

**DANIEL AMORIM DE ALMEIDA**

**ESTUDO DE PLANEJAMENTO PARA O TRANSPORTE  
MARÍTIMO DE DERIVADOS DO PETRÓLEO**

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

São Paulo  
2004

**DANIEL AMORIM DE ALMEIDA**



Universidade de São Paulo  
Instituto de Física de São Carlos

FD - 3806

**ESTUDO DE PLANEJAMENTO PARA O TRANSPORTE  
MARÍTIMO DE DERIVADOS DO PETRÓLEO**

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

Área de concentração:  
Engenharia Naval e Oceânica

Orientador:  
Prof. Dr. Marco Antonio Brinati

São Paulo  
2004

30/11/2019

A meus pais e minha namorada que me apoiaram em todas as etapas deste trabalho.

## AGRADECIMENTOS

Ao orientador e colega Prof. Dr. Marco A. Brinati pela orientação e pela atenção e tratamento exemplares em todas as fases de elaboração da pesquisa.

Ao Prof. Dr. Jorge Eduardo Leal Medeiros, colega de trabalho e amigo, pelo estímulo à entrada no programa de mestrado da escola e pelo contínuo auxílio e compreensão em favor da pesquisa.

## RESUMO

O presente trabalho aborda um estudo de planejamento de médio prazo para o transporte marítimo de derivados do petróleo, que abrange diversas configurações de viagens realizadas por navios petroleiros. Estas viagens contemplam o transporte de múltiplos produtos a partir de múltiplas origens para múltiplos destinos.

Pretende-se avaliar, frente a demandas e ofertas agregadas que cobrem um período de um ano, como a solução medida em custo mínimo é influenciada pela escolha de configurações pré-estabelecidas de viagem.

Foi feita uma pesquisa bibliográfica para encontrar subsídios para a resolução do problema, porém pouco se encontra quanto ao tema planejamento. No entanto, algumas referências abordam a composição de viagens, mostrando-se úteis para a pesquisa.

Para a modelagem do problema, são utilizados modelos em programação linear inteira mista, responsáveis pela seleção de viagens que resultem no menor custo de transporte para o atendimento da demanda no período. Dada a dificuldade da obtenção de solução exata quando se consideram todas as viagens de uma determinada classe, as viagens candidatas para compor a solução são geradas *a priori* através de procedimentos heurísticos específicos.

Partindo de uma versão simplificada do problema, foram sendo construídos modelos para versões mais complexas para fins de comparação de resultados. Tais modelos foram aplicados a um estudo de caso, sendo suas implementações computacionais realizadas na linguagem de alto nível GAMS (*Generic Algebraic Modelling System*) - Sistema Geral de Modelagem Algébrica.

Devido à complexidade do problema, a intenção não é de obter solução ótima e sim, soluções aproximadas que forneçam subsídios para tomada de decisões em planos de transporte. Assim, a técnica de modelagem desenvolvida mostra-se bastante adequada ao problema estudado, permitindo implantar planos de transporte viáveis. Além disto, os seus resultados servem de base para os estudos de programação de frota (*ship scheduling*), associados a horizontes de tempo mais curtos.

## ABSTRACT

This present work approaches a study of medium-term planning for petroleum byproducts shipping, which encloses several voyage configurations achieved by oil vessels. The transportation of multiple-products from multiple-origins to multiple-destinations is the scope of this work.

It is intended to evaluate, with demands and supplies covering a one-year-period, as the solution measured in minimum cost is influenced by changing voyage configurations established beforehand.

A bibliographical research was accomplished in order to find publications that could provide with subsidies for the problem resolution, but not much is found on medium-term planning. Nevertheless, some references approach voyage composition, revealing useful for the research.

To model the problem, mixed integer programming is used. The models are responsible for selecting voyages that provide system with the minimum cost for attendance of the demand in the entire period. Once it is difficult to find optimum solution for the problem when all voyages of a kind are considered, candidate voyages to compose the solution are generated *a priori* through specific heuristic procedures.

From a simplified vision of the problem, models more complexes have been built so that result comparisons can be done to one another. Such a models are applied in a case study and their implementations are made in the high level language GAMS – Generic Algebraic Modelling System.

Due to complexity of the problem, it is not intended to obtain optimum solution, but sub optimum ones that help decision-making process in transport plans. Therefore, the developed modelling technique reveals adequate for the problem, allowing implanting feasible transport plans. Moreover, its results serve as basis for ship scheduling studies, which are related to shorter time periods.

## SUMÁRIO

### LISTA DE FIGURAS

### LISTA DE TABELAS

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Introdução e objetivos.....	1
1.2	Delineamento do trabalho.....	6
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1	Introdução.....	7
2.2	Publicações.....	7
2.3	Conclusão.....	30
3	MODELAGEM DO PROBLEMA.....	32
3.1	Modelo simples.....	33
3.2	Geração de viagens compostas.....	40
3.3	Modelo composto 1.....	41
3.4	Modelo composto 2.....	44
3.5	Modelo composto 3.....	47
3.6	Modelo composto 4.....	50
3.7	Modelo composto 5.....	53
3.8	Generalização da modelagem.....	56
4	ESTUDO DE CASO.....	60
4.1	Dados para o estudo de caso.....	60
4.2	Caso 1: viagens simples.....	65
4.3	Caso 2: viagens do modelo composto 1.....	68
4.4	Caso 3: viagens do modelo composto 2.....	69
4.5	Caso 4: viagens do modelo composto 3.....	71

4.6	Caso 5: viagens do modelo composto 4 .....	73
4.7	Caso 6: viagens do modelo composto 5 .....	75
4.8	Comentários finais sobre o estudo de caso .....	75
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES.....	77
5.1	Da pesquisa.....	77
5.2	Dos resultados obtidos .....	75
5.3	Das extensões e recomendações.....	75
	ANEXO A – MODELOS NA LINGUAGEM DO GAMS .....	80
	ANEXO B – RELAÇÃO DE VIAGENS DAS SOLUÇÕES DOS CASOS PROCESSADOS .....	98
	LISTA DE REFERÊNCIAS .....	116



## LISTA DE FIGURAS

<a href="#">Fig. 1.1 – Diagrama de contexto da modelagem</a> .....	4
<a href="#">Fig. 1.2 – Exemplos de composições de viagens</a> .....	5
<a href="#">Fig. 3.1 – Viagem simples</a> .....	33
<a href="#">Fig. 3.2 – Fluxo de processos para a busca de soluções</a> .....	40
<a href="#">Fig. 3.3 – Viagem composta do modelo composto 1</a> .....	42
<a href="#">Fig. 3.4 – Viagem composta do modelo composto 2</a> .....	44
<a href="#">Fig. 3.5 – Viagem composta do modelo composto 3</a> .....	47
<a href="#">Fig. 3.6 – Viagem composta do modelo composto 4</a> .....	51
<a href="#">Fig. 3.7 – Viagem composta do modelo composto 5</a> .....	54
<a href="#">Fig. 4.1 – Localização geográfica dos terminais</a> .....	61
<a href="#">Fig. 4.2 – Tipo de viagem do caso 1</a> .....	65
<a href="#">Fig. 4.3 – Tipos de viagem do caso 2</a> .....	68
<a href="#">Fig. 4.4 – Tipos de viagem do caso 3</a> .....	70
<a href="#">Fig. 4.5 – Tipos de viagem do caso 4</a> .....	71
<a href="#">Fig. 4.6 – Tipos de viagem do caso 5</a> .....	74
<a href="#">Fig. 4.7 – Tipos de viagem do caso 6</a> .....	75

## LISTA DE TABELAS

<u>Tabela 4.1 – Terminais e produtos</u> .....	61
<u>Tabela 4.2 – Demanda e oferta de produtos nos terminais</u> .....	62
<u>Tabela 4.3 – Classes e capacidades dos navios</u> .....	62
<u>Tabela 4.4 – Tancagens nos terminais de descarregamento</u> .....	63
<u>Tabela 4.5 – Compatibilidade entre os calados dos navios e nos portos</u> .....	63
<u>Tabela 4.6 – Principais parâmetros do modelo</u> .....	64
<u>Tabela 4.7 – Custos de utilização dos terminais (em milhares de reais)</u> .....	64
<u>Tabela 4.8 – Tempos de viagens entre terminais (em horas)</u> .....	64
<u>Tabela 4.9 – Produtos ofertados e demandados nos terminais</u> .....	66
<u>Tabela 4.10 – Implementações do caso 1</u> .....	67
<u>Tabela 4.11 – Implementações do caso 2</u> .....	69
<u>Tabela 4.12 – Implementações do caso 3</u> .....	70
<u>Tabela 4.13 – Implementações do caso 4</u> .....	72
<u>Tabela 4.14 – Implementações do caso 4 (continuação)</u> .....	73
<u>Tabela 4.15 – Implementações do caso 5</u> .....	74
<u>Tabela 4.16 – Implementações do caso 6</u> .....	75
<u>Tabela A1 – Viagens selecionadas do subcaso 1.4</u> .....	98
<u>Tabela A2 – Viagens selecionadas do caso 2</u> .....	99
<u>Tabela A3 – Viagens selecionadas do subcaso 3.1</u> .....	100
<u>Tabela A4 – Viagens selecionadas do subcaso 3.2</u> .....	101
<u>Tabela A5 – Viagens selecionadas do subcaso 3.3</u> .....	102
<u>Tabela A6 – Viagens selecionadas do subcaso 3.4</u> .....	103
<u>Tabela A7 – Viagens selecionadas do subcaso 4.1</u> .....	104

<u>Tabela A8 – Viagens selecionadas do subcaso 4.2.....</u>	105
<u>Tabela A9 – Viagens selecionadas do subcaso 4.3.....</u>	106
<u>Tabela A10 – Viagens selecionadas do subcaso 4.4 .....</u>	107
<u>Tabela A11 – Viagens selecionadas do subcaso 4.5 .....</u>	108
<u>Tabela A12 – Viagens selecionadas do subcaso 4.6 .....</u>	109
<u>Tabela A13 – Viagens selecionadas do subcaso 4.7 .....</u>	110
<u>Tabela A14 – Viagens selecionadas do subcaso 4.8 .....</u>	111
<u>Tabela A15 – Viagens selecionadas do subcaso 5.1 .....</u>	112
<u>Tabela A16 – Viagens selecionadas do subcaso 5.2 .....</u>	113
<u>Tabela A17 – Viagens selecionadas do subcaso 6.1 .....</u>	114
<u>Tabela A18 – Viagens selecionadas do subcaso 6.2 .....</u>	115
<u>Tabela A19 – Viagens selecionadas do subcaso 6.3 .....</u>	115
<u>Tabela A20 – Viagens selecionadas do subcaso 6.4 .....</u>	115

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Introdução e objetivos

O Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da EPUSP - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – foi contratado recentemente pela Petrobrás para estudar o problema da programação do transporte de derivados do petróleo na costa brasileira, comumente conhecido como transporte de cabotagem. O estudo ficou concentrado mais na criação de um sistema informatizado que auxiliasse os programadores nas operações diárias de programação de navios, agilizando, assim, a tomada de decisões no que tange ao abastecimento das regiões de consumo dos produtos a curto prazo. A companhia utiliza frota própria, bem como embarcações afretadas de armadores estrangeiros.

Paralelamente, a partir das análises das programações realizadas em um dado período, deu-se início a uma pesquisa acadêmica sobre o planejamento do transporte de cabotagem que pudesse fornecer diretrizes básicas para a programação de tais atividades. No planejamento, trabalha-se com um horizonte de prazo mais longo (por exemplo, um ano) e com demandas e ofertas agregadas, buscando-se responder perguntas como: a partir de que terminal de oferta de um produto  $p$  deve ser abastecido o terminal  $d$  que tem demanda por este produto; que navio deve ser utilizado nesta tarefa, etc.

Esta pesquisa foi inicialmente trabalhada por estudantes de graduação do curso de Engenharia Naval da EPUSP que trataram o problema de forma simplificada e obtiveram resultados condizentes com as hipóteses consideradas. Estes trabalhos envolveram uma iniciação científica – Niro (2002) - e, posteriormente, um trabalho de formatura – Nishida (2002).

A pesquisa sobre o tema planejamento torna-se importante devido ao fato de propor melhorias na estrutura de viagens de uma companhia marítima com base na padronização dos roteiros executados por navios de sua frota e na possibilidade de reduzir custos para o sistema de transporte como um todo. O segundo aspecto é continuamente procurado pelas empresas, ainda mais aquelas pertencentes ao setor marítimo, uma vez que as atividades associadas ao transporte apresentam gastos elevados, como pode ser observado nas operações do dia-a-dia de um navio tanto no mar como nos portos que visita. Dentre os

custos mais comuns, tem-se, por exemplo, os custos inerentes a combustíveis e óleos em geral consumidos pelos navios durante as viagens e quando da atracação e desatracação nos portos, os custos decorrentes de paradas dos navios nos portos devido, sobretudo, à utilização de facilidades portuárias para embarque e descarga de mercadorias, os custos de manutenção de estoque nos terminais, entre outros.

Ao se fazer uma pesquisa sobre publicações envolvendo transporte marítimo, são encontrados, na maioria, trabalhos em que os autores se preocupam com a programação da frota, ou seja, propõem modelos de transporte marítimo para horizontes de prazo mais curtos (no nível operacional), como podem ser vistos nos trabalhos de Fagerholt; Christiansen (2000b), Fisher; Rosenwein (1989), entre outros. Este enfoque estabelece que os lotes de cargas entre pares de portos (origem e destino de determinado produto) já estão de alguma maneira definidos, isto é, já se sabe previamente a quantidade a ser transportada entre um porto de origem e o porto de destino correspondente. Os autores não citam nem introduzem os aspectos do planejamento que levaram ao estudo da programação, o que torna o planejamento uma área bem menos explorada em termos de modelos de transporte. Os poucos trabalhos encontrados na literatura com foco nos níveis estratégico e tático baseiam-se exclusivamente no dimensionamento e composição de frota de embarcações, o que difere do problema apresentado nesta pesquisa, já que a frota se encontra estabelecida.

O sistema de transporte de derivados na costa brasileira tem as seguintes características: de um lado aparecem os terminais de carregamento dos produtos, situados juntos ou próximos a refinarias e, do outro, os terminais onde há descarregamento dos produtos com a finalidade de abastecer as regiões desprovidas de refinarias, ou em que a produção local não atenda a demanda local. Para a realização deste transporte é empregada uma frota de embarcações para granel líquido.

O planejamento e a programação deste transporte são uma tarefa bastante complexa, pois, em geral, quando ocorre a necessidade de retirada de um produto de um terminal para abastecer outro local, não é possível, devido às condições de tancagem desse produto no terminal de destino, “lotar” um navio somente com esse produto, o que pode levar à escolha de outros portos na rota, para também serem abastecidos com o mesmo produto, ou ainda levar outros produtos para o destino inicial, apesar dos estoques lá existentes poderem ainda

abastecer a região por algum tempo. Uma combinação dessas ações também é viável, ou seja, carregar um navio com diversos produtos e abastecer diversos portos da rota.

Além das considerações relativas aos produtos que demandam transporte, às origens e aos destinos, e, portanto, às rotas possíveis, há ainda que se considerar quais embarcações usar entre as disponíveis, com suas distintas características operacionais e capacidades de transportar produtos diferentes.

