisar a frota necessária e/ou utilizada.

Os resultados deste modelo são mostrados nas tabelas 6.15 abaixo.

Tabela 6.15. Resultados para o caso de 6 portos.

	Custo Total	R\$ 1.621.880,00
	Frequência Média	3,5 dias
Navio K_1	Capacidade (TEU)	670
	Rota:	R_3
	Ocupação	12,6%
Navio K_2	Capacidade (TEU)	900
	Rota:	R_34
	Ocupação	81,7%
Navio K_5	Capacidade (TEU)	1400
	Rota:	R_61
	Ocupação	79,1%

As rotas alocadas estão especificadas na tabela 6.16 e ilustradas na figura 6.17.

Tabela 6.16. Rotas alocadas às embarcações para o caso HSAC.

Navio	Rota											
K_1	R_3	RIG	0	SSZ	0	0	0	0	0	SSZ	SFS	RIG
K_2	R_34	0	SFS	0	SUA	0	MAO	FOR	0	0	SFS	0
K_5	R_61	RIG	0	0	SUA	0	MAO	FOR	0	SSZ	0	RIG



Figura 6.17. Esquema ilustrativo das rotas selecionadas.

Nesta configuração, os dois navios de maior porte apresentaram uma taxa de ocupação bastante elevada, entretanto o navio menor, que fora alocado para portos do sul, apresentou uma ocupação baixa, devido à pequena distância percorrida na rota,

portanto tempo de viagem redonda baixa e conseqüentemente maior número de viagens.

As performances de ocupação de cada navio em cada trecho estão apresentadas na tabela 6.17.

Tabela 6.17. Características dos trechos de viagens para o caso HSAC.

Navio	Origem	Destino	Composição dos Arcos	Ocupação	Média
K_1	RIG	SSZ	1,2,4	3,6%	12,6%
	SSZ	SFS	1,5,6	17,3%	
	SFS	RIG	3,4,5	16,8%	
K_2	SFS	SUA	7,8,9,13,14,16	96,7%	81,7%
	SUA	MAO	8,9,10,11,14	100,0%	
	MAO	FOR	8,10,15,16	59,1%	
	FOR	SFS	10,12,13,14,15,16	70,9%	
K_5	RIG	SUA	17,18,19,20,21,22	83,3%	79,1%
	SUA	MAO	18,21,22,23,24,25,26	80,3%	
	MAO	FOR	18,21,23,24,25,29,30	98,1%	
	FOR	SSZ	23,24,27,28,29,30	70,3%	
	SSZ	RIG	20,21,22,23,27,29	63,4%	

Para cada navio é possível visualizar a ocupação percentual entre cada porto de origem para cada porto de destino, existentes na seqüência de viagens da rota. A composição de carga em cada um dos trechos está identificada com o índice do arco que está apresentado na tabela 6.18 abaixo.

Tabela 6.18. Percentagem de Carga para cada navio para o caso HSAC.

Rota	Navio	Arco	Origem	Destino	% Carga	Rota	Navio	Arco	Origem	Destino	% Carga	
R_3	K_1	1	RIG	SFS	1,1%	R_61	K_5	17	RIG	SUA	15,4%	
		2	RIG	SSZ	1,7%			18	RIG	FOR	19,0%	
		3	SFS	RIG	4,1%			19	RIG	MAO	3,5%	
		4	SFS	SSZ	0,8%			20	SSZ	SUA	14,5%	
		5	SSZ	RIG	11,9%			21	SSZ	FOR	10,3%	
		6	SSZ	SFS	4,3%			22	SSZ	MAO	20,6%	
R_34	K_2	7	SFS	SUA	16,8%			23	SUA	RIG	9,3%	
		8	SFS	FOR	18,8%			24	SUA	SSZ	10,8%	
		9	SFS	MAO	14,1%			25	SUA	FOR	3,4%	
		10	SUA	SFS	12,5%			26	SUA	MAO	3,4%	
		11	SUA	MAO	27,7%			27	FOR	RIG	2,0%	
		12	FOR	SFS	3,1%			28	FOR	SSZ	3,0%	
		13	FOR	SUA	0,7%			29	MAO	RIG	6,8%	
		14	FOR	MAO	26,9%			30	MAO	SSZ	38,6%	
		15	MAO	SFS	8,3%							
		16	MAO	SUA	19,5%							

Por exemplo, tomemos o primeiro trecho do navio K_1, que foi alocado para executar a rota R_3, cuja viagem ocorre entre o porto de Rio Grande(RIG) e Santos (SSZ), com uma ocupação total de apenas 3,6% do navio, carregando cargas embarcadas em RIG e destinos em SFS e SSZ, representando 1,1% e 1,7% respectivamente (arcos 1 e 2) e cargas embarcadas em SFS com destino a SSZ, correspondendo a 0,8 % (arco 4). A somatória de todas as cargas presentes no trecho resultará na ocupação do navio naquele trecho.

Um caso envolvendo seis portos apresenta setenta e uma rotas viáveis, considerando a restrição de distância, já mencionado na seção anterior. Este modelo já apresenta um tamanho considerável de número de variáveis e restrições, dificultando ainda mais a resolução computacional. Utilizando um computador com processador *Pentium-III* de 800 Mhz e memória física RAM de 512 Mbytes, o tempo de execução foi de aproximadamente vinte e oito horas.

Os tempos de execução dos modelos apresentaram comportamentos semelhantes aos problemas classificados como *NP-Hard*, que se caracterizam quando os tempos aumentam em uma escala exponencial, devido ao aumento geométrico nos ramos e nós da cadeia de busca da solução. Os casos apresentados tiveram a seguinte performance computacional:

Tabela 6.19. Tempos de execução para cada caso.

Caso	Tempo de Execução (minutos)
Quatro Portos e dois navios	0,5
Cinco Portos e três navios	6
Cinco Portos e cinco navios	80
Seis Portos e cinco navios	43200 (28 horas)

A proposta inicial do presente trabalho pretendia testar cenários futuros com outros três portos, totalizando nove portos. Os dados referentes a esse novo caso foram coletados, preparados, manipulados e analisados de forma conveniente ao modelo. Entretanto, por questões de restrições técnicas e computacionais este caso não foi possível de ser testado. Conforme apresentado no capítulo 3, o aumento do número de portos representa um aumento exponencial no número de variáveis e restrições do problema. Este caso apresentou um total de oitocentos e oitenta rotas inviabilizando qualquer tentativa de resolução do problema com os recursos computacionais no Departamento atualmente.