Diante deste quadro complexo, o objetivo desta pesquisa é apresentar modelos que contribuam para o planejamento do transporte de derivados do petróleo na costa brasileira, discutindo as características relativas à operação, bem como as hipóteses admitidas. Pretende-se avaliar, frente a demandas e ofertas agregadas que cobrem um período de cerca de um ano, como a solução medida em custo mínimo é influenciada pela escolha de configurações pré-estabelecidas de viagem. Ao mesmo tempo, pretende-se resolver o problema de alocação dos navios da frota às viagens potencialmente melhores e determinar as quantidades transportadas em cada umas destas viagens.

O custo mencionado envolve apenas a parcela referente ao transporte dos produtos e desconsidera a parcela de custo associada aos estoques nos terminais de descarregamento dos produtos. Caso este último fosse considerado, possivelmente haveria a necessidade de avaliar a construção de maiores tancagens nos terminais de descarregamento, o que certamente resultaria na redução do custo de transporte; no entanto, essa vantagem deveria ser comparada com o custo decorrente da ampliação da tancagem nos terminais e do aumento do custo de manutenção de estoque (*inventory cost*).

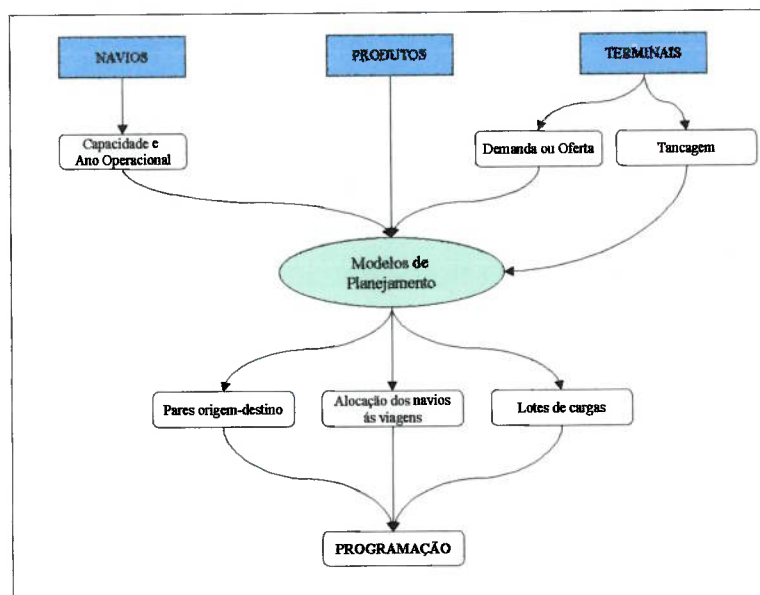
Não se pretende obter uma solução ótima para o problema como um todo, mas encaminhar uma solução que forneça subsídios para melhoras nas operações atuais. Já que se trabalha com um período de tempo mais longo, nota-se o aspecto tático, ou até mesmo estratégico, do estudo supracitado, não correspondendo, então, ao nível operacional, cujo enfoque é tratado pela programação de navios (*ship scheduling*).

A pesquisa irá explorar alternativas de modelo do sistema de transporte baseando-se em programação linear inteira mista que se caracterizarão por escolher o melhor conjunto de viagens, dentre as candidatas pré-selecionadas em um passo anterior, que atendam o objetivo do modelo. Considerando que o conjunto de soluções potenciais é muito grande dada a natureza combinatória do problema (múltiplos terminais e múltiplos produtos),

propõe-se utilizar procedimentos heurísticos particulares para a geração das viagens candidatas.

Como forma adicional de esclarecer o objetivo desta pesquisa, apresenta-se um diagrama contextual (figura 1.1) que esquematiza a interação entre os modelos de planejamento aqui propostos e a programação de navios. Os resultados dos modelos de planejamento, representados pelas setas que saem da forma a eles associada no diagrama, após as devidas análises, servirão como base para estudos de programação, bastante explorados na área marítima.

Os modelos de planejamento podem conter várias configurações de viagens para os navios realizarem, proporcionando uma eficiência variável que reflete os custos para toda a operação de transporte.



**Fig. 1.1 – Diagrama de contexto da modelagem**

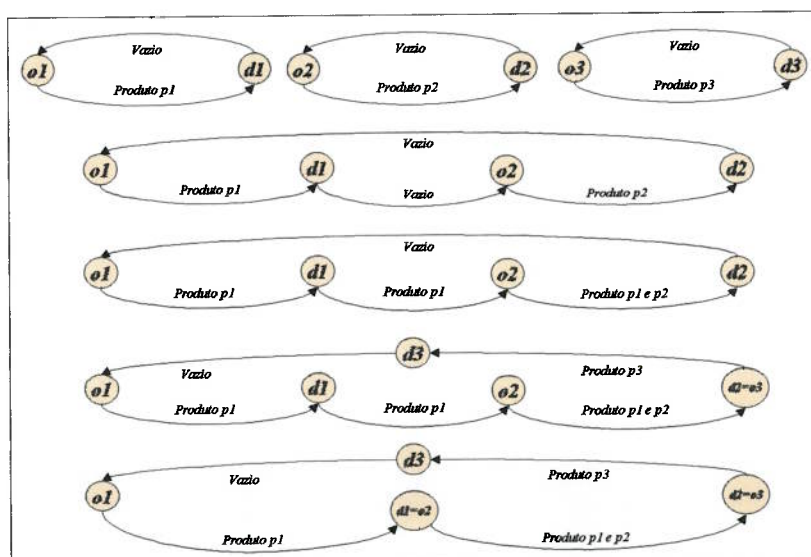
Nesta pesquisa são bastante citados os termos *viagem simples* e *viagem composta*. Viagem simples refere-se à uma viagem que contempla o transporte de um produto  $p$  por um navio de classe  $s$  a partir de um terminal  $o$  com oferta de  $p$  para um terminal  $d$  com demanda deste produto, e por fim, o navio retorna em vazio para o terminal  $o$ . Viagem composta nada mais é que a ampliação de uma viagem simples com respeito à introdução de qualquer nova característica, como um novo produto ou terminal, podendo ainda ser resultado da combinação de duas ou mais viagens simples. Para compreender o significado

destes dois conceitos, apresenta-se um exemplo ilustrativo na figura 1.2, que relaciona algumas possibilidades de viagens compostas a partir da combinação de três viagens simples.

Admita-se que haja três viagens simples e que em cada uma ocorra o transporte de um produto ( $p_1$ ,  $p_2$  ou  $p_3$ ) a partir de um porto de origem ( $o_1$ ,  $o_2$  ou  $o_3$ ) até um porto de destino ( $d_1$ ,  $d_2$  ou  $d_3$ ), e depois haja o retorno do navio em vazio ao porto de origem. Supondo que um mesmo navio tenha que realizar estas três viagens, propõe-se inicialmente combinar duas simples de tal forma que o navio ao invés de retornar em vazio do terminal  $d_1$  para o terminal  $o_1$ , prossiga para um outro terminal  $o_2$ , onde carrega-se um produto  $p_2$  para ser transportado ao destino  $d_2$ . Se for observado que o terminal de destino  $d_2$  da segunda viagem simples também possui demanda do produto  $p_1$ , o navio poderá também transportá-lo a este novo terminal.

Admitindo ainda que o destino  $d_2$  eventualmente possa ser um terminal de oferta de um produto  $p_3$ , ou seja,  $d_2 = o_3$ , acrescenta-se então o terminal de destino  $d_3$  no circuito, introduzindo-se assim a terceira viagem simples. Ou ainda, considerar que o terminal  $o_1$  demande tal produto  $p_3$  ( $o_1 = d_3$ ).

Abrindo espaço para mais uma extensão, identifica-se o caso em que o terminal de destino  $d_1$  e o terminal de origem  $o_2$  se tratam do mesmo porto.



**Fig. 1.2 – Exemplos de composições de viagens**



Com este exemplo relativamente simples, percebe-se haver inúmeras possibilidades de se combinar viagens simples tornando-as viagens compostas. Com base no que foi exposto, é possível extrair muitas outras configurações de roteiros, o que pode favorecer, ou não, a redução do custo de transporte frente a configurações já analisadas.

Portanto, é importante circunscrever o problema a ser solucionado de forma a poder-se desenvolver, progressivamente, soluções com graus cada vez maiores de complexidade.

## **1.2 Delineamento do trabalho**

O capítulo 2 contempla a apreciação de trabalhos publicados na área de planejamento, programação e roteirização do transporte de mercadorias, mostrando os tipos de problemas abordados por diversos autores, bem como as técnicas de resolução dos mesmos, com o intuito de se extrair informações importantes para a ordenação e complementação deste trabalho.

No capítulo 3, propõe-se a modelagem do problema para algumas configurações de viagens, bem como uma descrição genérica para modelagem de outras configurações.

No capítulo 4 será feita menção ao estudo de caso desta pesquisa que envolve a distribuição de derivados do petróleo na costa brasileira. Neste capítulo apresentam-se os parâmetros e premissas do problema e os resultados pertinentes aos cenários estudados.

No capítulo 5, apresentam-se as conclusões da pesquisa e os benefícios dos métodos desenvolvidos, além de se levantar possíveis extensões para o problema motivando novas pesquisas na área.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Introdução

A revisão bibliográfica realizada, e que será descrita aqui, partiu de trabalhos e publicações que abordavam temas relacionados ao planejamento, à programação, à roteirização e ao dimensionamento de frota para o transporte marítimo de mercadorias. Estes trabalhos mostram-se importantes no cenário marítimo, pela possibilidade de proporcionarem melhorias no desempenho econômico e reduções nos custos deste tipo de transporte. Esses trabalhos procuram dar visões e esclarecimentos sobre o problema real estudado, apresentando o ambiente operacional envolvido, as variáveis e hipóteses consideradas e, finalmente, a linha de raciocínio para a elaboração e estruturação dos modelos, bem como suas formulações matemáticas. Posteriormente, o método de resolução do problema é apresentado.

As publicações e estudos na área de planejamento e programação de transporte cobrem uma grande variedade de problemas e ambientes operacionais, utilizando uma ampla rede de técnicas de pesquisa operacional. Com isso, esta revisão também visa abranger, de forma genérica, as diversas técnicas utilizadas pelos autores, e suas respectivas análises e conclusões.

### 2.2 Publicações

Appelgren (1969) descreve um algoritmo de geração de colunas (programações candidatas) para um problema de programação de navios que devem transportar um conjunto de cargas contratadas, bem como cargas potencias (ou opcionais) que, de tempo em tempo, tornam-se disponíveis no mercado. O problema é formulado através de três modelos de programação linear. Inicialmente, o problema é tratado como um modelo de fluxo com múltiplos produtos (modelo 1), em que os nós possuem pares de índices  $(k, n)$ , com  $k$  identificando a carga transportada e  $n$  uma das datas alternativas para o seu embarque. A proposta é determinar as variáveis de fluxo  $x(i, j, m, k, n)$  que maximizem as receitas. Se  $x(i, j, m, k, n) = 1$ , o navio  $i$  transportou na viagem anterior a carga  $j$  embarcada em uma de suas datas alternativas  $m$  e transporta na viagem atual a carga  $k$

embarcada em uma de suas datas alternativas  $n$ , caso contrário  $x(i, j, m, k, n) = 0$ . Se  $j = 0$ , a carga  $k$  é a primeira na seqüência de carga para o navio  $i$ , e se  $k = 0$ , a carga  $j$  é a última da seqüência. Se  $j$  e  $k$  são iguais a 0, o navio  $i$  está ocioso por todo o período.

As variáveis de fluxo são definidas apenas para combinações viáveis de  $i, j, m, k$  e  $n$ , ou seja, em que o navio é grande o suficiente e capaz de transportar as cargas  $j$  e  $k$ , e ainda, que o tempo entre as datas de seus embarques seja grande o suficiente para permitir o embarque, a descarga, a viagem com a carga e a viagem em vazio.

Os coeficientes da função objetivo são representados por  $v(i, j, m, k, n)$ . A formulação matemática do problema resulta em:

$$\text{Maximizar } \sum_i \sum_j \sum_m \sum_k \sum_n v(i, j, m, k, n) x(i, j, m, k, n) \quad (2.1a)$$

Sujeito a:

$$\text{Restrições de fluxo } \sum_k \sum_n x(i, j, m, k, n) = \sum_k \sum_n x(i, k, n, j, m) \quad \text{para todo } i, j, m \quad (2.1b)$$

$$\text{Restrições para os navios } \sum_k \sum_n x(i, 0, 0, k, n) = 1 \quad \text{para todo } i \quad (2.1c)$$

$$\text{Restrições para as cargas } \sum_i \sum_j \sum_m \sum_n x(i, j, m, k, n) \begin{cases} \leq 1 \\ = 1 \end{cases} \quad \text{para todo } k \quad (2.1d)$$

(A igualdade na restrição (2.1d) está associada às cargas contratadas).

Além destas restrições, todas as variáveis devem ser não-negativas. As restrições (2.1b) implicam que deve haver uma variável igual a 1 para o navio  $i$ , com  $(j, m)$  sendo a carga da viagem anterior, se houver uma variável  $(j, m)$  como sendo a carga da viagem atual, ou seja, se o navio  $i$  transporta a carga  $j$  com embarque na data alternativa  $m$ . As restrições (2.1c) implicam que todo navio ou está ocioso ao longo do período [ $x(i, 0, 0, 0) = 1$ ] ou inicia sua seqüência de viagens com uma das cargas em uma de suas datas alternativas de embarque. Já as restrições (2.1d) garantem que toda carga contratada será atribuída à exatamente um navio e toda carga potencial será atribuída ou a um ou a nenhum navio.

Posteriormente, devido, sobretudo ao grande número de restrições do modelo inicial, os autores sugerem um modelo (modelo 2) com o mesmo objetivo, mas que propõe encontrar a melhor combinação de seqüências de carga para cada navio, de forma a

satisfazer as restrições para as cargas (2.1d). Neste novo modelo, o conjunto de restrições do modelo 1, com exceção das restrições para as cargas (2.1d), é agrupado e definido como um conjunto de restrições de convexidade. O autor assume que haja  $N(i)$  seqüências viáveis para o navio  $i$ , e adota  $a(i, j, k) = 1$  se a carga  $k$  for transportada na  $j$ -ésima seqüência do navio  $i$ , e  $a(i, j, k) = 0$ , caso contrário. O valor desta seqüência torna-se, então,  $v(i, j)$ . Com isso, obtém-se o seguinte modelo de programação linear:

$$\text{Maximizar } \sum_i \sum_j^{N(i)} v(i, j)x(i, j) \quad (2.1e)$$

Sujeito a:

$$\text{Restrições de convexidade } \sum_{j=1}^{j=N(i)} x(i, j) = 1 \quad \text{para todo } i \quad (2.1f)$$

$$\text{Restrições para as cargas } \sum_i \sum_{j=1}^{j=N(i)} x(i, j)a(i, j, k) \begin{cases} \leq 1 \\ = 1 \end{cases} \quad \text{para todo } k \quad (2.1g)$$

Neste modelo as variáveis também devem ser não-negativas.

O modelo seguinte (modelo 3) propõe “decompor o modelo 1 pelo método de *Dantzig-Wolfe* em um programa principal que abrange as restrições para as cargas e um subprograma para cada navio que leva em consideração as restrições de fluxo, as restrições para os navios e as restrições de não-negatividade”. Os subprogramas são problemas de fluxo em rede resolvidos por programação dinâmica. O algoritmo desenvolvido conforme o modelo 3 utiliza a solução dos subprogramas, que representam as colunas geradas, como entrada de dados para o problema principal, o qual é formulado exatamente como o problema do modelo 2.

Everett et al. (1972) utilizaram a programação linear para otimizar a frota de grandes navios graneleiros e petroleiros (incluindo navios combinados do tipo OBO) projetada para o ano de 1982, cuja missão era a de transportar 15% de todo o comércio exterior dos Estados Unidos no que diz respeito aos principais produtos a granel, sólidos e líquidos. O modelo elaborado procurava, por meio da minimização do custo de operação da frota ao longo de sua vida útil, determinar o número de navios de determinado tipo e o número de viagens por ano que cada navio realizaria ao longo de cada rota, satisfazendo uma demanda fixa de cada produto no ano de 1982. A análise de sensibilidade, cuja importância é demonstrada pelas incertezas que devem ser consideradas quando se lida com

períodos de tempo no futuro, foi utilizada de forma a explorar as variações na missão da frota. A técnica de programação linear para este problema mostrou-se vantajosa uma vez que permite visualizar o problema a partir de uma análise sistêmica, demonstrando que a frota foi otimizada, não com respeito a um número pequeno de viagens e navios específicos, e sim como parte de todo o sistema de navios, portos, viagens e fluxos de mercadorias.

Golden et al. (1984) consideram o problema de roteirização e determinação do tamanho de uma frota heterogênea de veículos que deve atender clientes com demanda conhecida a partir de um depósito central. O objetivo é minimizar a soma dos custos fixos e dos custos variáveis do sistema, respeitando as capacidades dos veículos. O problema é formulado através do seguinte modelo:

$$\text{Min} \sum_{k=1}^T f_k \sum_{j=1}^n x_{0j}^k + \sum_{k=1}^T \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n c_{ij} x_{ij}^k \quad (2.2a)$$

Sujeito a:

$$\sum_{k=1}^T \sum_{i=0}^n x_{ij}^k = 1 \quad j = 1, \dots, n \quad (2.2b)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ip}^k - \sum_{j=0}^n x_{pj}^k = 0 \quad k = 1, \dots, T; p = 1, \dots, n \quad (2.2c)$$

$$r_0 = 0 \quad (2.2d)$$

$$r_j - r_i \geq (d_j + a_T) \sum_{k=1}^T x_{ij}^k - a_T \quad i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, n \quad (2.2e)$$

$$r_j \leq \sum_{k=1}^T \sum_{i=0}^n a_k x_{ij}^k \quad j = 1, \dots, n \quad (2.2f)$$

$$x_{ij}^k \in (0,1) \quad \text{para todo } i, j, k \quad (2.2g)$$

Onde  $n$  é o número de clientes,  $T$  é o número de tipos de veículos,  $a_k$  é a capacidade do veículo de tipo  $k$  ( $a_1 < a_2 < \dots < a_T$ ),  $f_k$  é o custo fixo de aquisição do veículo  $k$  ( $f_1 < f_2 < \dots < f_k$ ),  $d_j$  é a demanda do cliente  $j$ ,  $c_{ij}$  é o custo da viagem do cliente  $i$  até o cliente  $j$  (admitido simétrico e independente do tipo de veículo utilizado),

$r_i$  é a variável do fluxo de mercadoria associada ao cliente  $i$ , e  $x_{ij}^k = 1$ , se o veículo de tipo  $k$  viaja do cliente  $i$  ao cliente  $j$  e  $x_{ij}^k = 0$ , caso contrário.

Admite-se uma oferta infinita para cada tipo de veículo. O depósito central é identificado por "0" e o termo  $\sum_{j=1}^n x_{0j}^k$  representa o número de veículos de tipo  $k$  utilizado. Portanto, o primeiro termo da função objetivo fornece o custo total fixo ou de aquisição; o segundo termo fornece o custo total variável ou custo de roteirização.

As restrições (2.2b) e (2.2c) asseguram que cada cliente seja visitado exatamente uma vez e que um veículo chegando na localidade de um cliente também deixa este local.

As restrições (2.2d), (2.2e) e (2.2f) garantem que as capacidades dos veículos não sejam excedidas. A variável  $r_i$  fornece a demanda total que um veículo atendeu em sua rota até sua chegada no cliente  $i$  (incluindo a demanda do cliente  $i$ ). Assim, a restrição (2.2f) estabelece que a demanda acumulativa em qualquer localidade de um cliente é limitada pela capacidade do veículo que atende esse cliente. As restrições (2.2d) e (2.2f) definem de modo apropriado as variáveis  $r_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ). Isto é facilmente visto ao observar que  $\sum_{k=1}^T x_{ij}^k$  é igual a 1 ou 0. Além disso, estas restrições servem como restrições de quebra de sub-roteiros.

No artigo de Golden et al. (1984) são descritos dois procedimentos heurísticos de solução para o problema: o método das economias de Clark e Wright e o método de construção do roteiro gigante e variações. Ao final, os autores apresentam duas técnicas para avaliar a qualidade das soluções heurísticas: a técnica de busca dos limites inferiores e a técnica de subestimação do valor da função objetivo.

Ronen (1986) avalia o problema de programação de frota com viagens simples para um conjunto de navios com tamanhos e funções-custo diferentes e que devem entregar uma série de produtos a seus destinos. O autor utiliza-se de vários algoritmos que permitem alocar os produtos aos navios comparando seus resultados com os usuais praticados pela indústria. Visando minimizar a função-custo total do sistema, o autor conclui que o algoritmo denominado gerador aleatório can viés (*biased*) de programações fornece as melhores soluções, próximas das ótimas.

Brown; Graves; Ronen (1987) apresentam o problema da programação de navios petroleiros de uma grande empresa de petróleo, que transportam o produto do Oriente Médio para Europa e Estados Unidos. Os navios vazios (em lastro) podem ser roteirizados pelo Canal de Suez ou pelo Cabo da Boa Esperança, enquanto os navios carregados só podem ser roteirizados pelo Cabo. Os autores formulam o problema como um modelo "elástico" de partição de conjuntos (*elastic set partitioning problem*), que é uma modificação do seguinte problema de partição de conjuntos:

- Índices:  $i = 1, \dots, n$  navios;  $j \in J(i)$  conjunto de programações viáveis para o navio  $i$ ;  $k = 1, \dots, l$  cargas.
- Dados:  $v_{kj} = 1$  se na programação  $j$  a carga  $k$  é transportada, senão  $v_{kj} = 0$ ;  $c_j$ , custo da programação  $j$  (uma função dos navios e das cargas).
- Variáveis de decisão:  $y_j = 1$  se a programação  $j$  é escolhida, caso contrário,  $y_j = 0$ .
- Formulação clássica:

$$\text{Min } \sum_i c_j y_j \quad (2.3a)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j \in J(i)} y_j = 1 \quad \text{para cada navio } i \quad (2.3b)$$

$$\sum_j v_{kj} y_j = 1 \quad \text{para cada carga } k \quad (2.3c)$$

$$y_j = \{0,1\} \quad \text{para cada programação } j \quad (2.3d)$$

As restrições (2.3b) requerem que cada navio selecione exatamente uma programação durante o horizonte de planejamento, e as restrições (2.3c) estipulam que toda carga seja embarcada. Vale destacar que uma programação pode incluir períodos de ociosidade para um navio, bem como trechos em que o navio viaja vazio.

O modelo elástico de partição de conjuntos incorpora penalidades, em forma de custo, quando os limites das restrições são violados. Segundo os autores, a ociosidade dos navios e o afretamento de navios para transporte de determinadas cargas, em operações reais, podem ser vistos como os mecanismos responsáveis pela violação das restrições

embutidas no modelo clássico de partição de conjuntos. Daí a modificação do modelo não-elástico para um modelo elástico. A formulação elástica proposta é como segue:

$$\text{Min } \sum_j \tilde{c}_j \tilde{y}_j + \sum_i (\underline{d}_j \delta_i + \overline{d}_i \delta_i) + \sum_k (\underline{s}_k \sigma_k + \overline{s}_k \sigma_k) \quad (2.3e)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j \in J(i)} \tilde{y}_j + \underline{\delta}_i - \overline{\delta}_i = 1 \quad \text{para todo navio } i \quad (2.3f)$$

$$\sum_j \tilde{v}_{kj} \tilde{y}_j + \underline{\sigma}_k - \overline{\sigma}_k = 1 \quad \text{para toda carga } k \quad (2.3g)$$

$$\tilde{y}_j \in \{0,1\} \quad \text{para toda programação } j \quad (2.3h)$$

As restrições (2.3f) admitem total ociosidade dos navios (a custos totais de *demurrage*  $\underline{d}$ ), e preservam a integridade do modelo com custos de rompimento  $\overline{d}$ . As restrições (2.3g) permitem afretamentos de navios para as cargas (ao custo  $\underline{s}$ ), com os custos  $\overline{s}$  análogos a  $\overline{d}$ . As variáveis  $\tilde{y}$  no modelo elástico não inclui programações com a total ociosidade de navios, nem com afretamento de navios para as cargas;  $\tilde{J}$  é a conseqüente contração do conjunto de programações  $J$  relatadas no modelo clássico;  $\delta$  e  $\sigma$  são variáveis lógicas com coeficientes de custo que se referem a “penalidades elásticas”.

A partir da geração das programações viáveis para cada navio *a priori*, o modelo determina as velocidades ótimas dos navios e a melhor roteirização das pernadas (trechos) em vazio e ainda, quais cargas devem ser embarcadas nos navios próprios da empresa e quais devem ser embarcadas em navios afretados.

Utilizando, também, um procedimento de geração de programações para cada navio *a priori*, Fisher; Rosenwein (1989) buscaram determinar uma programação eficiente para a frota de navios do Comando Militar da Marinha Americana, engajada no transporte de cargas a granel. Uma programação candidata especifica um conjunto de cargas que podem ser transportadas por um navio dentro do horizonte de planejamento e os instantes de início do embarque e da descarga de cada carga do conjunto. O problema é formulado como um modelo de “empacotamento” de conjuntos (*set-packing problem*), como abaixo:

- $S_k$  = conjunto de programações candidatas geradas para o navio  $k$ ;  $a_{ijk} = 1$ , se na programação  $j$  para o navio  $k$  a carga  $i$  é transportada, senão  $a_{ijk} = 0$ ;



$OC_{jk}$  = custo incremental para operar o navio  $k$  na programação  $j$  versus ter-se

o navio  $k$  ocioso ao longo do horizonte de planejamento;  $c_{jk} = \sum_{i=0}^n a_{ijk} c_i - OC_{jk}$ ,

em que  $c_i$  é o custo de se afretar um navio para o transporte da carga  $i$ .

- Variáveis usadas no modelo:  $y_{jk} = 1$ , se o navio  $k$  utiliza a programação  $j$  e  $y_{jk} = 0$ , caso contrário.

- Modelo:

$$Z = \text{Max} \sum_{k=1}^K \sum_{j \in S_k} c_{jk} y_{jk} \quad (2.4a)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j \in S_k} y_{jk} \leq 1 \quad k = 1, \dots, K \quad (2.4b)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j \in S_k} a_{ijk} y_{jk} \leq 1 \quad i = 1, \dots, n \quad (2.4c)$$

$$y_{jk} = \{0, 1\}, j \in S_k \quad k = 1, \dots, K \quad (2.4d)$$

As restrições (2.4b) implicam que no máximo uma programação seja atribuída a cada navio e as restrições (2.4c) garantem que toda carga seja embarcada por no máximo um navio. Se o lado esquerdo da restrição (2.4b) for igual a 0 para algum navio  $k$ , isto implica que o navio  $k$  estará ocioso, e se o lado esquerdo da restrição (2.4c) for igual a 0, isto implica que a carga  $i$  será transportada por um navio a ser afretado.

Este modelo é resolvido por meio de um algoritmo de otimização que utiliza o “método *branch-and-bound* com os limites (*bounds*) obtidos pela aplicação de relaxação lagrangiana”.

Papadakis; Perakis (1989) estudam o problema de minimização do custo de operação de uma frota de navios que transporta uma quantidade específica de carga a granel a partir de vários portos de origem para vários portos de destino durante um período de tempo específico. A estrutura do modelo consiste em embarcar a carga em algum porto de origem, descarregar em um porto de destino e retornar vazio (com lastro) à mesma origem. Tanto a velocidade do navio em plena carga como sua velocidade em vazio são tratadas como variáveis independentes, o que resulta em um problema não-linear de otimização que

une a alocação dos navios às rotas disponíveis ao problema de seleção da velocidade ótima dos mesmos. Sob certas condições, o desacoplamento entre estes dois problemas, resulta na possibilidade de aplicação de programação linear para se obter a solução ótima. No caso geral (não-linear), um algoritmo lagrangiano foi utilizado na determinação da solução ótima e mostrou-se mais eficiente em comparação a outros métodos não-lineares de otimização.

Brown; Goodman; Wood (1990) tratam do problema de programação da frota do Atlântico da marinha americana em que várias unidades são alocadas para desempenhar atividades como: operações principais, exercícios, períodos de manutenção, inspeções e outras. Os autores apresentam um modelo de otimização que resolve uma parte substancial do problema de programação, comparando-o à forma manual pela qual o processo era desempenhado na época. O modelo é formulado como um problema de partição de conjuntos (*set partitioning problem*) aplicado ao período de um ano. O objetivo do modelo é selecionar um conjunto de programações candidatas ao custo mínimo tal que as demandas requeridas pelas atividades por tipos de embarcações e por sistemas de armamentos sejam atendidas. O modelo é formulado primeiramente como um problema clássico de partição de conjuntos para incluir limites nas restrições e, em seguida, como um problema “elástico” de partição de conjuntos em que são embutidas penalidades nas restrições quando seus limites são violados.

Perakis; Jaramillo (1991) utilizaram programação linear para resolver o problema de alocação de uma frota de navios de serviço regular (*liner*), composta de navios próprios e afretados, às várias rotas comerciais em que ela opera. De forma a tornar linear o problema de alocação, um método de correção das velocidades de cruzeiro e das frequências das operações foi utilizado antes de se aplicar o modelo de programação linear.

Perakis; Bremer (1992) apresentam um problema de programação de navios petroleiros que transportam petróleo cru a partir do ponto de vista de uma das maiores companhias de transporte de petróleo do mundo, a *Chevron Shipping Company*. O problema se restringe ao curto prazo, isto é, ao nível operacional de planejamento da empresa. O objetivo da companhia é “minimizar os custos do transporte marítimo do petróleo, dados os requisitos de movimentação das cargas e as características da frota”. Os custos são provenientes de duas fontes. A primeira trata dos custos associados aos navios próprios da companhia e em operação; e a segunda trata dos custos associados ao

afretamento de navios pela companhia. O problema é formulado através de programação inteira, em que as programações viáveis são geradas *a priori*, através de um programa gerador de programações que utiliza a restrição de tempo máximo de espera do navio no porto (para ser atendido) como fator controlador do número de programações geradas.