6.5. Características das execuções dos modelos

O *solver* CPLEX 3.0 utilizado na execução do presente trabalho apresenta uma versatilidade muito grande no que tange ao método de busca da solução. A ferramenta permite uma calibragem da forma como o *solver* buscará a solução, conforme as necessidades e particularidades de cada modelo. Existe uma série de comandos, denominados *options*, que são ajustados de acordo com o nível de exigência do modelo. Além disso, é possível definir níveis de tolerância, métodos de aproximação, critérios de

parada, forma de utilização dos nós, atribuições hierárquicas no uso de heurísticas, tamanho do passo ou iteração, gerenciamento de utilização dos recursos, entre outros.

Por outro lado, essa imensa variedade de comandos exige um esforço significativo na calibragem do modelo de modo a torná-lo eficiente, ágil e confiável. Naturalmente, a calibragem dos comandos foi efetuada utilizando-se de modelos de menor porte, no caso, modelos-teste com um número reduzido de portos e rotas. Para tais casos, a diferença no tempo de execução chegou a ser de mais de 200% entre a configuração padrão e a configuração otimizada.

7. Conclusões

O serviço de cabotagem tem se consolidado cada vez mais no mercado, trazendo consigo uma alternativa a mais para o transporte interno dos diversos tipos de carga. A matriz de transportes brasileira já sofreu algumas alterações no decorrer do desenvolvimento deste trabalho, e a transferência de carga do modal rodoviário para os modais aquaviário e ferroviário permite uma redução significativa no frete e, conseqüentemente, uma redução ainda maior nos custos globais dos processos envolvidos em toda a cadeia logística.

O modelo matemático desenvolvido permite auxiliar o armador nas tomadas das decisões estratégicas para manutenção do serviço de cabotagem e utilização de recursos de forma otimizada.

A utilização da ferramenta possui algumas restrições relativas ao porte e capacidade de processamento do computador por se tratar de um modelo muito restritivo e combinatório.

A solução gerada pelo modelo apresenta características tanto estratégicas quanto operacionais. Estratégicas no sentido de apresentar um dimensionamento da frota dedicada a esse serviço, bem como estabelecer as rotas necessárias para o atendimento da demanda. Operacionais no sentido de apresentar a composição de carga na embarcação em cada um dos trechos da rota escolhida, isto é, as condições de carregamento, inclusive de ocupação da embarcação por trecho.

Os diversos cenários testados pelos modelos apresentaram resultados consistentes, tendo atingido resultados ótimos para cada configuração ajustada. Por se tratar de um modelo envolvendo variáveis binárias, qualquer alteração nos parâmetros de entrada pode apresentar resultados bastante distintos, permitindo que se faça uma análise marginal dos resultados. Um exemplo claro deste problema pôde ser verificado no caso analisado com quatro portos, em que a simples alteração nas capacidades dos navios apresentou soluções distintas devido à seleção de rotas distintas, conseqüentemente no fluxo de cargas, e por fim no custo total. A análise de sensibilidade em problemas desta natureza exige uma metodologia criteriosa em que a magnitude de influência da perturbação de um parâmetro seja mensurável e possível de avaliação. Dessa forma, a melhor definição para o estudo de casos é a geração e análise de cenários particulares de cada configuração.

A metodologia adotada para o desenvolvimento desta modelagem foi baseada em diversas bibliografias, tais como os modelos de *scheduling* de Fagerholt [8], modelos de alocação de Perakis [14] e outros, já explicitados na revisão bibliográfica; além das etapas de preparação dos dados, que inclui a seleção, revisão, manipulação, análise e validação dos dados coletados. É importante ressaltar que, para qualquer desenvolvimento de modelos, é fundamental que seja avaliado o grau de possibilidade e viabilidade de obtenção dos dados. No decorrer do desenvolvimento do trabalho a estratégia de abordagem do problema foi modificada devido à impossibilidade de obtenção dos dados na qualidade em que se previa. Portanto, em muitos casos, a

avaliação da possibilidade de se utilizar um determinado tipo de dado é tão importante quanto a própria metodologia de desenvolvimento do modelo.

Em suma, os objetivos propostos foram atingidos com êxito, trazendo uma valiosa contribuição tanto para o meio acadêmico quanto para o mercado de transporte, que, a cada dia, vislumbra a necessidade de um planejamento adequado e um estudo de viabilidade para seus serviços. Para a comunidade acadêmica, um problema de alocação de recursos em rotas distintas envolvendo portos de multi-origem e multi-destino jamais fora solucionado com êxito. Para o mercado, mais especificamente para as companhias de navegação, o estudo trouxe uma contribuição bastante significativa no sentido de possibilitar uma avaliação criteriosa das estratégias empregadas e oferecer alternativas de incremento nos serviços, ou mesmo servir de embasamento teórico para desenvolvimento de novos negócios relacionados ao segmento da cabotagem.

O produto mais valioso deste presente trabalho consiste na metodologia empregada, que possibilita não só a aplicação no segmento de cabotagem mas em qualquer tipo de problema de atendimento de demanda em nós, com restrições de capacidade em arcos orientados. Um pequeno exemplo de um caso em que pode ser aplicado, mediante uma simples adaptação, é o caso de programação de fluxos em rede com restrição em arcos.

8. Recomendações

Os problemas de alocação, *scheduling* e programação tornam-se bastante extensos e complexos à medida que a modelagem nos obriga a explorar o problema de forma combinatória. As restrições existentes nestes tipos de problema exigem uma severa manipulação dos dados de entrada de forma a simplificar o problema sem comprometer a solução final. Ou uma segunda alternativa de tentar aproximar cada vez mais um modelo de programação a um modelo heurístico, que se tem mostrado bastante eficiente para problemas combinatórios.

A metodologia adotada para o desenvolvimento deste modelo permitiu que fosse elaborado um modelo bastante simples, enxuto e eficiente, se comparado com a complexidade do problema. A alimentação do modelo por meio de informações agregadas reduziu significativamente os graus de liberdade e, conseqüentemente, reduziu bruscamente a quantidade de variáveis do modelo. Conforme descrito ao longo do trabalho e, principalmente nos objetivos, o modelo tem a pretensão de servir de ferramenta de apoio à decisão do armador.

Entretanto, o enfoque adotado neste trabalho representa apenas a visão e a estratégia de um agente, presente em toda cadeia logística. A função objetivo do modelo é a minimização dos custos do armador, responsável pela manutenção dos serviços. Mas até que ponto a minimização dos custos é o fator preponderante na tomada de decisão para definição de rotas e alocação de embarcações? A função de mérito poderá ser a receita gerada pelo serviço, ou mesmo a margem de lucro, ou minimização do tempo de retorno do investimento. Enfim, outras abordagens devem ser estudadas para poder

confrontar os resultados. Vale lembrar que o modelo desenvolvido trata o fator custo como sendo um custo fixo por navio alocado a uma determinada rota; isto implica em desconsiderar os custos de movimentação e transporte individual do contêiner. Nesse problema o volume de contêineres embarcados por viagem não enxerga eficiência, custo ou produtividade do porto; esse volume é determinado apenas pela capacidade da embarcação.