Mais tarde, os autores descrevem em um artigo subsequente, Bremer; Perakis (1992), a implementação do sistema de programação, como também sua utilização para otimizar uma programação real, com base nas informações da companhia *Chevron*. Bremer; Perakis (1992) examinam o compromisso (*trade-off*) entre o tamanho do problema e a obtenção da solução ótima, a partir da medida da variação do tempo máximo de espera dos navios. Os resultados mostram que, embora os dados referentes ao custo real utilizado pela companhia não estivessem disponíveis, a programação ótima obtida não representava um problema de porte e ambiente reais, uma vez que a solução apresentava um tempo de espera significativamente alto para os navios da companhia. Desta forma, o sistema de otimização da programação foi implementado de tal forma que permitisse modificações em quaisquer situações de programação que por ventura fossem estudadas.

Malandraki; Daskin (1992) tratam do problema de roteirização de veículos com dependência do tempo, em que uma frota de veículos com capacidades fixas atende clientes com demandas fixas a partir de um depósito central. Procura-se minimizar o tempo total das rotas atribuindo os clientes aos veículos e os veículos às rotas, utilizando-se para isso, formulações de programação inteira mista que tratam as funções do tempo de viagem como funções-degrau (*step functions*). O autor mostra que a maioria das técnicas heurísticas existentes para problemas não-temporais (independentes do tempo) não pode ser facilmente estendida para problemas que apresentam dependência do tempo.

Trudeau; Dror (1992) estudam o problema de roteirização integrado ao problema de controle de estoque, que envolve a distribuição de um produto – e.g. óleo de aquecimento – incorporando a natureza estocástica nas taxas de consumo dos clientes e a possibilidade de ocorrência de falhas nas rotas (*route failures*), quando a demanda real em uma rota excede a capacidade de um veículo, e eventuais faltas de estoque (*stockouts*) nos clientes. Utilizando um horizonte de tempo de 12 semanas consecutivas, a estratégia é construir rotas diárias para os veículos que resultem em uma operação eficiente, medida em termos

do número médio de unidades do produto entregue aos clientes por hora, evitando-se ao máximo a ocorrência de falhas nas rotas e faltas de estoque.

Ronen (1993) relata, de forma sucinta, as tendências do setor de transporte marítimo e os trabalhos publicados durante a última década no que tange à programação de navios e aos problemas relacionados, identificando lacunas e gargalos que exigem mais investigação. Em sua visão sobre o tema, o autor esclarece alguns termos, a saber: *shipping* (transporte), que se refere ao transporte de cargas por navios; *routing* (roteirização), que trata da atribuição de uma seqüência de portos a um navio; *scheduling* (programação), que abrange a atribuição de instantes de tempo (ou janelas de tempo) aos diversos eventos ao longo da rota de determinado navio; e *deployment* (alocação de recursos), que se refere à alocação de navios da frota às rotas de interesse (ou atividades). Para o autor, não há uma diferença clara entre os termos *scheduling* e *deployment*. O termo *deployment* é empregado quando os navios são designados para realizar uma série de viagens na mesma rota e, portanto, está associado a um horizonte maior de tempo. O termo *scheduling* não implica a alocação dos navios a rotas específicas e, devido a grande incerteza nas operações marítimas, geralmente possui um menor horizonte de tempo. O autor enfatiza o rápido desenvolvimento de ferramentas computacionais, já comentadas por Geoffrion (1972), que têm facilitado a obtenção de soluções ótimas nos problemas de programação de navios, o que pode resultar em um impacto econômico significativo. Destaca que, para um operador que geralmente possui uma frota mista de navios, a medida para comparar alternativas nas decisões de programação da frota é o custo ou o lucro.

Salhi; Rand (1993) desenvolveram uma abordagem heurística eficiente para determinar a composição de uma frota heterogênea de veículos, que incorpora tanto a roteirização como os custos fixos dos veículos na produção eficiente de frotas variadas. O objetivo é adotar um procedimento de perturbação dentro das rotas existentes ou construídas para reduzir o custo total de roteirização e de aquisição (custo fixo), melhorando o nível de utilização dos veículos. Desta forma, os autores avaliam o compromisso (*trade-off*) entre o custo operacional e o custo fixo.

O procedimento de perturbação destacado anteriormente consiste basicamente em transferir clientes de uma rota para outras a fim de permitir que tal rota seja atendida por um veículo menor, se isto for lucrável, ou combinar rotas com demanda total pequena em

um menor número de rotas com demanda total maior, ou ainda, quebrar rotas maiores em rotas menores.

Taillard et al. (1997) aplicam um procedimento heurístico de busca tabu para o problema de roteirização de veículos com restrições não-rígidas (*soft*) de janelas de tempo. O atraso do serviço no cliente é permitido, porém são embutidas penalidades na função objetivo. Na busca tabu, uma vizinhança da solução atual é criada através de um procedimento que troca seqüências de clientes consecutivos (ou segmentos) entre duas rotas. Enquanto a busca avança, rotas viáveis são armazenadas em uma memória adaptativa e novas soluções iniciais são produzidas pela seleção e combinação de rotas retiradas de diferentes soluções encontradas nesta memória. Em Taillard (1999), com o auxílio do método de busca tabu, apresenta-se um procedimento heurístico de geração de colunas, com base em uma memória adaptativa, para resolver problemas de roteirização de veículos com frota heterogênea. A partir da resolução de uma sucessão de problemas de roteirização de veículos com frota homogênea, a busca tabu tem a função de gerar os roteiros candidatos para a solução do problema com frota heterogênea.

A memória adaptativa primeiramente gera um conjunto de soluções viáveis conforme o método de busca tabu. Então ela extrai os roteiros simples (com um veículo) deste conjunto de soluções e combina alguns deles para definir uma solução parcial inicial para uma outra aplicação da busca tabu. O processo é repetido um número de vezes e os roteiros são memorizados como candidatos para a solução final do problema de roteirização com frota heterogênea. Uma vez que os problemas de roteirização com frota homogênea foram resolvidos para cada tipo de veículo, obtém-se um conjunto  $T$  de roteiros memorizados. Vale dizer que somente uma cópia de cada roteiro é mantida em  $T$ , ou seja, se houver mais de um roteiro que atenda os mesmos clientes, somente o que apresentar menor custo é mantido em  $T$ .

Assume-se  $m = |T|$  e  $c_{jk}$  ( $j = 1, \dots, m, k = 1, \dots, K$ ) o custo do  $j$ -ésimo roteiro de  $T$  realizado pelo veículo de tipo  $k$ . Defini-se a matriz  $A = (a_{ij})$  com  $a_{ij} = 1$ , se o cliente  $i \in j$ -ésimo roteiro de  $T$  e  $a_{ij} = 0$ , caso contrário.

O  $j$ -ésimo roteiro de  $T$  define uma coluna de  $A$ . Conseqüentemente, o método de memória adaptativa é interpretado como um procedimento heurístico de geração de colunas

no sentido de que somente uma fração de todos os roteiros que podem ser construídos para o problema de roteirização com frota homogênea é gerada. A melhor solução do problema de roteirização com frota heterogênea pode ser encontrada através do seguinte modelo linear “booleano”:

$$\text{Min} \quad \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^m c_{jk} x_{jk} \quad (2.5a)$$

Sujeito a:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^m a_{ij} x_{jk} = 1 \quad i = 1, \dots, n \quad (2.5b)$$

$$\sum_{j=1}^m x_{jk} \leq n_k \quad k = 1, \dots, K \quad (2.5c)$$

$$x_{jk} \in \{0,1\} \quad j = 1, \dots, m, k = 1, \dots, K \quad (2.5d)$$

O valor de  $x_{jk}$  é igual a 1, se, e somente se, o  $j$ -ésimo roteiro de  $T$  for escolhido e realizado pelo veículo de tipo  $k$ .

Bausch; Brown; Ronen (1998) estudam o problema de uma empresa multinacional que pretende planejar o transporte de granéis líquidos entre fábricas, centros de distribuição e clientes industriais, utilizando uma frota costeira de navios petroleiros e barcaças. Por meio de uma interface amigável ao usuário, ocultando um sistema sofisticado de apoio a decisão com base em otimização, a ferramenta tem a capacidade de gerar as programações viáveis para os navios. Um modelo linear inteiro “elástico” de partição de conjuntos (*elastic set partitioning problem*), implícito na ferramenta, seleciona uma programação para cada navio, fazendo com que as coletas e as entregas sejam completadas ao custo mínimo, satisfazendo, paralelamente, todos os requisitos operacionais. O modelo é apresentado a seguir.

- Índices:  $v = 1, \dots, \text{navios}$ ;  $l = 1, \dots, \text{cargas}$ ;  $s = 1, \dots, \text{programações}$ ;  $SV(v)$  programações para o navio  $v$ ; e  $SL(l)$  programações entregando a carga  $l$ .
- Dados:  $Cost_s$  = custo da programação  $s$  (função de atributos dos navios e das cargas e de outros dados, como a seqüência de cargas);  $Icost_v$  = custo de ociosidade do navio  $v$ ; e  $Scost_l$  = custo de afretamento de um navio não pertencente à frota para transporte da carga  $l$ .

- Variáveis de decisão:  $DISPATCH_s = 1$  se a programação  $s$  for escolhida;  $IDLE_v = 1$  se o navio  $v$  estiver ocioso; e  $SPOT_l = 1$  se a carga  $l$  for transportada por um navio a ser afretado.

- Formulação:

$$\text{Min } \sum_s Cost_s DISPATCH_s + \sum_v ICost_v IDLE_v + \sum_l SCost_l SPOT_l \quad (2.6a)$$

Sujeito a:

$$\sum_{s \in SV(v)} DISPATCH_s + IDLE_v = 1, \text{ para todo navio } v \quad (2.6b)$$

$$\sum_{s \in SL(l)} DISPATCH_s + SPOT_l = 1, \text{ para toda carga } l \quad (2.6c)$$

A função objetivo (2.6a) expressa os custos totais de programação da frota, incluindo as penalidades elásticas para navios ociosos e para afretamento de navios não pertencentes à frota no transporte de determinadas cargas. A restrição (2.6b) assegura que todo navio ou é alocado a uma programação ou está ocioso. E a restrição (2.6c) garante que toda carga aparece em uma programação da frota ou será transportada por um navio a ser afretado.

O sistema compreende inúmeras considerações operacionais e fornece as programações que não são somente eficientes, mas também válidas de imediato e diretamente utilizáveis.

Fagerholt (1999b) elaborou um estudo sobre o dimensionamento de frota, para um problema real de transporte regular (*liner*), classificando-o como um problema de roteirização de veículos com múltiplas viagens. O modelo elaborado visava minimizar os custos de transporte entre portos de origem de cargas na costa da Noruega e um porto central, ao sul deste mesmo país, em que está último recebia todas as cargas para posterior reembarque a destinos na Europa e nos Estados Unidos. O método de solução era composto basicamente de três fases: na primeira fase, procurou-se gerar todas as viagens simples viáveis para o maior navio disponível. Segundo o autor, ma viagem simples é definida como aquela em que um navio parte do porto central, passa por destinos de cargas e retorna a ele sem visitá-lo durante o percurso. Algumas das rotas utilizarão apenas uma pequena parte da capacidade dos navios e podem ser realizadas por navios menores a um custo menor. Tal fato é usado no cálculo do custo de cada rota. Na segunda fase, as rotas simples

geradas na fase 1 são combinadas em uma seqüência de viagens, formando múltiplas rotas, enquanto na terceira fase, procurou-se, a partir da resolução de um problema de partição de conjuntos (*set partitioning problem*), em que cada coluna corresponde às rotas geradas nas fases 1 e 2, achar a frota ótima e as rotas coerentes para a mesma. Abaixo segue a formulação utilizada.

➤ Índices:  $R$  é o conjunto de todas as rotas (simples e múltiplas) geradas nas fases 1 e 2 indexadas por  $r$ ;  $N$  é o conjunto de nós ou portos a serem atendidos pela frota de navios, indexados por  $i$ ;  $A_{ir}$  é um parâmetro que indica se o porto ou nó  $i$  é visitado na rota  $r$ ;  $C_r^{TC}$  é o custo fixo da rota  $r$  e  $C_r^{OP}$  é o custo operacional da rota  $r$  ambos referentes ao navio de menor custo com capacidade suficiente para realizar essa rota. Estes componentes de custo são calculados nas fases 1 e 2.

➤ Variável de decisão:  $x_r$  é uma variável binária igual a 1 se a rota  $r$  for escolhida na solução ótima e igual a zero, caso contrário. Ao selecionar a rota  $r$ , seleciona-se também o navio correspondente a essa rota.

➤ Formulação:

$$\text{Min } \sum_{r \in R} (C_r^{TC} + C_r^{OP}) x_r \quad (2.7a)$$

Sujeito a:

$$\sum_{r \in R} A_{ir} x_r = 1 \quad \forall i \in N \quad (2.7b)$$

$$x_r \in \{0,1\} \quad \forall r \in R \quad (2.7c)$$

A equação (2.7a) minimiza os custos totais de transporte, incluindo tanto os custos operacionais como os custos fixos para os navios da frota. A restrição (2.7b) assegura que todos os nós são atendidos por um navio da frota, e a restrição (2.7c) impõe restrições binárias nas variáveis dos navios e das rotas.

Christiansen (1999) apresenta um problema real de planejamento de transporte marítimo de uma empresa norueguesa, que combina o problema de gerenciamento de estoque e o problema de roteirização com restrições de janelas de tempo. O problema envolve uma frota de navios que transporta amônia entre portos de produção e de consumo, em que as quantidades embarcadas e descarregadas são determinadas pelas taxas de



produção nos portos produtores, pelos possíveis níveis de estoque nos terminais e pelo tamanho do próprio navio que visita o porto. Como as unidades de produção e de consumo da amônia pertencem à companhia, os custos de estoque não são afetados pelos custos de transporte; desta forma, o que se procura minimizar são apenas os custos para transportar o produto.

Devido à complexidade do problema, o modelo principal, formulado como um problema de programação inteira mista, é decomposto em um subproblema para cada navio e um subproblema para cada porto interno (porto interno é aquele que possui uma fábrica próxima a ele) utilizando para isso o método de decomposição *Dantzig-Wolfe*. Este método aborda a geração de colunas, que especificam as seqüências de visita aos portos e as rotas dos navios que proporcionem os menores custos no problema principal. As colunas são geradas a partir da resolução dos subproblemas para cada porto e para cada navio. Os subproblemas são formulados como problemas de distância mínima e resolvidos por algoritmos de programação dinâmica. O subproblema para cada navio consiste em achar uma rota viável, levando em consideração as janelas de tempo e a quantidade de produto a bordo do navio, de forma que esta quantidade não exceda a capacidade do navio. O subproblema para cada porto consiste em determinar a quantidade para embarque e o tempo de início do serviço para cada chegada, tal que o nível de estoque esteja dentro dos limites do porto para todo o período de planejamento.

O problema principal é resolvido iterativamente pelo método *branch-and-bound* até que nenhuma nova coluna promissora possa ser gerada.

Iakovou et al. (1999) abordam o problema de roteirização no nível estratégico para o transporte marítimo de múltiplos produtos, de classificação perigosa, utilizando múltiplos pares origem-destino. O autor emprega o modelo de fluxo em rede ao invés da formulação tradicional de distância mínima, com a finalidade de achar as rotas ótimas para transportar cada produto perigoso entre os pares origem-destino, juntamente com a quantidade e o tipo de produto em cada trecho (*link*) da rede. Como o problema global de planejamento de rotas é difícil de se resolver diretamente, mesmo para uma rede relativamente pequena, propõe-se um procedimento de solução dividido em duas fases. A primeira fase consiste em obter bons limites inferiores (*lower bounds*) e superiores (*upper bounds*) para o problema global, enquanto que, na segunda fase, preocupa-se em fechar a lacuna entre esses limites.

As complexidades do problema, juntamente com a eficiência e a aplicabilidade da metodologia de solução proposta, são ilustradas através de dois exemplos práticos: primeiro, por meio de um problema hipotético de pequeno porte para um único tipo de produto perigoso e, depois, mediante um estudo de caso para o transporte marítimo de produtos derivados do petróleo na região do Golfo do México.

Sherali; Al-Yakoob; Hassan (1999) exploram o problema de roteirização e programação da frota de navios da Companhia de Petróleo do Kuwait, cuja missão é a de transportar petróleo e seus derivados a partir de três origens no Kuwait para clientes localizados na Europa, América do Norte e Japão. As entregas poderiam ser realizadas por navios próprios da empresa ou por navios afretados. Cada viagem era composta de apenas uma origem e um destino, porém cada navio poderia transportar vários produtos em compartimentos diferentes. As rotas a serem selecionadas poderiam seguir dois trajetos: através do Canal de Suez, com uma série de restrições, e pelo Cabo da Boa Esperança, tornando a viagem mais longa. Além disso, as entregas deveriam obedecer a janelas de tempo nos clientes e respeitar os limites inferiores e superiores das quantidades de cada produto a ser transportado para um determinado destino. Os clientes estabeleciam penalidades, caso os produtos não fossem entregues conforme as datas de entrega estabelecidas. O modelo foi formulado por meio de programação inteira mista e o seu objetivo era de minimização do custo, satisfazendo a demanda requerida no horizonte de planejamento estabelecido e produzindo programações de entrega viáveis. Devido à complexidade do problema em exemplos ou cenários de maior porte, que trazem consigo um número elevado de variáveis e restrições, os autores motivaram-se em formular uma versão agregada para o modelo, em que se conservaram os aspectos operacionais essenciais do problema original. Este modelo mostrou-se mais tratável computacionalmente em relação ao anterior, e pôde ser utilizado para construir soluções viáveis de boa qualidade para o problema original.

Tacla (1999) foca um estudo de planejamento para o transporte rodoviário de grânéis líquidos para atendimento da demanda de matéria-prima nas fábricas e da demanda de produtos acabados nos clientes finais. O objetivo é minimizar os custos de transporte otimizando o aproveitamento de uma frota de caminhões-tanque, sujeito às restrições operacionais desse tipo de transporte e às restrições de compatibilidade dos produtos. Para

isso, aplicam-se modelos matemáticos e procedimentos heurísticos que promovem o uso de rotas compostas, com redução de trechos improdutivos (sem carga). Conforme cita o autor, “A introdução de rotas compostas...foi amplamente aproveitada; mostrando que há efetiva redução da distância total percorrida e da frota utilizada, e conseqüentemente aumento da produtividade das unidades de transporte enquanto carregadas”.

Fagerholt (2000) avalia, em um problema de programação de navios, o compromisso (*trade-off*) entre os custos de transporte e as violações de janela de tempo no atendimento aos clientes. O autor propõe tratar as janelas de tempo como restrições não-rígidas (*soft*), impondo penalidades (custos de inconveniência) no caso de os atendimentos encontrarem-se fora das janelas de tempo estabelecidas. O método de solução consiste em selecionar as programações candidatas que satisfaçam as regras heurísticas baseadas no tempo de espera e no índice de utilização da capacidade dos navios. Para a geração das programações candidatas, o autor utiliza um problema de caixeiro viajante com restrição de capacidade, restrições de janelas de tempo não-rígidas (*soft time windows*) e restrições de precedência. A partir das programações geradas, o autor parte para a modelagem e para a formulação matemática do problema principal, que tem como objetivo minimizar a soma dos custos de transporte e dos custos de inconveniência oriundos das violações das janelas de tempo, conforme a formulação a seguir:

- Índices:  $K$  é o conjunto de navios indexados por  $k$ ;  $N$  é o conjunto de cargas indexadas por  $i$ ; e  $R^k$  é o conjunto de programações candidatas para o navio  $k$  indexadas por  $r$ .
- Parâmetros/dados:  $C_{Or}^k$  é o custo operacional (principalmente os custos de combustível e custos portuários) para executar a programação  $r$  pelo navio  $k$ ;  $C_{Ir}^k$  é o custo de inconveniência para a programação  $r$  e para o navio  $k$ ;  $C_A^k$  é o custo para utilizar o navio  $k$  no período de planejamento;  $C_{SPOTi}$  é o custo de afretamento de um navio não pertencente à frota para transportar a carga  $k$ ; e  $A_{ir}^k$  é uma constante igual a 1 se a programação  $r$  para o navio  $k$  transporta a carga  $i$ , e igual a 0 caso contrário.

- Variáveis de decisão:  $x_r^k$  é uma variável binária igual a 1 se o navio  $k$  executa a rota  $r$ , e igual a 0 caso contrário;  $s_i$  é uma variável binária igual a 1 se a carga  $i$  é transportada por um navio a ser afretado, e igual a 0 caso contrário.

- Formulação:

$$\text{Min} \quad \sum_{k \in K} \sum_{r \in R^k} (C_{Or}^k + C_A^k) x_r^k + \sum_{i \in N} C_{SPOTi} s_i + \sum_{k \in K} \sum_{r \in R^k} C_{Ir}^k x_r^k \quad (2.8a)$$

Sujeito a:

$$\sum_{k \in K} \sum_{r \in R^k} A_{ir}^k x_r^k + s_i = 1 \quad \forall i \in N \quad (2.8b)$$

$$\sum_{r \in R^k} x_r^k \leq 1 \quad \forall k \in K \quad (2.8c)$$

$$x_r^k \in \{0,1\} \quad \forall k \in K, r \in R^k \quad (2.8d)$$

$$s_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in N \quad (2.8e)$$

A restrição (2,8b) assegura que todas as cargas são atendidas, ou por um navio da frota ou por um navio afretado. A restrição (2.8c) assegura que todo navio da frota executa, no máximo, uma de suas programações candidatas, enquanto que as restrições (2.8d) e (2.8e) impõem características binárias para as variáveis.

O trabalho mostra que, se o serviço em um cliente começar antes da abertura da janela de tempo ou terminar depois do fechamento da janela de tempo, ele é penalizado igualmente, embora em alguns problemas um serviço tardio seja mais penalizado.

Fagerholt; Christiansen (2000a) abordam um problema de programação e roteirização de navios graneleiros, que combina o problema de coleta e entrega de granéis sólidos, incorporando restrições de janelas de tempo, com o problema de alocação múltipla. Cada navio da frota está equipado com compartimentos de carga flexíveis, que podem ser divididos em vários compartimentos menores, propiciando o transporte de múltiplos produtos simultaneamente. Em Fagerholt (1999a) mostra-se, através de simulação, que compartimentos de carga flexíveis podem propiciar um aumento significativo na utilização das capacidades de um navio em comparação a compartimentos de carga com tamanhos fixos. Na resolução do problema proposto por Fagerholt; Christiansen (2000a), procura-se, primeiramente, gerar as programações para cada navio (incluindo a alocação das cargas aos compartimentos do navio) utilizando duas medidas para controlar (ou reduzir) o número de

programações candidatas: a relação [tempo de espera/tempo sem utilização] e o índice de utilização da capacidade do compartimento de carga dos navios. O processo de geração das programações candidatas para um dado navio é iniciado com programações contendo um único produto,  $i$ . Estas programações iniciais envolvem uma seqüência de três nós,  $0 - i - (n + i)$ , que correspondem ao ponto inicial do navio  $k$ , o nó de coleta e o nó de entrega do produto  $i$ , respectivamente. Caso a programação candidata esteja dentro do fator de controle das medidas acima mencionadas, adiciona-se outro produto à programação e efetua-se o teste do fator novamente. O processo é repetido para os próximos produtos até que não haja mais produtos disponíveis para serem adicionados à programação. Para assegurar uma seqüência ótima de visita dos navios aos portos, um problema de caixeiro viajante com restrições de alocação, restrições de janelas de tempo e restrições de precedência, é resolvido na geração de cada programação candidata. As restrições de alocação asseguram que a divisão do compartimento de carga do navio e a alocação das cargas aos compartimentos menores sejam viáveis ao longo da seqüência de visitas. As restrições de janelas de tempo asseguram que todos os nós (pontos de coleta e entrega) sejam visitados dentro de seus intervalos de tempo específicos, enquanto que as restrições de precedência asseguram que os nós de coleta sejam visitados antes dos nós de entrega correspondentes.

Este problema de caixeiro viajante é resolvido como um problema de distância mínima em um gráfico de estados, cujos nós representam os estados e os arcos, as transições de um estado para outro. O algoritmo é formulado e resolvido por meio de programação dinâmica.

No passo seguinte à geração das programações candidatas, parte-se para a solução do problema principal, que é formulado como um problema de partição de conjuntos (*partitioning set problem*), em que se pretende minimizar os custos de transporte dos produtos por navios da frota e por navios afretados. A formulação matemática deste problema de partição de conjuntos é semelhante àquela apresentada em Fagerholt (2000), porém inexitem as componentes de custo de inconveniência e de custo de utilização de navio ( $C_{ir}^k$  e  $C_A^k$ , respectivamente).

Em Fagerholt; Christiansen (2000b) descrevem de forma mais detalhada o problema de caixeiro viajante utilizado em Fagerholt; Christiansen (2000a), aplicando-o na resolução

de um problema de programação de frota que não propõe minimizar os custos para transporte das cargas e sim, minimizar o consumo total de tempo por todos os navios da frota. Desta forma, a componente de custo  $C_{Or}^k$  é substituída pelo parâmetro  $T_r^k$ , que representa o horário de término da programação  $r$  para o navio  $k$ . No entanto, as restrições deste problema de partição de conjuntos seguem o mesmo raciocínio daquelas apresentadas em Fagerholt (2000) e Fagerholt; Christiansen (2000a).

Christiansen; Nygreen (1998), em contraste à abordagem anterior, apresentaram um problema combinado de programação de navios graneleiros e de gerenciamento de estoque de um único produto. Devido à complexidade deste tipo de problema, os autores aplicam um método de geração de colunas e geram as programações quando necessário. Essas programações são compostas de rotas com informações de hora da chegada e da quantidade para embarque, bem como das seqüências de portos a serem visitados de forma a satisfazer as restrições de estoque. Os aspectos do gerenciamento do estoque e da programação dos navios são sincronizados no problema principal, que resulta em um problema ampliado de partição de conjuntos (*extended set partitioning problem*). Todo o problema é resolvido pelo método *branch-and-bound*.

Christiansen; Fagerholt (2002) apresentam um problema de programação de navios, que envolve a escolha de um conjunto de programações robustas para uma frota que transporta cargas a granel durante um período de planejamento. Para os autores, uma programação robusta é aquela na qual tenta-se evitar que o término de um serviço programado para um navio se dê logo antes dos finais de semana.

A operação envolvia a coleta de um tipo de produto em um porto de embarque específico e a sua entrega no porto de descarga correspondente. A maioria desses portos operava em períodos restritos; assim, tanto a operação de embarque como a operação de descarga deveriam se iniciar dentro de janelas de tempo específicas para cada produto. Já que os portos possuíam horas de operação restritas, as janelas de tempo de longa duração poderiam, na verdade, ser consideradas como janelas de tempo múltiplas, quando seus intervalos de duração excediam um dia. No entanto, os autores mantiveram as janelas de tempo dos produtos e definiram uma função para o tempo total em um porto. Devido, novamente, às horas restritas de operação nos portos, esta função, que representa o tempo de serviço, torna-se dependente do horário de chegada do navio em um determinado porto.

A programação de navios está associada a um alto grau de incerteza devido, sobretudo, ao mau tempo no mar e aos imprevisíveis tempos de serviço nos portos. O objetivo, então, é selecionar as programações, ditas robustas, que possuem menor probabilidade de conter navios ociosos esperando nos portos durante o fim de semana, e impor penalidades, em forma de custo, para as chegadas em horários de risco (ou seja, próximos aos fins de semana). O problema é formulado como um problema de partição de conjuntos em que se pretende minimizar a soma dos custos de operação da frota, dos custos relativos a penalidades por chegadas próximas aos fins de semana e dos custos de embarques em navios afretados, que também são levados em consideração no modelo. O problema formulado é o seguinte:

- Dados:  $V$  é o conjunto de navios indexados por  $v$ ;  $N_p$  é o conjunto de nós ou portos de coleta indexados por  $n$  (ou pela carga  $i$ );  $R_v$  é o conjunto de programações para o navio  $v$ , indexadas por  $r$ ;  $C_{Tvr}$  é a soma do custo operacional para executar a programação  $r$  pelo navio  $v$  e o correspondente custo relativo a penalidade;  $C_{SPOTi}$  é o custo para a carga  $i$  ser atendida por um navio afretado; e  $B_{ivr}$  é um parâmetro que vale 1 se a programação  $r$  para o navio  $v$  transporta a carga  $i$  e 0, em caso contrário.
- Variáveis de decisão:  $x_{vr}$  é uma variável binária igual a 1 se o navio  $v$  executa a rota  $r$ , e igual a 0, em caso contrário;  $s_i$  é uma variável binária igual a 1, se a carga  $i$  é transportada por um navio afretado, e igual a 0, em caso contrário.
- Formulação:

$$\text{Min } \sum_{v \in V} \sum_{r \in R_v} (C_{Tvr}) x_{vr} + \sum_{i \in N_p} C_{SPOTi} s_i \quad (2.9a)$$

Sujeito a:

$$\sum_{v \in V} \sum_{r \in R_v} B_{ivr} x_{vr} + s_i = 1 \quad \forall i \in N_p \quad (2.9b)$$

$$\sum_{r \in R_v} x_{vr} \leq 1 \quad \forall v \in V \quad (2.9c)$$

$$x_{vr} \in \{0,1\} \quad \forall v \in V, r \in R_v \quad (2.9d)$$

$$s_i \geq 0 \quad \forall i \in N_p \quad (2.9e)$$

A restrição (2.9b) garante que todas as cargas são transportadas, ou por um navio da frota ou por um navio afretado. A restrição (2.9c) garante que todo navio da frota executa, no máximo, uma de suas programações candidatas, enquanto que a restrição (2.9d) impõe características binárias nas variáveis  $x_{vr}$ . De acordo com restrição (2.9e), as variáveis  $s_i$  não precisam ser definidas como binárias, uma vez que ambas as variáveis  $x_{vr}$  e  $B_{ivr}$  já são binárias.