Sabe-se que muitas das soluções propostas podem se tornar inviáveis devido às restrições físicas nos portos. Em muitos casos, o navio com 1.400 TEUs foi alocado e utilizado com a máxima capacidade em alguns portos. Esse fato nem sempre pode ser aplicado pois não foi considerada uma restrição complementar ao problema, que é a restrição de calado nos portos e canais de acesso.

Por se tratar de um modelo estratégico com um horizonte de planejamento de um ano, não foram consideradas as sazonalidades das cargas. O modelo atribui a rota adequada verificando apenas o atendimento da demanda, que foi introduzida como sendo um parâmetro anual e, dessa forma, admitiu-se a hipótese de um fluxo regular. A regularidade das viagens e das demandas faz com que o navio sempre mantenha a mesma ocupação durante o ano. Esse fator pode significar ou gerar um equívoco na solução do modelo, pois a minimização do custo não enxerga a ocupação do navio. Existe, sim, a restrição de capacidade, mas ela restringe o limite superior e não o inferior. Esse problema poderá ser facilmente resolvido introduzindo-se uma penalidade na função objetivo atribuindo-se um acréscimo do custo no caso de ocupação baixa do navio.

Muitas das recomendações citadas acima não foram contempladas nesse trabalho pela dificuldade na obtenção de dados confiáveis, coerentes e publicáveis. A abordagem para tratamento de qualquer problema de modelagem deverá ser definida sempre verificando a qualidade dos dados que serão utilizados no modelo.

Conforme descrito no capítulo anterior, as principais dificuldades encontradas na execução do modelo foram as restrições computacionais de *software* e *hardware*. A versão do *solver* CPLEX utilizado já está bastante desatualizado, fato comprovado pela falta de versatilidade nas configurações da ferramenta. A versão utilizada é a 3.0, sendo que já se trabalha com a versão 7.0, que traz consigo diversas outras facilidades, outros métodos, comandos de busca mais avançados e maior controle na execução dos modelos. Os modelos foram executados em um micro-computador pessoal, com processador *Pentium III* de 800 Mhz, com capacidade de memória RAM de 512 Mhz.

Tal configuração não se mostrou eficiente e viável para execução do modelo final, com nove portos, oitocentos e oitenta rotas viáveis e três navios.

9. Bibliografia

- 1) BAUSCH, D.O.; BROWN, G.G.; RONEN, D., **Elastic set partitioning – A powerful tool for scheduling transportation of oil and gas.** Advances in Operations Research in the Oil and Gas Industry. e.technip, p. 151-162, 1991.
- 2) BOTTER, R. C., **Relatório sobre a navegação de cabotagem no Brasil**, EPUSP, 1996.
- 3) BOYKIN, R.F.; LEVARY, R.R., **An interative decision support system for analyzing ship voyage alternatives.** Interfaces. v.15, p.81-84, 1985.
- 4) BROWN, G.G.;GRAVES,G.W.;RONEN,D.,**Scheduling ocean transportation of crude oil.** Management Science. v.33, p. 335-346, 1987.
- 5) CASPERS, F.N.; BRUGGE, R. **Logistic Requirements and Shortsea Shipping.** In: European Shortsea Shipping, London, p.40-51, 1992.
- 6) DIBNER, B. **Shortsea shipping in Europe and the Americas: Status and Prospects.** In: European Shortsea Shipping, London, p.289-300, 1992.
- 7) FADDA, E. A. **The evolution of coastal shipping in Brazil** Tese (Doutorado), 1995
- 8) FAGERHOLT, K., **Evaluating the trade-off between the level of customer service and transportation costs in a ship scheduling problem.** Maritime Policy Management. v.27, n.2, p.145-153, 2000.
- 9) FISHER, M.L.; ROSENWEIN, M.B., **An Interactive Optimization System for Bulk-Cargo Ship Scheduling.** Naval Research Logistics, v.36, p.27-42, 1989.

- 10) KOENIGSBERG E.; MEYERS, D.A., **An interacting cyclic queue model of fleet operations.** The Logistic and Transportation Review. v.16, p.59-71, 1980.
- 11) LANE ,D.E.; HEAVER, E.D.; UVENO, D., **Planning and Scheduling for efficiency in liner shipping.** Maritime Policy Management. v.14, p.109-125, 1987.
- 12) PAPADAKIS, N.A.; PERAKIS,A.N., **A Nonlinear Approach to the Multiorigin, Multidestination Fleet Deployment Problem.** Naval Research Logistics. v.36, p.515-528, 1989.
- 13) PERAKIS, A.N.; PAPADAKIS, N.A., **Minimal time vessel routing in a time-dependent environment.** Transportation Science v.23, p.266-276, 1989.
- 14) PERAKIS, A.N.; JARAMILLO, D.I., **Fleet deployment optimization for liner shipping Part.1 Background, problem formulation and solution approaches.** Maritime Policy Management v.18,n.3, p.183-200, 1991.
- 15) REVISTA TRADE & TRANSPORT. São Paulo, n. 27 , Agosto 1999.
- 16) REVISTA TRADE & TRANSPORT. São Paulo, n. 35, Abril 2000.
- 17) REVISTA GLOBAL São Paulo, n. 28, Maio 2000.
- 18) RANA, K; VICKSON, R.G. **A model and solution algorithm for optimal routing of a time-chartered containership,** Transportation Science. v.22, p.83-95, 1988.
- 19) RONEN, D. **Ship scheduling: The last decade,** European Journal of Operational Research. v. 71, p.325-333.
- 20) ROQUE, J.R.R.; BOTTER, R.C. **Uma avaliação agregada do potencial e da competitividade do sistema de cabotagem brasileiro** Pan American Institute of Naval Engineering, X COPINAVAL, 1987.

- 21) SHERALI, H. D.; AL-YAKOOB, S. M.; ASAN, M. M., **Fleet management models and algorithms for an oil-tanker routing and scheduling problem.** IIE Transactions. v.31, p.395-406, 1999.
- 22) VAN WILLIGENBURG, J.R.; HOLLANDER, S. **Coastal shipping opportunities in a changing market.** In: European Shortsea Shipping, London, 1992, p.184-192.

ANEXO A - TABELA DE DADOS

Este anexo contém as tabelas utilizadas em cada um dos cenários. A primeira tabela de cada caso apresenta a seqüência de portos (T), obtida através do modelo 1, em seguida, a tabela de número de viagens de cada embarcação (N), a terceira tabela, referente aos custos associados a cada rota para cada embarcação e por fim a tabela de demanda (D).