Como todo problema de partição de conjuntos, é imprescindível a geração das programações viáveis para cada navio  $v$  para que o problema principal tenha solução. Neste trabalho, o processo se inicia com a geração das programações contendo uma carga  $i$ . Estas programações envolvem uma seqüência de três nós,  $0 - i - (n+i)$ , que representam o ponto inicial para o navio  $v$ , o nó de coleta e o nó de entrega da carga  $i$ , respectivamente. As novas programações são geradas ao estender estas programações iniciais com as cargas disponíveis sucessivamente, uma de cada vez, dado que esta nova programação não tenha sido considerada anteriormente. O algoritmo de seleção dos nós para as novas programações candidatas prossegue com a adição de novas cargas às programações viáveis já seqüenciadas até que não haja mais cargas a serem acrescentadas às programações. Para achar a seqüência ótima de visitas para as novas programações estendidas (com a adição de carga, uma de cada vez), é necessário resolver um problema de otimização contendo todos os nós. Este problema consiste em projetar uma seqüência de visitas a um determinado conjunto de nós tal que a soma dos custos operacionais e dos custos relativos a penalidades dentro da seqüência seja minimizado. Além disso, cada nó tem que ser atendido dentro de sua janela de tempo específica, enquanto que o tempo de serviço em cada porto é calculado com base no horário de chegada no porto. Finalmente, o nó de coleta deve ser visitado antes do nó de entrega correspondente. Conforme essas características do problema, o modelo pode ser associado ao problema do caixeiro viajante com restrições de capacidade, restrições de janelas de tempo múltiplas com penalidades e restrições de precedência. A resolução deste modelo é feita por meio de programação dinâmica.

Os resultados computacionais mostraram que, quanto mais altos os custos relativos a penalidades, mais robusta fica a solução ótima, conseqüentemente mais altos tornam-se os custos de transporte.



Em Tacla (2003) aborda-se o transporte colaborativo de cargas de grande volume, com aplicação no caso de soja e fertilizantes. O objetivo é reduzir os gastos financeiros com a contratação de fretes no âmbito dos três níveis hierárquicos de decisão: estratégico, tático e operacional. Propõe-se uma modelagem matemática em programação linear que busca conciliar as necessidades do transporte com a variação das janelas de tempo para embarque de soja e fertilizantes. Faz-se uso de rotas conjugadas (combinadas) para melhor aproveitamento dos caminhões e para diminuir os custos de transporte.

Stringher (2004) elabora um estudo de otimização de transporte na distribuição nacional de produtos da linha branca (refrigeradores, lavadoras, etc), utilizando para isso designação de rotas para uma frota dedicada de caminhões para carga lotação. Sua metodologia abrange a construção de um modelo em programação linear inteira, que visa a minimização do custo de transporte dos produtos, com a geração de caminhos diretos ou combinados *a priori*.

O tema desta dissertação, como citado no capítulo introdutório, já havia sido abordado por um grupo de alunos de graduação do curso de Engenharia Naval da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. O grupo explorou o tema de planejamento do transporte de derivados do petróleo tomando inicialmente um modelo de viagens simples (um produto sendo transportado entre uma origem e um destino) e, posteriormente, desenvolveu um outro modelo mais complexo, cujas viagens foram obtidas através da composição de duas viagens simples extraídas do modelo inicial e a partir de viagens usadas em outros casos rodados. Ambos os modelos estabeleciam o transporte de apenas um único produto por trecho e desconsiderava a capacidade de tancagem nos terminais de destino e a restrição de calado nos portos. Além disso, os parâmetros do problema foram tratados de forma simplificada como forma de agilizar a obtenção da solução dos modelos. O trabalho mostrou que a seleção das viagens exerce ampla influência sobre a função objetivo do problema, ou seja, a escolha adequada do conjunto de viagens é fator preponderante na melhoria da solução de problemas de planejamento de frota.

### **2.3 Conclusão**

A composição da pesquisa bibliográfica deste trabalho baseou-se no levantamento e na discriminação sucinta de publicações que envolvessem e, sobretudo, combinassem

problemas de planejamento ou de programação (*scheduling*) de frota, roteirização (*routing*), alocação de recursos (*deployment*) e gerenciamento de estoque (*inventory management*), direcionados ao transporte marítimo de mercadorias, dando ênfase aos produtos a granel. Procurou-se, também, identificar as diversas técnicas e os tipos de abordagens utilizados pelos autores para a resolução dos problemas em destaque.

A partir dos modelos e técnicas observados, o desenvolvimento de um método de solução para os problemas de planejamento e/ou programação do transporte de múltiplos produtos envolvendo múltiplas origens e múltiplos destinos, deve levar em conta os três seguintes aspectos, de suma importância na geração das soluções ótimas, ou próximas delas: 1) definição das fronteiras físicas do sistema e dos elementos que o compõem, bem como das hipóteses a serem consideradas no modelo a ser elaborado; 2) o tratamento eficiente dos dados de entrada do modelo, impedindo que possam ser considerados dados não relevantes e 3) o controle do número de possibilidades na geração de viagens viáveis para a frota de navios considerada, de forma que os recursos computacionais não sejam comprometidos pelo número excessivo de viagens geradas.

Quando se utiliza a técnica de geração de viagens candidatas para os navios de uma frota que transporta derivados do petróleo, é possível formular o problema de planejamento e roteirização como um problema de programação linear inteira mista (*mixed integer programming - MIP*), cuja formulação caracteriza-se por selecionar as viagens mais promissoras para os navios realizarem levando em consideração a minimização dos custos relativos ao transporte dos produtos. Pela comparação de trabalhos semelhantes ao aqui estudado, esta técnica de modelagem mostrou-se a mais adequada para a resolução do problema aqui proposto.

O enfoque que se pretende dar ao problema do presente trabalho é mostrar, não apenas quais são as viagens mais adequadas a cada tipo de navio da frota e que, conseqüentemente, minimizem o custo total do sistema, mas também destacar e descrever as hipóteses e as técnicas aplicadas ao problema, o que certamente proverá um melhor entendimento a respeito do planejamento do transporte de derivados do petróleo proposto neste trabalho.

### 3 MODELAGEM DO PROBLEMA

O problema desta pesquisa trata do transporte marítimo de cabotagem para produtos derivados do petróleo. São elementos do problema: os produtos, que são classificados como derivados claros ou escuros do petróleo; os terminais marítimos, onde os produtos são carregados e/ou descarregados; e os navios, que compõem uma frota heterogênea e são responsáveis pelo transporte dos produtos entre os terminais existentes. A partir destes elementos, propõe-se elaborar modelagens do problema que minimizem o custo total de transporte dos derivados ao longo de um ano, com base no atendimento da demanda dos terminais e nos limites impostos pelos calados nos portos, pela disponibilidade de carga nos terminais de carregamento, pela capacidade de carga dos navios e pela tancagem nos terminais de descarregamento.

A modelagem de um problema de transporte estabelece o equacionamento do sistema em termos de dados pré-definidos e de variáveis que se pretende determinar. Dentro do tema deste trabalho, adota-se uma série de modelos em programação linear inteira mista para resolver o problema do transporte de derivados do petróleo, apresentando as características e as hipóteses consideradas em cada um, com a finalidade de se obter os planos de transporte mais vantajosos, que combinados ou não, encaminharão a solução final do problema. Convém destacar que a comparação entre planos alternativos de transporte se dá através do valor custo total do sistema, representado pelo resultado da função objetivo em cada um dos modelos.

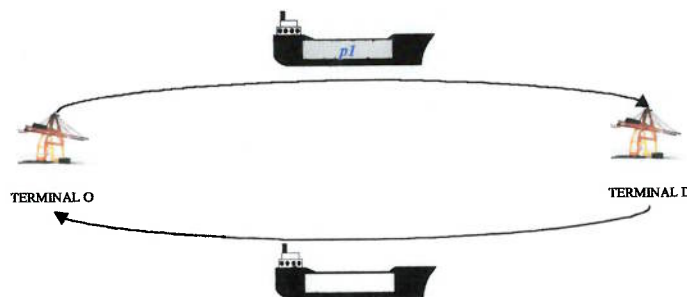
Como o problema desta dissertação envolve múltiplas opções de transporte, escolheu-se, arbitrariamente, modelar seis configurações de viagens com a finalidade de mostrar como a técnica de modelagem criada pode atender qualquer outra situação de transporte.

Em tais modelos, predefinem-se os tipos de viagens que podem ser realizadas pelos navios, ou seja, aborda-se o contexto de um serviço de transporte regular devido ao aspecto invariável das viagens. Os modelos buscam o custo mínimo de transporte, alocando os navios às viagens disponíveis de forma que a demanda por produtos nos terminais marítimos seja satisfeita.

### 3.1 Modelo simples

Primeiramente, este trabalho foca um modelo de planejamento que considera que o abastecimento de derivados de petróleo seja feito por meio de viagens simples, em que um navio de índice  $s$  ( $s = 1, 2, \dots, S$ ) transporta um único produto  $p1$  ( $p1 = 1, 2, \dots, P$ ) desde o porto ou terminal  $o$  ( $o = 1, 2, \dots, O$ ) até o porto  $d$  ( $d = 1, 2, \dots, D$ ) e retorna em vazio ao porto  $o$ , conforme mostra a figura 3.1. Deste porto  $o$ , o navio  $s$  poderá realizar outra viagem simples igual à mencionada ou diferente, ou ainda se deslocar a outro porto  $o'$  a partir do qual realizará uma nova viagem simples. Os custos de deslocamento do porto  $o$  ao porto  $o'$  não são considerados.

Como o foco aqui é o planejamento de prazo mais longo, admite-se que é possível separar os navios da frota em classes de capacidades de carga, fazendo com que a modelagem não trate os navios de forma individualizada, como na programação (*scheduling*), e sim como classes, cada qual com sua quantidade de navios.



**Fig. 3.1 – Viagem simples**

Neste modelo, diferentemente daquele abordado em Nishida (2002), considera-se o efeito da limitação de calado em todos os portos, bem como as tancagens nos terminais, porém apenas para aqueles onde ocorra a operação de descarregamento. Para produtos que sejam ofertados nos terminais, não há restrição quanto à quantidade que pode ser embarcada nos navios, uma vez que se admite a proximidade de refinarias a estes terminais, o que proporciona abastecimento suficiente conforme as quantidades requeridas. De forma geral, os dados requeridos para a modelagem do problema envolvem:

- ANO OPERACIONAL: período em que uma classe de navio está disponível para operação dentro do horizonte de planejamento. Na modelagem do problema,

adota-se o parâmetro  $AOP(s)$  para representar o ano operacional da classe  $s$  de navio.

- DEMANDA: quantidade de carga requerida por um terminal em todo horizonte de planejamento, segregada por produto. Este parâmetro será representado na modelagem do problema pela notação  $D(p,d)$  caracterizando-se então como a demanda global do produto  $p$  no terminal  $d$ .
- OFERTA: quantidade de carga disponível por um terminal, segregada por produto, em todo horizonte de planejamento para fins de abastecimento dos terminais com demanda. Este parâmetro será representado na modelagem do problema pela notação  $O(p,o)$  que define a oferta global do produto  $p$  no terminal  $o$ .
- CAPACIDADE: capacidade de carga de uma classe de navio da frota, representada pelo parâmetro  $CAP(s)$  (capacidade da classe  $s$ ).
- QUANTIDADE DE NAVIOS: para a modelagem do problema, necessita-se também conhecer a quantidade de navios de determinada classe  $s$ , para isso adota-se o parâmetro  $N(s)$ .
- TANCAGEM: capacidade de armazenagem em um terminal de descarregamento, segregada por produto. A notação utilizada para a modelagem do problema é  $Tanc(p,d)$ , caracterizando a tancagem do produto  $p$  no terminal  $d$  com demanda deste produto.
- CALADO: calado máximo de navio que pode ser atendido em um terminal. O parâmetro associado aos calados nos portos que é utilizado na modelagem do problema possui a notação  $v(o,d,s)$ , e sua definição encontra-se mais adiante.
- TEMPO DE VIAGEM: tempo de viagem redonda que engloba os tempos de atracação, desatracação e espera do navio nos terminais, bem como os tempos para carregamento e descarregamento dos produtos nos terminais. Estes dois últimos elementos de tempo são calculados por meio de taxas médias de embarque e descarga de um produto em um terminal, respectivamente. Para a modelagem do problema, utiliza-se o parâmetro  $Ttotal(o,d,p,s)$  que representa o tempo total de viagem redonda do navio de classe  $s$  que segue do terminal  $o$

para o terminal  $d$  transportando o produto  $p$ , retornando em vazio para o terminal  $o$ .

- CUSTOS: custos de permanência dos navios nos terminais, custos de combustível e óleos em geral e custos relativos à diária dos navios, estes últimos representando a taxa diária de afretamento. Na modelagem do problema, estes custos serão unificados em um único parâmetro,  $C(o, d, p, s)$ , que representa o custo total do navio de classe  $s$  para transportar o produto  $p$  do terminal  $o$  para o terminal  $d$  e retornar em vazio para o terminal  $o$ .

Com o estabelecimento do conjunto de dados necessários para o problema, o próximo passo é levantar quais as informações que se pretende determinar nas modelagens, comumente denominadas variáveis de decisão.

Neste trabalho, as variáveis de decisão envolvem: a quantidade de carga transportada em todas as viagens do mesmo tipo e o número de viagens redondas de cada tipo, ambas tomadas para todo o horizonte de planejamento. Para este primeiro modelo caracterizam-se estas variáveis como  $X(o, d, p, s)$ , que indica a quantidade do produto  $p$  transportada do terminal  $o$  ao terminal  $d$  pelo navio de classe  $s$  e  $NVR(o, d, p, s)$ , que indica o número de viagens redondas do navio de classe  $s$  para transportar o produto  $p$  do terminal  $o$  ao terminal  $d$  e retornar em vazio para o terminal  $o$ .

Abordando agora a modelagem propriamente dita, convém definir a equação principal que caracteriza o objetivo do modelo, denominada *função objetivo*, e o conjunto de restrições que estabelecem os limites de busca e determinação das variáveis de decisão. Destaca-se mais uma vez que em toda a pesquisa as modelagens do problema baseiam-se em programação linear inteira mista, na qual utilizam-se parâmetros e variáveis tanto reais como inteiras.

A função objetivo do modelo caracteriza-se pela minimização dos custos de transporte dos produtos, conforme a equação a seguir:

$$\min C_t = \sum_{o=1}^O \sum_{d=1}^D \sum_{p=1}^P \sum_{s=1}^S C(o, d, p, s) \cdot NVR(o, d, p, s) \quad (3.1a)$$

Vale destacar que os terminais não possuem oferta e/ou demanda para todos os produtos, mas somente para alguns, o que resulta na inexistência de algumas viagens e, conseqüentemente, em valores de  $C(o, d, p, s)$  iguais a zero na expressão acima.

Passando para o conjunto de restrições do problema que limitam, e ao mesmo tempo, orientam a busca da solução do modelo, destacam-se:

*- Restrições para oferta nos terminais*

A oferta nos terminais caracteriza a quantidade de carga que se tem disponível para transporte em todo o período de planejamento. Para os produtos com oferta total superior a demanda total no período considerado, as restrições devem assegurar que a quantidade de produto transportada não ultrapasse a quantidade que é disponibilizada nos terminais.

$$\sum_{d=1}^D \sum_{s=1}^S X(o, d, p, s) \leq O(p, o), \quad \forall p \text{ e } \forall o. \quad (3.1b)$$

Já para os produtos com oferta total inferior à demanda total, as restrições sugerem que toda a oferta nos terminais seja transportada.

$$\sum_{d=1}^D \sum_{s=1}^S X(o, d, p, s) = O(p, o), \quad \forall p \text{ e } \forall o. \quad (3.1c)$$

O ideal seria atender toda a demanda, isto é, que a oferta total de cada produto fosse sempre maior que a demanda total, porém respeitar-se-á a possibilidade de demanda maior que a oferta para alguns produtos.

*- Restrições para atendimento da demanda*

A demanda, por outro lado, define a quantidade de carga requerida por um terminal em todo o período de planejamento. Para os produtos com demanda total inferior à oferta total no período considerado, as restrições devem assegurar que toda a demanda nos terminais seja atendida.

$$\sum_{o=1}^O \sum_{s=1}^S X(o, d, p, s) = D(p, d), \quad \forall p \text{ e } \forall d. \quad (3.1d)$$

Já para os produtos com demanda total superior à oferta total, as restrições sugerem que nenhum terminal receba mais produto que sua demanda por este mesmo produto.

$$\sum_{o=1}^O \sum_{s=1}^S X(o, d, p, s) \leq D(p, d), \quad \forall p \text{ e } \forall d. \quad (3.1e)$$

- *Restrições para a capacidade de carga dos navios*

A capacidade de carga de um navio define a quantidade máxima que ele pode transportar durante uma viagem. Este conjunto de restrições determina o número de viagens redondas necessárias para determinado navio transportar os produtos, levando em consideração a capacidade das classes de navios.

$$X(o, d, p, s) \leq CAP(s) \cdot NVR(o, d, p, s) \cdot v(o, d, s), \quad \forall s, \forall o, \forall d \text{ e } \forall p. \quad (3.1f)$$

Observa-se nas restrições a introdução do parâmetro  $v_{ods}$ , que limita o número de viagens possíveis que podem ser realizadas pelas classes de navios. Trata-se de um parâmetro binário que assume valor 1, se o navio de capacidade  $CAP_s$  tem calado de projeto compatível com as profundidades dos portos  $o$  e  $d$ , e zero, em caso contrário. Admite-se a entrada do navio ao porto em plena carga, desconsiderando o efeito de um calado menor, caso o navio estivesse parcialmente carregado. Se assim fosse considerado, necessitaria ter conhecimento da curva TPB (tonelagem de porte bruto) *versus* calado da referida classe, onde seria consultada a possibilidade de um navio de classe  $s$  adentrar em determinado porto conforme a quantidade que está transportando. Esta curva não é utilizada na pesquisa.

- *Restrições para a capacidade de transporte*

As restrições para a capacidade de transporte baseiam-se no ano operacional dos navios de classe  $s$ , limitando o número de viagens que eles podem fazer dentro do período de planejamento.

$$\sum_{o=1}^O \sum_{d=1}^D \sum_{p=1}^P NVR(o, d, p, s) \cdot v(o, d, s) \cdot Ttotal(o, d, p, s) \leq AOP(s) \cdot N(s), \quad \forall s \quad (3.1g)$$

De fato, o mais correto seria tratar estas restrições por navio (e não por classes), uma vez que é muito difícil haver navios com anos operacionais idênticos, apesar de características similares. No entanto, a modelagem aqui proposta permite a aproximação acima devido à utilização de classes de navios.



- *Tancagem nos terminais de descarga*

A tancagem caracteriza a quantidade máxima de produto que os tanques do terminal podem armazenar. Este conjunto de restrições assegura que a quantidade transportada na viagem não exceda uma fração  $\alpha$  do lote máximo que o terminal pode receber. Esta fração  $\alpha$  é introduzida como fator de segurança do terminal, de modo a assegurar que o abastecimento seja feito quando ainda haver um estoque mínimo de  $(1 - \alpha) \cdot Tanc_{pd}$ .

$$X(o, d, p, s) \leq \alpha \cdot Tanc(p, d) \cdot NVR(o, d, p, s) \cdot v(o, d, s), \quad \forall p, \forall d, \forall o \text{ e } \forall s. \quad (3.1h)$$

Devido ao aspecto semelhante desta restrição com aquela apresentada para a capacidade de carga das classes de navios, é possível observar que apenas uma delas atuará no processo de determinação da variável  $X(o, d, p, s)$ , sendo aquela que apresentar o menor valor entre  $CAP(s)$  e  $\alpha \cdot Tanc(p, d)$ .

- *Não negatividade das variáveis*

Esta restrição impõe a não negatividade das variáveis de decisão do modelo.

$$X(o, d, p, s) \geq 0 \text{ e } NVR(o, d, p, s) \geq 0 \quad (3.1i)$$

- *Número de viagens inteiras*

Esta restrição garante que o número de viagens redondas seja inteiro.

$$NVR(o, d, p, s) \in N \quad (3.1j)$$

A modelagem acima, apesar de representar uma configuração de viagens extremamente simplificada, sem explorar a multiplicidade de combinações possíveis, fornece uma visão preliminar do comportamento do sistema em termos do limite superior do custo de transporte e da influência das restrições de calado e de tancagem neste custo.

Com a admissão de apenas viagens simples para o problema, é possível observar algumas peculiaridades do mesmo, como o fato de que em algumas viagens com terminais de descarregamento diferentes, transporta-se o mesmo produto a partir de uma mesma origem utilizando-se de um mesmo tipo de embarcação, ou ainda, que um mesmo terminal possui demanda de mais de um produto, produtos esses oferecidos por terminais próximos. Com estas observações, nota-se que o sistema de transporte pode ser mais bem explorado

pela composição de viagens, cujas características adicionais possam, eventualmente, trazer benefícios ao próprio sistema, em comparação à abordagem inicial.

Portanto, a partir do modelo inicial, pretende-se explorar configurações diferentes de viagens, que resultem na melhor utilização dos recursos e que por isto seja mais eficiente em termos de custos de transporte. Serão consideradas: viagens com retorno carregado da embarcação à origem; viagens em que uma origem distribua um mesmo produto a mais de um destino, o que pode ser vantajoso nos casos em que os valores de tancagem nos destinos sejam inferiores à capacidade de carga do navio designado a realizá-las; e viagens com transporte simultâneo de mais de um produto para um ou mais destinos.

Como forma de abordar estes problemas mais complexos, as viagens não mais são caracterizadas com índices  $o, d, p$  e  $s$ . Agora uma viagem será representada por um índice  $m$ , fazendo com que se tenha melhor controle sobre as viagens geradas sem a necessidade de impor que são nulas variáveis para índices inválidos, além de facilitar a interpretação e a busca das soluções. As viagens  $m$  nas novas modelagens são caracterizadas por parâmetros binários que definem os produtos transportados, bem como as origens e os destinos que as compõem.

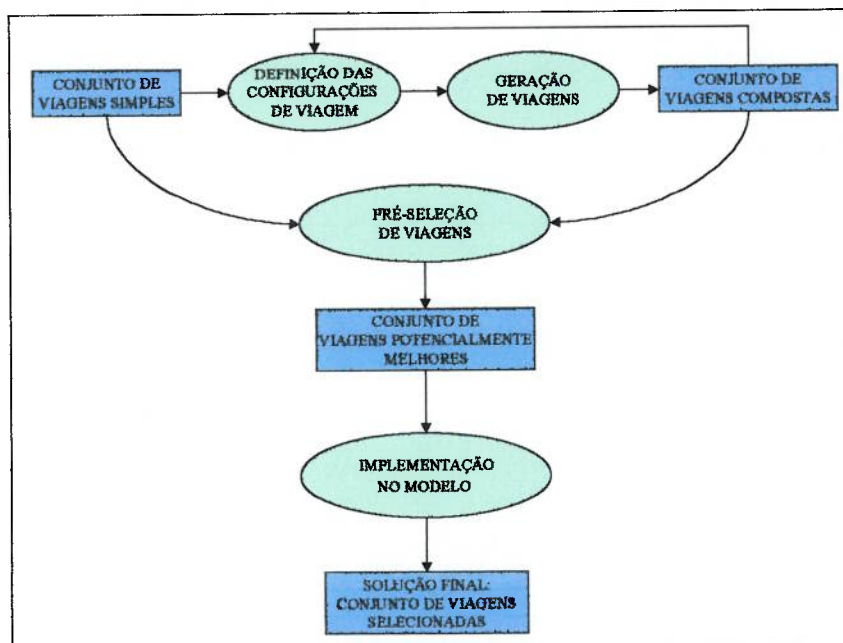
Para cada modelo, chamados agora de modelos compostos, pretende-se gerar todas as viagens de uma configuração pré-definida, ou parte delas, a partir de um conjunto de viagens simples disponíveis. Na geração parcial são utilizados procedimentos heurísticos para geração de subconjuntos de viagens, que poderão ou não sofrer uma nova pré-seleção, e que resultem em viagens classificadas como potencialmente melhores. Por fim, o conjunto de viagens  $M$  resultante será inserido no modelo de programação linear inteira mista que será responsável pela seleção final das melhores viagens que minimizem o custo total de transporte.

O modelo simples utiliza-se de restrições de capacidade de carga dos navios e de tancagem nos terminais de descarregamento. Nos modelos compostos, ao invés, são utilizadas restrições de quantidades máximas que podem ser transportadas entre origens e destinos dentro da viagem de índice  $m$ , conforme a definição do modelo abordado (trechos com um único produto e/ou trechos com mais de um produto). Tais quantidades respeitam, ao mesmo tempo, os limites superiores de capacidade de carga das classes de navios e de tancagem nos terminais de descarregamento.

### 3.2 Geração de viagens compostas

A partir da definição de viagens com índice  $m$ , convém ressaltar que as modelagens que envolvem viagens do tipo composta partem do pressuposto de que tanto as configurações das viagens quanto o conjunto de entrada nos modelos encontram-se pré-definidos. Ou seja, antes da implementação dos modelos de transporte, há a necessidade de se gerar conjuntos ou subconjuntos de viagens compostas, e, se necessário, de viagens simples, pois a criação dos parâmetros nos modelos compostos depende da pré-definição das viagens.

As viagens compostas que caracterizam uma nova configuração são geradas a partir de procedimentos heurísticos específicos, que utilizam: conjuntos de viagens simples, conjuntos de viagens compostas de outras configurações pré-existentes e combinações de conjuntos de viagens simples com conjuntos de viagens compostas. A figura 3.2 ilustra o fluxo de processos associados à busca de soluções, em que a geração de viagens é uma das fases mais importantes.



**Fig. 3.2 – Fluxo de processos para a busca de soluções**

Na fase de pré-seleção das viagens, que resultará no conjunto de viagens potencialmente melhores, costuma-se utilizar todo o conjunto disponível de viagens

geradas ou partes dele. Na pré-seleção parcial, adota-se nesta dissertação, os conceitos de ganho absoluto e ganho relativo, que caracterizam as eventuais vantagens em custo de uma viagem composta sobre as viagens que a compõem.

Admitindo que haja duas viagens simples de índices  $m_1$  e  $m_2$ , com custos totais individuais  $C(m_1)$  e  $C(m_2)$ , respectivamente. A partir destas duas viagens, é gerada a viagem composta de índice  $m_3$  cujo custo é  $C(m_3)$ . O ganho absoluto e o ganho relativo para a viagem composta  $m_3$  é calculado com as seguintes expressões:

$$GA(m_3) = (C(m_1) + C(m_2) - C(m_3)) \text{ e } GR(m_3) = \frac{GA(m_3)}{C(m_1) + C(m_2)}, \text{ respectivamente.}$$

Estes critérios foram os escolhidos para medir a eficiência de viagens compostas e para reduzir o número de viagens candidatas que servem de entrada nos modelos compostos, uma vez que, dependendo da configuração de viagem adotada, o método de composição pode fornecer um número muito grande de opções de viagem devido a sua natureza combinatória, o que compromete a obtenção de soluções razoáveis para o sistema de transporte.

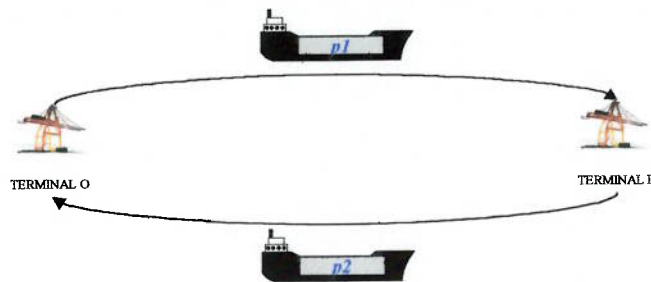
### 3.3 Modelo composto 1

O modelo composto 1 é caracterizado pela mesma configuração de viagem do modelo inicial; no entanto, considera-se o retorno carregado da embarcação à origem, representada pelo terminal  $o$ , conforme ilustra a figura 3.3. Em comparação com o modelo inicial, nota-se que esta configuração de viagem contém um novo carregamento no terminal  $d$  e um novo descarregamento no terminal  $o$ ; assim, os tempos de viagem e os custos associados sofrem um leve aumento.

Como há uma troca de produtos nos tanques do navio nas operações do terminal  $d$ , seria interessante acrescentar um tempo para limpeza dos mesmos de modo a receber o produto  $p_2$  sem restrições de periculosidade. No entanto, este tempo não será considerado no cálculo dos tempos de viagem redonda dos navios de classe  $s$ .

É óbvio que a inclusão deste tipo de viagem, com retorno carregado em lugar de vazio entre os mesmos terminais, irá contribuir para a redução do custo de transporte. De fato, estão sendo eliminados dois trechos em vazio de viagens simples do caso anterior sem a adição de qualquer outro trecho. No entanto, não deve ser esperada grande redução na

função objetivo, pois não deve ser significativo o número de situações em que haja demanda de transporte nos dois sentidos entre os terminais  $o$  e  $d$ .



**Fig. 3.3 – Viagem composta do modelo composto 1**

Os parâmetros deste problema são os seguintes:

- $prod1(m, p)$  → parâmetro binário, igual a 1, se o produto  $p$  é identificado como o primeiro produto a ser transportado na viagem de índice  $m$ , e igual a 0, em caso contrário;
- $prod2(m, p)$  → parâmetro binário, igual a 1, se o produto  $p$  é identificado como o segundo produto a ser transportado na viagem de índice  $m$  entre os terminais  $d$  e  $o$ , e igual a 0, em caso contrário;
- $orig1(m, o)$  → parâmetro binário, igual a 1, se o terminal  $o$  é identificado como o primeiro terminal de carregamento da viagem de índice  $m$ , e igual a 0, em caso contrário;
- $orig2(m, o)$  → parâmetro binário, igual a 1, se o terminal  $o$  é identificado como o segundo terminal de carregamento da viagem de índice  $m$ , e igual a 0, em caso contrário;
- $dest1(m, d)$  → parâmetro binário, igual a 1, se o terminal  $d$  é identificado como o primeiro terminal de descarregamento da viagem de índice  $m$ , e igual a 0, em caso contrário;
- $dest2(m, d)$  → parâmetro binário, igual a 1, se o terminal  $d$  é identificado como o segundo terminal de descarregamento da viagem de índice  $m$ , e igual a 0, em caso contrário;
- $nav(m, s)$  → parâmetro binário, igual a 1, se o navio de classe  $s$  é utilizado na viagem de índice  $m$ , e igual a 0, em caso contrário;

- $qtd1(m)$  → quantidade máxima do produto  $p1$  que pode ser transportada para o primeiro terminal de descarregamento da viagem de índice  $m$  ;
- $qtd2(m)$  → quantidade máxima do produto  $p2$  que pode ser transportada para o segundo terminal de descarregamento da viagem de índice  $m$  ;

Os parâmetros  $qtd1(m)$  e  $qtd2(m)$  representam os limites superiores das quantidades que podem ser transportadas na viagem de índice  $m$  , levando em consideração as restrições de capacidade da embarcação designada para realização da viagem e restrições de tancagem nos terminais de descarregamento. Além destes dois parâmetros, vale destacar os elementos  $Ttotal(m)$  - que corresponde ao tempo de viagem redonda para a viagem de índice  $m$  - e  $c(m)$  - que representa o custo total da viagem de índice  $m$  -, os quais são calculados para cada viagem de índice  $m$  e são essenciais para a modelagem dos problemas.