Caso1: 4 Portos e 2 navios

A 1. Caso 1: 4 Portos e 2 navios

T	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L_7	N	K_1	K_2	C	K_1	K_2
R_1	0	0	0	0	0	0	0	R_1	0	0	R_1	0	0
R_2	1	1	0	0	0	1	1	R_2	68	70	R_2	172217	204936
R_3	0	0	1	1	1	0	0	R_3	53	56	R_3	259220	298436
R_4	0	1	1	0	1	1	0	R_4	38	39	R_4	333452	390008
R_5	1	0	1	0	1	1	1	R_5	33	35	R_5	416596	478244
R_6	1	1	1	0	1	0	1	R_6	27	28	R_6	464209	542521
R_7	1	0	1	0	1	0	1	R_7	27	28	R_7	454111	532436
R_8	1	1	1	0	1	1	1	R_8	29	31	R_8	455619	527377
R_9	0	1	0	1	0	1	0	R_9	24	26	R_9	536331	621500
R_10	0	1	0	1	1	1	0	R_10	23	24	R_10	563038	653410
R_11	0	1	1	1	0	1	0	R_11	23	24	R_11	564238	654610
R_12	0	1	1	1	1	1	0	R_12	24	25	R_12	565027	651528
R_13	1	0	0	1	0	1	1	R_13	22	23	R_13	632149	726847
R_14	1	0	1	1	0	0	1	R_14	20	21	R_14	655972	757989
R_15	1	0	1	1	0	1	1	R_15	20	21	R_15	679313	785952
R_16	1	1	0	1	0	0	1	R_16	21	22	R_16	647831	748017
R_17	1	0	0	1	1	0	1	R_17	20	22	R_17	651765	752730
R_18	1	0	1	1	1	0	1	R_18	21	22	R_18	651317	747558
R_19	1	1	0	1	1	0	1	R_19	21	22	R_19	659426	759524
R_20	1	0	0	1	0	0	1	R_20	19	20	R_20	667636	777959
R_21	1	1	0	1	0	1	1	R_21	22	23	R_21	642247	736932
R_22	1	0	0	1	1	1	1	R_22	20	21	R_22	678113	784752
R_23	1	0	1	1	1	1	1	R_23	21	22	R_23	663852	760933
R_24	1	1	0	1	1	1	1	R_24	20	22	R_24	671961	772899
R_25	1	1	1	1	0	0	1	R_25	20	21	R_25	679313	785952
R_26	1	1	1	1	0	1	1	R_26	19	20	R_26	702655	813916
R_27	1	1	1	1	1	0	1	R_27	19	19	R_27	709027	821920

R_28	1	1	1	1	1	1	1	R_28	18	19	R_28	732369	849883
D	J_1	J_2	J_3	J_4									
L_1	0	804	5832	2500									
L_2	4000	0	3246	8000									
L_3	613	918	0	4054									
L_4	1500	5000	800	0									

Caso 2. 5 portos 5 navios

A 2. Caso 2: 5 Portos e 5 Navios

T	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L_7	L_8	L_9
R_1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R_2	0	1	1	0	0	0	1	1	0
R_3	0	0	0	1	1	1	0	0	0
R_4	0	1	0	1	0	1	0	1	0
R_5	0	0	1	0	1	0	1	0	0
R_6	1	0	1	0	0	0	1	0	1
R_7	1	1	1	0	0	0	1	0	1
R_8	1	0	0	1	0	1	0	0	1
R_9	1	1	0	1	0	1	0	0	1
R_10	0	1	0	0	1	0	0	1	0
R_11	0	1	0	0	1	1	0	1	0
R_12	0	1	0	1	1	0	0	1	0
R_13	0	1	0	1	1	1	0	1	0
R_14	0	1	0	0	1	0	1	1	0
R_15	0	1	1	0	1	0	0	1	0
R_16	0	1	0	1	1	0	1	1	0
R_17	0	1	1	0	1	1	0	1	0
R_18	0	1	1	0	1	0	1	1	0
R_19	1	0	0	0	1	0	0	0	1
R_20	1	0	0	0	1	1	0	0	1
R_21	1	0	0	1	1	0	0	0	1
R_22	1	0	0	1	1	1	0	0	1
R_23	1	1	0	0	1	0	0	0	1
R_24	1	0	0	0	1	0	1	0	1
R_25	1	0	1	0	1	0	0	0	1
R_26	1	1	0	0	1	1	0	0	1
R_27	1	1	0	1	1	0	0	0	1
R_28	1	0	0	1	1	0	1	0	1
R_29	1	0	1	0	1	1	0	0	1
R_30	1	1	0	1	1	1	0	0	1
R_31	1	1	0	0	1	0	1	0	1
R_32	1	1	1	0	1	0	0	0	1
R_33	1	0	1	0	1	0	1	0	1
R_34	1	1	0	1	1	0	1	0	1
R_35	1	1	1	0	1	1	0	0	1

R_36	1	1	1	0	1	0	1	0	1
-------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---

C	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	N	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5
R_1	0	0	0	0	0	R_1	0	0	0	0	0
R_2	270061	270061	283709	283709	288224	R_2	47	47	49	49	54
R_3	277800	277800	291038	291038	293909	R_3	47	47	49	49	54
R_4	304670	304670	317779	317779	318100	R_4	44	44	47	47	52
R_5	358684	358684	377294	377294	383529	R_5	34	34	36	36	39
R_6	378746	378746	397216	397216	401475	R_6	33	33	35	35	39
R_7	405501	405501	425846	425846	432355	R_7	31	31	33	33	36
R_8	413532	413532	431470	431470	431533	R_8	32	32	34	34	38
R_9	440199	440199	460008	460008	462322	R_9	30	30	32	32	35
R_10	553578	553578	579505	579505	582769	R_10	23	23	24	24	27
R_11	568024	568024	594161	594161	597389	R_11	23	23	24	24	27
R_12	568024	568024	594161	594161	597389	R_12	23	23	24	24	27
R_13	582470	582470	608816	608816	612009	R_13	23	23	24	24	26
R_14	591161	591161	620253	620253	627261	R_14	21	21	22	22	24
R_15	591161	591161	620253	620253	627261	R_15	21	21	22	22	24
R_16	605607	605607	634909	634909	641881	R_16	21	21	22	22	24
R_17	605607	605607	634909	634909	641881	R_17	21	21	22	22	24
R_18	628745	628745	661002	661002	671753	R_18	20	20	20	20	22
R_19	662440	662440	693195	693195	696202	R_19	19	19	20	20	22
R_20	676886	676886	707851	707851	710822	R_20	19	19	20	20	22
R_21	676886	676886	707851	707851	710822	R_21	19	19	20	20	22
R_22	681904	681904	713079	713079	716014	R_22	19	19	20	20	22
R_23	689106	689106	721733	721733	726991	R_23	18	18	19	19	21
R_24	699935	699935	733853	733853	740603	R_24	18	18	19	19	21
R_25	699935	699935	733853	733853	740603	R_25	18	18	19	19	21
R_26	703553	703553	736389	736389	741611	R_26	18	18	19	19	21
R_27	703553	703553	736389	736389	741611	R_27	18	18	19	19	21
R_28	714381	714381	748509	748509	755223	R_28	18	18	19	19	21
R_29	714381	714381	748509	748509	755223	R_29	18	18	19	19	21
R_30	717999	717999	751045	751045	756231	R_30	18	18	19	19	21
R_31	726602	726602	762390	762390	771392	R_31	17	17	18	18	20
R_32	726690	726690	762482	762482	771483	R_32	17	17	18	18	20
R_33	726990	726990	764070	764070	774564	R_33	17	17	17	17	19
R_34	741048	741048	777046	777046	786012	R_34	17	17	18	18	20
R_35	741136	741136	777138	777138	786103	R_35	17	17	18	18	20
R_36	764185	764185	803139	803139	815884	R_36	16	16	17	17	18

D	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5
----------	------------	------------	------------	------------	------------

I_1	0	6000	2400	6000	7200
I_2	3600	0	5400	12000	24000
I_3	3600	2400	0	1200	3600
I_4	2400	3600	1200	0	2400
I_5	3600	10800	1800	3600	0

Caso 3. 5 portos e 3 navios

A 3. Caso 3: 5 Portos e 3 Navios

T	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L_7	L_8	L_9
R_1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R_2	0	1	1	0	0	0	1	1	0
R_3	0	0	0	1	1	1	0	0	0
R_4	0	1	0	1	0	1	0	1	0
R_5	0	0	1	0	1	0	1	0	0
R_6	1	0	1	0	0	0	1	0	1
R_7	1	1	1	0	0	0	1	0	1
R_8	1	0	0	1	0	1	0	0	1
R_9	1	1	0	1	0	1	0	0	1
R_10	0	1	0	0	1	0	0	1	0
R_11	0	1	0	0	1	1	0	1	0
R_12	0	1	0	1	1	0	0	1	0
R_13	0	1	0	1	1	1	0	1	0
R_14	0	1	0	0	1	0	1	1	0
R_15	0	1	1	0	1	0	0	1	0
R_16	0	1	0	1	1	0	1	1	0
R_17	0	1	1	0	1	1	0	1	0
R_18	0	1	1	0	1	0	1	1	0
R_19	1	0	0	0	1	0	0	0	1
R_20	1	0	0	0	1	1	0	0	1
R_21	1	0	0	1	1	0	0	0	1
R_22	1	0	0	1	1	1	0	0	1
R_23	1	1	0	0	1	0	0	0	1
R_24	1	0	0	0	1	0	1	0	1
R_25	1	0	1	0	1	0	0	0	1
R_26	1	1	0	0	1	1	0	0	1
R_27	1	1	0	1	1	0	0	0	1
R_28	1	0	0	1	1	0	1	0	1
R_29	1	0	1	0	1	1	0	0	1
R_30	1	1	0	1	1	1	0	0	1
R_31	1	1	0	0	1	0	1	0	1
R_32	1	1	1	0	1	0	0	0	1
R_33	1	0	1	0	1	0	1	0	1
R_34	1	1	0	1	1	0	1	0	1
R_35	1	1	1	0	1	1	0	0	1
R_36	1	1	1	0	1	0	1	0	1

C	K_1	K_2	K_3
R_1	0	0	0
R_2	270061	283709	288224
R_3	277800	291038	293909
R_4	304670	317779	318100

N	K_1	K_2	K_3
R_1	0	0	0
R_2	47	49	54
R_3	47	49	54
R_4	44	47	52

R_5	358684	377294	383529	R_5	34	36	39
R_6	378746	397216	401475	R_6	33	35	39
R_7	405501	425846	432355	R_7	31	33	36
R_8	413532	431470	431533	R_8	32	34	38
R_9	440199	460008	462322	R_9	30	32	35
R_10	553578	579505	582769	R_10	23	24	27
R_11	568024	594161	597389	R_11	23	24	27
R_12	568024	594161	597389	R_12	23	24	27
R_13	582470	608816	612009	R_13	23	24	26
R_14	591161	620253	627261	R_14	21	22	24
R_15	591161	620253	627261	R_15	21	22	24
R_16	605607	634909	641881	R_16	21	22	24
R_17	605607	634909	641881	R_17	21	22	24
R_18	628745	661002	671753	R_18	20	20	22
R_19	662440	693195	696202	R_19	19	20	22
R_20	676886	707851	710822	R_20	19	20	22
R_21	676886	707851	710822	R_21	19	20	22
R_22	681904	713079	716014	R_22	19	20	22
R_23	689106	721733	726991	R_23	18	19	21
R_24	699935	733853	740603	R_24	18	19	21
R_25	699935	733853	740603	R_25	18	19	21
R_26	703553	736389	741611	R_26	18	19	21
R_27	703553	736389	741611	R_27	18	19	21
R_28	714381	748509	755223	R_28	18	19	21
R_29	714381	748509	755223	R_29	18	19	21
R_30	717999	751045	756231	R_30	18	19	21
R_31	726602	762390	771392	R_31	17	18	20
R_32	726690	762482	771483	R_32	17	18	20
R_33	726990	764070	774564	R_33	17	17	19
R_34	741048	777046	786012	R_34	17	18	20
R_35	741136	777138	786103	R_35	17	18	20
R_36	764185	803139	815884	R_36	16	17	18

D	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5
I_1	0	6000	2400	6000	7200
I_2	3600	0	5400	12000	24000
I_3	3600	2400	0	1200	3600
I_4	2400	3600	1200	0	2400
I_5	3600	10800	1800	3600	0

Caso 4. 6 portos e 5 navios

A 4. Caso 4: 6 Portos e 5 Navios

T	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L_7	L_8	L_9	L_10	L_11
R_1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R_2	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1
R_3	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1
R_4	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0
R_5	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
R_6	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0
R_7	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0
R_8	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0
R_9	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0
R_10	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1
R_11	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1
R_12	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1
R_13	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1
R_14	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1
R_15	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1
R_16	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1
R_17	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
R_18	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
R_19	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0
R_20	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0
R_21	0	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0
R_22	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0
R_23	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0
R_24	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0
R_25	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0
R_26	0	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0
R_27	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0
R_28	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0
R_29	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0
R_30	0	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0
R_31	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0
R_32	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0
R_33	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0
R_34	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0
R_35	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
R_36	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
R_37	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1
R_38	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1
R_39	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1
R_40	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1
R_41	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1
R_42	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1

R_43	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1
R_44	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1
R_45	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1
R_46	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1
R_47	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1
R_48	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1
R_49	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1
R_50	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1
R_51	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1
R_52	1	0	0	0	1	1	1	0	1	0	1
R_53	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1
R_54	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1
R_55	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1
R_56	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1
R_57	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1
R_58	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1
R_59	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1
R_60	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1
R_61	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1
R_62	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1
R_63	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1
R_64	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1
R_65	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1
R_66	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1
R_67	1	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1
R_68	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1
R_69	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1
R_70	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1
R_71	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1

C	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5
R_1	0	0	0	0	0
R_2	158526	158526	167098	167098	171342
R_3	201633	201633	213373	213373	221360
R_4	266479	266479	280127	280127	284642
R_5	274529	274529	287766	287766	290637
R_6	301257	301257	314366	314366	314687
R_7	310729	310729	326761	326761	332582
R_8	345331	345331	360817	360817	362444
R_9	355244	355244	373854	373854	380089
R_10	375179	375179	393649	393649	397908
R_11	400092	400092	420437	420437	426946
R_12	400092	400092	420437	420437	426946
R_13	410133	410133	428071	428071	428135
R_14	425005	425005	447225	447225	455984

N	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5
R_1	0	0	0	0	0
R_2	80	80	83	83	89
R_3	62	62	64	64	68
R_4	47	47	49	49	54
R_5	47	47	49	49	54
R_6	45	45	47	47	53
R_7	41	41	42	42	46
R_8	39	39	41	41	46
R_9	35	35	36	36	40
R_10	34	34	35	35	39
R_11	32	32	33	33	36
R_12	32	32	33	33	36
R_13	33	33	34	34	39
R_14	30	30	31	31	34

R_15	434958	434958	454767	454767	457082	R_15	31	31	32	32	36
R_16	434958	434958	454767	454767	457082	R_16	31	31	32	32	36
R_17	459783	459783	481464	481464	486029	R_17	29	29	30	30	33
R_18	550036	550036	575963	575963	579227	R_18	23	23	25	25	27
R_19	562911	562911	589048	589048	592276	R_19	23	23	24	24	27
R_20	562911	562911	589048	589048	592276	R_20	23	23	24	24	27
R_21	575786	575786	602132	602132	605325	R_21	23	23	24	24	27
R_22	585880	585880	614972	614972	621979	R_22	22	22	23	23	25
R_23	585880	585880	614972	614972	621979	R_23	22	22	23	23	25
R_24	594110	594110	622414	622414	626985	R_24	22	22	23	23	25
R_25	598754	598754	628056	628056	635028	R_25	21	21	22	22	25
R_26	598754	598754	628056	628056	635028	R_26	21	21	22	22	25
R_27	606985	606985	635498	635498	640033	R_27	22	22	23	23	25
R_28	606985	606985	635498	635498	640033	R_28	22	22	23	23	25
R_29	619859	619859	648583	648583	653082	R_29	21	21	22	22	25
R_30	621723	621723	653981	653981	664731	R_30	20	20	21	21	23
R_31	630042	630042	661514	661514	669828	R_31	20	20	21	21	23
R_32	630042	630042	661514	661514	669828	R_32	20	20	21	21	23
R_33	642916	642916	674599	674599	682876	R_33	20	20	21	21	23
R_34	642916	642916	674599	674599	682876	R_34	20	20	21	21	23
R_35	658913	658913	689668	689668	692675	R_35	20	20	21	21	23
R_36	665973	665973	700615	700615	712671	R_36	19	19	20	20	21
R_37	671787	671787	702753	702753	705724	R_37	19	19	20	20	23
R_38	671787	671787	702753	702753	705724	R_38	19	19	20	20	23
R_39	683738	683738	716365	716365	721622	R_39	19	19	20	20	22
R_40	683738	683738	716365	716365	721622	R_40	19	19	20	20	22
R_41	684662	684662	715837	715837	718772	R_41	19	19	20	20	23
R_42	694668	694668	728585	728585	735336	R_42	18	18	19	19	21
R_43	694668	694668	728585	728585	735336	R_43	18	18	19	19	21
R_44	696612	696612	729449	729449	734671	R_44	19	19	20	20	22
R_45	696612	696612	729449	729449	734671	R_45	19	19	20	20	22
R_46	696612	696612	729449	729449	734671	R_46	19	19	20	20	22
R_47	696612	696612	729449	729449	734671	R_47	19	19	20	20	22
R_48	707543	707543	741670	741670	748385	R_48	18	18	19	19	21
R_49	707543	707543	741670	741670	748385	R_49	18	18	19	19	21
R_50	708563	708563	743061	743061	750569	R_50	18	18	19	19	21
R_51	709487	709487	742534	742534	747719	R_51	19	19	19	19	22
R_52	709487	709487	742534	742534	747719	R_52	19	19	19	19	22
R_53	719493	719493	755282	755282	764283	R_53	18	18	18	18	20
R_54	719493	719493	755282	755282	764283	R_54	18	18	18	18	20
R_55	719581	719581	755373	755373	764374	R_55	18	18	18	18	20
R_56	719581	719581	755373	755373	764374	R_56	18	18	18	18	20
R_57	721437	721437	756145	756145	763618	R_57	18	18	19	19	21
R_58	721437	721437	756145	756145	763618	R_58	18	18	19	19	21
R_59	730423	730423	767502	767502	777997	R_59	17	17	18	18	20
R_60	732368	732368	768366	768366	777331	R_60	18	18	18	18	20
R_61	732368	732368	768366	768366	777331	R_61	18	18	18	18	20
R_62	732456	732456	768458	768458	777423	R_62	18	18	18	18	20
R_63	732456	732456	768458	768458	777423	R_63	18	18	18	18	20

R_64	734312	734312	769230	769230	776666	R_64	18	18	19	19	21
R_65	744406	744406	782070	782070	793321	R_65	17	17	18	18	19
R_66	744406	744406	782070	782070	793321	R_66	17	17	18	18	19
R_67	755336	755336	794290	794290	807035	R_67	17	17	17	17	19
R_68	755336	755336	794290	794290	807035	R_68	17	17	17	17	19
R_69	757281	757281	795154	795154	806369	R_69	17	17	18	18	19
R_70	757281	757281	795154	795154	806369	R_70	17	17	18	18	19
R_71	780249	780249	821078	821078	836073	R_71	16	16	17	17	18

D	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6
I_1	0	504	800	4800	5900	1100
I_2	1900	0	350	2500	2800	2100
I_3	5500	2000	0	4500	3200	6400
I_4	2900	1860	3350	0	1070	5200
I_5	612	460	920	100	0	4000
I_6	2100	1232	12000	2900	0	0

ANEXO B

Este anexo apresenta todos os comandos de ajustes do GAMS utilizados na execução de todos os cenários.

CPLEX OPTIONS		
advind	advanced basis indicator	OFF
aggfill	aggregator fill limit	10
aggregate	aggregator indicator	ON
backtracking	backtracking parameter	8.500000e-001
basisfreq	frequency basis saving	2100000000
branch	branching direction	UP
cliques	clique cut generation	AUTOMATIC
coeredind	mip coefficient reduction	n1
covers	over cut generation	AUTOMATIC
crash	crash ordering	DEFAULT
cutlow	lower cutoff	1.000000e+075
cutup	upper cutoff	1.000000e+075
depind	dependency checker	0
dgradient	dual pricing algorithm	AUTOMATIC
doperturb	perturbation indicator	OFF
feasibtol	feasibility tolerance	1.000000e-006
heuristic	mip strategy heuristic	AUTOMATIC
iis	algorithm indicator	FASTER
integral	integrality tolerance	1.000000e-005
intsolutionlim	integer solutions limit	10000
iterationlim	iteration limit, ITERLIM	100000000
lpdisplaylev	amount of info printed	EACHREINVERSION
markowitz	pivot tolerance	1,00E+04
mipabsgap	absolute duality gap, OPTCA	0.000000e+000
mipdisplayint	node log interval	100
mipdisplaylev	node log control	NODES
mipgap	relative duality gap, OPTCR	1.000000e-005
nodelim	node limit	100000
nodeselect	node selection strategy	BESTBOUND
objectivedif	objective difference	0.000000e+000
objllim	lower limit objective	1.000000e+075
objulim	upper limit objective	1.000000e+075
opttol	optimality tolerance	1.000000e-006
perturbpar	perturbation constant	1.000000e-004
pgradient	primal pricing algorithm	HYBRID REDUCED COST/DEVEX
presolve	presolve indicator	ON

pricelist	size pricing candidate list	0
priorities	accept priorities	YES
priorities	priority order indicator	ON
refactor	refactorization frequency	0
reobjectivedif	relative obj difference	0.000000e+000
scale	scaling method	STANDARD
scansos	SOS Type 3 scanning	OFF
setrcfixind	reduced cost fixing	USED
singularity	singularity limit	10
sosminsz	minimum size of sos3 set	2
startalg	start problem algorithm	PRIMAL
subalg	subproblem algorithm	DUAL
timelimit	time limit, RESLIM	1.000000e+005
treememory	treememory limit	1.000000e+075
variableselect	variable selection parameter	AUTOMATIC

ANEXO C - CÓDIGO FONTE DO MODELO 2

```

$ TITLE Modelo ONO5P3N (ONO , SEQ=1)
$ OFFUPPER
* DATA : 11 de fevereiro de 2001. versao 1.7
* CPLEX COM PRIOR. EM R
* 5 PORTOS, 113 ROTAS E 3 NAVIOS
* Minimiza o tamanho do arquivo de saida
*
* INDICES
*

```

```

=====
*
=====

```

SETS

```

  I portos de origem / I_1 * I_5 /
  J portos de destino / J_1 * J_5 /
  R rotas           / R_1 * R_113 /
  K navios          / K_1 * K_3 /
  L trechos         / L_1 * L_9 /
;

```

```

ALIAS (Li,L);
ALIAS (Lj,L);
ALIAS (Lo,L);
ALIAS (Loo,L);

```

SCALARS

```

  NPORTOS quantidade de portos / 5 /

```

* PARAMETROS

```

=====
TABLE T(R,L) sequencia de portos da rota r
$include "5P3N_T.prn"
;

```

```

PARAMETER TR(R,L) reverso da tabela T

```

```

LOOP (R,
  LOOP (L,
    LOOP (Lo$( ORD(Lo) EQ 2*NPORTOS -ORD(L) ),
      TR(R,L) = T(R,Lo)
    )
  )
)

```

```
);
);
);
```

```
TABLE C(R,K) custo da rota r operado pelo navio k
$include "5P3N_C.prn"
;
```

```
TABLE D(I,J) demanda anual do porto i para j
$include "5P3N_D.prn"
;
```

```
TABLE N(R,K) numero maximo de viagens
$include "5P3N_N.prn"
;
```

```
PARAMETER CAP(K) capacidade do navio k;
CAP('K_1') = 670 ;
CAP('K_2') = 900 ;
CAP('K_3') = 1400 ;
```

```
PARAMETER VO(L) vetor auxiliar para indicar inicio;
VO('L_1') = 1;
VO('L_2') = 2;
VO('L_3') = 3;
VO('L_4') = 4;
VO('L_5') = 5;
VO('L_6') = 4;
VO('L_7') = 3;
VO('L_8') = 2;
VO('L_9') = 1;
```

```
PARAMETER VI(L) vetor auxiliar para indicar inicio;
VI('L_1') = 1;
VI('L_2') = 1;
VI('L_3') = 1;
VI('L_4') = 1;
VI('L_5') = 5;
VI('L_6') = 5;
VI('L_7') = 5;
VI('L_8') = 5;
VI('L_9') = 5;
```

```
PARAMETER VF(L) vetor auxiliar para indicar fim;
```

```

VF('L_1') = 5;
VF('L_2') = 5;
VF('L_3') = 5;
VF('L_4') = 5;
VF('L_5') = 9;
VF('L_6') = 9;
VF('L_7') = 9;
VF('L_8') = 9;
VF('L_9') = 9;

```

```
* VARIAVEIS
```

```
*
```

```
=====
VARIABLES
```

```
  X(K,R)  binaria se escolhe a rota r para o navio k
```

```
  M(R,K,I,J) quantidade de containers movimentado de i para j na rota r pelo navio k
```

```
  CT      valor da funcao de merito
```

```
;
```

```
POSITIVE VARIABLE M;
```

```
*SOS1 VARIABLE X(K,R);
```

```
BINARY VARIABLE X;
```

```
*X.LO(K,R) = 0;
```

```
*X.UP(K,R) = 1;
```

```
* EQUACOES
```

```
=====
EQUATIONS
```

```
  FOBJ      funcao objetivo
```

```
  EXCL(K)   exclusividade da embarcacao
```

```
  DEMANDA(I,J) atendimento da demanda
```

```
  VINCULO(R,K) correlacao de vinculo
```

```
  CAPAC(R,K,L) capacidade do navio k no trecho l da rota r
```

```
;
```

```
FOBJ ..
```

```
  CT
```

```
  =E=
```

```
  SUM ( (R,K) , C(R,K)*X(K,R) )
```

```
;
```

```
EXCL(K) ..
```

```
  SUM ( R , X(K,R) )
```

```

=E=
1
;

DEMANDA(I,J) ..
SUM ( (R,K) , N(R,K)*M(R,K,I,J) )
=E=
D(I,J)
;

VINCULO(R,K) ..
SUM( (I,J) , M(R,K,I,J) )
=L=
X(K,R) * SUM ( (I,J) , D(I,J) )
;

CAPAC(R,K,L) $ ( T(R,L) EQ 1 ) ..
* parcela 1
SUM (
(I,J,Lj) $
(
( ORD(Lj) GE ORD(L)+1 )$( ORD(Lj) LE VF(L) ) $
( ORD(I) EQ VO(L) ) $
( ORD(J) EQ VO(Lj) )
)
,
M(R,K,I,J)*
( T(R,Lj) OR TR(R,Lj) )
) +
* parcela 2
SUM (
(I,J,Lj) $
(
( ORD(Lj) GE VI(L) )$( ORD(Lj) LE ORD(L)-1 ) $
( ORD(I) EQ VO(L) ) $
( ORD(J) EQ VO(Lj) )
)
,
M(R,K,I,J)*
( T(R,Lj) OR TR(R,Lj) ) *
( NOT(TR(R,L)) )
) +
* parcela 3
SUM (

```

```

(I,J,Li,Lj) $
(
  ( ORD(Li) GE VI(L) )$( ORD(Li) LE ORD(L)-1 ) $
  ( ORD(Lj) GE ORD(L)+1 )$( ORD(Lj) LE VF(L) ) $
  ( ORD(I) EQ VO(Li) ) $
  ( ORD(J) EQ VO(Lj) )
)
,
M(R,K,I,J)*
( T(R,Li) OR TR(R,Li) )*
( T(R,Lj) OR TR(R,Lj) )
)+
* parcela 4
SUM (
  (I,J,Li,Lj) $
  (
    ( ORD(Li) GE VI(L) )$( ORD(Li) LE ORD(L)-1 ) $
    ( ORD(Lj) GE ORD(L)+1 )$( ORD(Lj) LE VF(L) ) $
    ( ORD(I) EQ VO(Li) ) $
    ( ORD(J) EQ VO(Lj) )
  )
  ,
  M(R,K,I,J)*
  ( T(R,Li) )*
  ( NOT(TR(R,Li)) )*
  ( T(R,Lj) OR TR(R,Lj) )
)+
* parcela 5
SUM (
  (I,J,Li,Lj) $
  (
    ( ORD(Li) GE VI(L) )$( ORD(Li) LE ORD(L)-1 ) $
    ( ORD(Lj) GE ORD(Lj)+1 )$( ORD(Lj) LE ORD(L)-1 ) $
    ( ORD(I) EQ VO(Li) ) $
    ( ORD(J) EQ VO(Lj) )
  )
  ,
  M(R,K,I,J)*
  ( T(R,Li) OR TR(R,Li) )*
  ( NOT(T(R,Lj)) )*
  ( TR(R,Lj) )
)+

```

* parcela 6

```

SUM (
  (I,J,Li,Lj) $
  (
    ( ORD(Li) GE ORD(L)+1 )$( ORD(Li) LE VF(L) ) $
    ( ORD(Lj) GE ORD(L)+1 )$( ORD(Lj) LE VF(L) ) $
    ( ORD(I) EQ VO(Li) ) $
    ( ORD(J) EQ VO(Lj) )
  )
  ,
  M(R,K,I,J)*
  ( TR(R,Li) )*
  ( NOT(T(R,Li)) )*
  ( T(R,Lj) OR TR(R,Lj) )
)+

```

* parcela 7

```

SUM (
  (I,J,Li,Lj) $
  (
    ( ORD(Li) GE ORD(L)+1 )$( ORD(Li) LE VF(L) ) $
    ( ORD(Lj) GE ORD(L)+1 )$( ORD(Lj) LE ORD(Li)-1 ) $
    ( ORD(I) EQ VO(Li) ) $
    ( ORD(J) EQ VO(Lj) )
  )
  ,
  M(R,K,I,J)*
  ( T(R,Li) OR TR(R,Li) )*
  ( T(R,Lj) )*
  ( NOT(TR(R,Lj)) )
)

```

```

=L=
CAP(K)

```

;

* MODEL E SOLVE

```

=====
MODEL ONO5P3N /ALL/ ;

```

```

OPTION MIP = cplex ;
OPTION ITERLIM = 1000000 ;
OPTION RESLIM = 100000.0 ;

```

```
OPTION OPTCR = 0.00001 ;
ONO5P3N.OPTFILE = 1 ;
```

```
LOOP (R,
  X.prior(K,R) = ORD(R) ;
);
```

* matar variaveis inexistentes

```
M.FX(R,K,I,J) $ (D(I,J) EQ 0) = 0 ;
LOOP (R,
  LOOP (Lo,
    LOOP (Loo$(ORD(Loo) EQ (2*NPORTOS - ORD(Loo))),
      IF ( ( (T(R,Lo)=0)AND(T(R,Loo)=0) ),
        M.FX(R,K,I,J)$ (ORD(I) EQ VO(Lo)) = 0 ;
        M.FX(R,K,I,J)$ (ORD(J) EQ VO(Lo)) = 0 ;
      );
    );
  );
);
```

SOLVE ONO5P3N USING MIP MINIMIZING CT ;

* Variaveis
*

```
=====
* Saida variavel Trns
FILE saidaono5P3N ;
PUT saidaono5P3N ;
```

```
PUT 'Variavel M' /;
LOOP (R,
  LOOP (K,
    LOOP (I,
      LOOP (J,
        IF ( M.L(R,K,I,J) NE 0,
          PUT R.TL ;
          PUT @10 , K.TL ;
          PUT @20 , I.TL ;
          PUT @30 , J.TL ;
          PUT @40 , M.L(R,K,I,J) :0:2 ;
          PUT @50 , N(R,K) :0:2 /;
        );
      );
    );
  );
```

```

    );
  );
);
);

PUT //;

PUT 'Variavel X' /;
LOOP (R,
  LOOP (K,
    IF ( X.L(K,R) NE 0,
      PUT R.TL ;
      PUT @10 , K.TL ;
      PUT @20 , X.L(K,R) /;
    );
  );
);

PUT //;

PUT 'restricao de capacidade' /;
LOOP (R,
  LOOP (K,
    LOOP (L,
      IF ( CAPAC.L(R,K,L) NE 0,
        PUT R.TL ;
        PUT @10 , K.TL ;
        PUT @20 , L.TL ;
        PUT @30 , CAPAC.L(R,K,L) :0:2 /;
      );
    );
  );
);
);
PUT //;
PUT 'funcao objetivo' /;
PUT CT.L;

```