Devido à utilização do índice  $m$  para as viagens, as variáveis de decisão agora possuem o seguinte significado:  $x1(m)$  é a quantidade do produto  $p1$  transportada para o primeiro terminal de descarregamento em todas as viagens de índice  $m$  ;  $x2(m)$  é a quantidade do produto  $p2$  transportada para o segundo terminal de descarregamento em todas as viagens de índice  $m$  ; e  $NVR(m)$  , que é o número de viagens redondas de índice  $m$  realizado no período de planejamento. A função objetivo toma a seguinte forma:

$$\min C_t = \sum_{m=1}^M c(m) \cdot NVR(m) \quad (3.2a)$$

As restrições do problema mudam apenas no tocante a seus parâmetros e variáveis, e não quanto a sua natureza. Assim, pode-se apresentá-las:

$$\sum_{m=1}^M x1(m) \cdot prod1(m,p) \cdot orig1(m,o) + \sum_{m=1}^M x2(m) \cdot prod2(m,p) \cdot orig2(m,o) \leq O(p,o), \forall p \text{ e } \forall o \quad (3.2b)$$

$$\sum_{m=1}^M x1(m) \cdot prod1(m,p) \cdot dest1(m,d) + \sum_{m=1}^M x2(m) \cdot prod2(m,p) \cdot dest2(m,d) = D(p,d), \forall p \text{ e } \forall d \quad (3.2c)$$

$$\sum_{m=1}^M x1(m) \cdot prod1(m,p) \cdot orig1(m,o) + \sum_{m=1}^M x2(m) \cdot prod2(m,p) \cdot orig2(m,o) = O(p,o), \forall p \text{ e } \forall o \quad (3.2d)$$

$$\sum_{m=1}^M x1(m) \cdot prod1(m,p) \cdot dest1(m,d) + \sum_{m=1}^M x2(m) \cdot prod2(m,p) \cdot dest2(m,d) \leq D(p,d), \forall p \text{ e } \forall d \quad (3.2e)$$

$$\sum_{m=1}^M NVR(m) \cdot nav(m, s) \cdot Ttotal(m) \leq AOP(s) \cdot N(s), \quad \forall s \quad (3.2f)$$

$$x1(m) \leq qtd1(m) \cdot NVR(m), \quad \forall m \quad (3.2g)$$

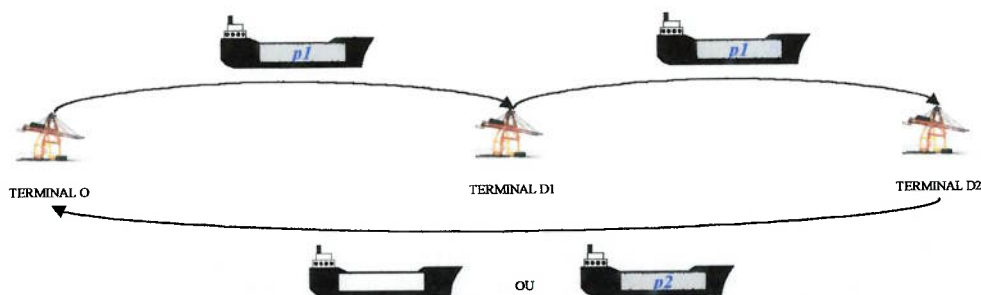
$$x2(m) \leq qtd2(m) \cdot NVR(m), \quad \forall m \quad (3.2h)$$

$$x1(m) \geq 0, \quad x2(m) \geq 0, \quad NVR(m) \geq 0 \text{ e } NVR(m) \in N, \quad \forall m \quad (3.2i)$$

As expressões (3.2b) e (3.2c) correspondem, respectivamente, às restrições de oferta e demanda para produtos com excesso de oferta, enquanto que as expressões (3.2d) e (3.2e), para produtos com demanda excedente. A restrição (3.2f) limita o número total de viagens que podem ser realizadas frente ao tempo de utilização da frota. As restrições (3.2g) e (3.2h) apontam as quantidades máximas que se pode transportar entre os terminais da viagem de índice  $m$  e o conjunto de restrições em (3.2i) indica a não negatividade das variáveis de decisão, bem com garante que a variável  $NVR(m)$  seja número inteiro.

### 3.4 Modelo composto 2

Aborda-se agora um modelo em que as viagens possuirão um terminal a mais em comparação às viagens do *modelo simples* e do *modelo composto 1*, em que um navio de classe  $s$  transporta um produto  $p1$  desde um terminal  $o$  para dois terminais,  $d1$  e  $d2$ , sendo neles descarregado conforme quantidades pré-especificadas, e retorna em vazio ou carregado para o terminal  $o$ , como mostra a figura 3.4. Nos casos em que o segundo terminal  $d2$  possua oferta de um outro produto  $p2$  e o terminal  $o$  demande tal produto, o navio fecha a viagem carregado com o produto  $p2$ .



**Fig. 3.4 – Viagem composta do modelo composto 2**

Os parâmetros associados a este modelo são:

- $prod1(m, p)$  → parâmetro binário, igual a 1, se o produto  $p$  é identificado como o primeiro produto a ser transportado na viagem de índice  $m$ , e igual a 0, em caso contrário;
- $prod2(m, p)$  → parâmetro binário, igual a 1, se o produto  $p$  é identificado como o segundo produto a ser transportado na viagem de índice  $m$ , e igual a 0, em caso contrário;
- $orig1(m, o)$  → parâmetro binário, igual a 1, se o terminal  $o$  é identificado como o primeiro terminal de carregamento da viagem de índice  $m$ , e igual a 0, em caso contrário;
- $orig2(m, o)$  → parâmetro binário, igual a 1, se o terminal  $o$  é identificado como o segundo terminal de carregamento da viagem de índice  $m$ , e igual a 0, em caso contrário;
- $dest1(m, d)$  → parâmetro binário, igual a 1, se o terminal  $d$  é identificado como o primeiro terminal de descarregamento da viagem de índice  $m$ , e igual a 0, em caso contrário;
- $dest2(m, d)$  → parâmetro binário, igual a 1, se o terminal  $d$  é identificado como o primeiro terminal de descarregamento da viagem de índice  $m$ , e igual a 0, em caso contrário;
- $dest3(m, d)$  → parâmetro binário, igual a 1, se o terminal  $d$  é identificado como o terceiro terminal de carregamento da viagem de índice  $m$ , e igual a 0, em caso contrário;
- $nav(m, s)$  → parâmetro binário igual a 1, se o navio de classe  $s$  é utilizado na viagem de índice  $m$ , e igual a 0, em caso contrário;
- $qtd1(m)$  → quantidade máxima do produto  $p1$  que pode ser transportada para o primeiro terminal de descarregamento da viagem de índice  $m$ ;
- $qtd2(m)$  → quantidade máxima do produto  $p1$  que pode ser transportada para o segundo terminal de descarregamento da viagem de índice  $m$ ;
- $qtd3(m)$  → quantidade máxima do produto  $p2$  que pode ser transportada para o terceiro terminal de descarregamento da viagem de índice  $m$ ;



Além dos parâmetros acima, tem-se o tempo da viagem redonda de índice  $m$  -  $Ttotal(m)$  - e o custo da viagem redonda de índice  $m$  -  $c(m)$ .

Para esta configuração de viagem, as variáveis de decisão ficam:  $x1(m)$  é a quantidade do produto  $p1$  transportada para o primeiro terminal de descarregamento em todas as viagens de índice  $m$ ;  $x2(m)$  é a quantidade do produto  $p1$  transportada para o segundo terminal de descarregamento em todas as viagens de índice  $m$ ;  $x3(m)$  é a quantidade do produto  $p2$  transportada para o terceiro terminal de descarregamento em todas as viagens de índice  $m$ ; e  $NVR(m)$ , que é o número de viagens redondas de índice  $m$  realizado no período de planejamento.

A formulação do modelo fica:

$$\min C_t = \sum_{m=1}^M c(m) \cdot NVR(m) \quad (3.3a)$$

Sujeito a:

$$\sum_{m=1}^M [x1(m) + x2(m)] \cdot prod1(m, p) \cdot orig1(m, o) + \sum_{m=1}^M x3(m) \cdot prod2(m, p) \cdot orig2(m, o) \leq O(p, o), \quad \forall p \text{ e } \forall o \quad (3.3b)$$

$$\sum_{m=1}^M x1(m) \cdot prod1(m, p) \cdot dest1(m, d) + \sum_{m=1}^M x2(m) \cdot prod1(m, p) \cdot dest2(m, d) + \sum_{m=1}^M x3(m) \cdot prod2(m, p) \cdot dest3(m, d) = D(p, d), \quad \forall p \text{ e } \forall d \quad (3.3c)$$

$$\sum_{m=1}^M [x1(m) + x2(m)] \cdot prod1(m, p) \cdot orig1(m, o) + \sum_{m=1}^M x3(m) \cdot prod2(m, p) \cdot orig2(m, o) = O(p, o), \quad \forall p \text{ e } \forall o \quad (3.3d)$$

$$\sum_{m=1}^M x1(m) \cdot prod1(m, p) \cdot dest1(m, d) + \sum_{m=1}^M x2(m) \cdot prod1(m, p) \cdot dest2(m, d) + \sum_{m=1}^M x3(m) \cdot prod2(m, p) \cdot dest3(m, d) \leq D(p, d), \quad \forall p \text{ e } \forall d \quad (3.3e)$$

$$\sum_{m=1}^M NVR(m) \cdot nav(m, s) \cdot Ttotal(m) \leq AOP(s) \cdot N(s), \quad \forall s \quad (3.3f)$$

$$x1(m) \leq qtd1(m) \cdot NVR(m), \quad \forall m \quad (3.3g)$$

$$x2(m) \leq qtd2(m) \cdot NVR(m), \quad \forall m \quad (3.3h)$$

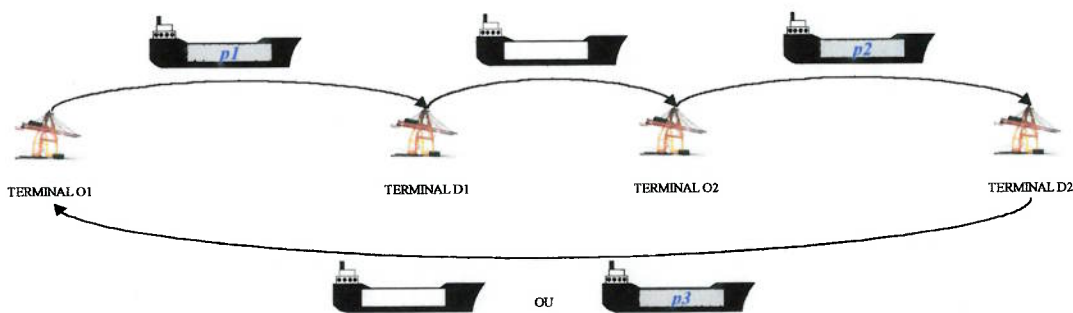
$$x3(m) \leq qtd3(m) \cdot NVR(m), \quad \forall m \quad (3.3i)$$

$$x1(m) \geq 0, x2(m) \geq 0, x3(m) \geq 0, NVR(m) \geq 0 \text{ e } NVR(m) \in N, \quad \forall m \quad (3.3j)$$

As expressões (3.3b) e (3.3c) são, respectivamente, as restrições de oferta e demanda nos casos em que há excesso de oferta enquanto que as expressões (3.3d) e (3.3e), por sua vez, representam tais restrições quando há excesso de demanda. A restrição (3.3f) limita o número de viagens que se pode realizar frente ao período disponível para transporte. Já as restrições (3.3g), (3.3h) e (3.3i) garantem que a quantidade transportada não supere as quantidades máximas permitidas, enquanto as restrições (3.3j) asseguram a não negatividade das variáveis de decisão, e que as variáveis  $NVR(m)$  sejam inteiras.

### 3.5 Modelo composto 3

Admite-se, agora, que uma viagem de índice  $m$  seja a composição de duas viagens *simples* extraídas do *modelo simples*, como ilustrado na figura 3.5. O navio de classe  $s$  parte de uma origem  $o1$  para um destino  $d1$  transportando o produto  $p1$ , em seguida, desloca-se em vazio para um outro destino  $o2$  com oferta do produto  $p2$ , e o transporta para um destino  $d2$ . A viagem é fechada com o retorno em vazio do navio à origem  $o1$  ou, quando for o caso, podendo transportar um novo produto  $p3$ , sendo este ofertado por  $d2$  e demandado por  $o1$ .



**Fig. 3.5 – Viagem composta do modelo composto 3**

Este tipo de viagem torna-se interessante pelo fato de apresentar variações em sua composição. Há casos particulares neste tipo de composição que podem ser potencialmente

atrativos. Estas situações ocorrem quando o destino  $d1$  e a origem  $o2$  ou o destino  $d2$  e a origem  $o1$  correspondem a um mesmo terminal, além da situação que engloba as duas possibilidades simultaneamente, esta última que traduz a situação já apresentada no *modelo composto 1*.

O número de tipos de viagens com retorno carregado, transportando  $p3$ , deve ser bem pequeno frente ao número de viagens com retorno em vazio, porém vale a pena considerá-las pois, de alguma forma, possam contribuir para a redução do custo de transporte quando comparado ao custo que se obtém quando todas as viagens tem retorno em vazio.

Os parâmetros do problema são os relacionados a seguir:

- $prod1(m, p)$  → parâmetro binário, igual a 1, se o produto  $p$  é identificado como o primeiro produto a ser transportado na viagem de índice  $m$ , e igual a 0, em caso contrário;
- $prod2(m, p)$  → parâmetro binário, igual a 1, se o produto  $p$  é identificado como o segundo produto a ser transportado na viagem de índice  $m$ , e igual a 0, em caso contrário;
- $prod3(m, p)$  → parâmetro binário, igual a 1, se o produto  $p$  é identificado como o terceiro produto a ser transportado na viagem de índice  $m$ , e igual a 0, em caso contrário;
- $orig1(m, o)$  → parâmetro binário, igual a 1, se o terminal  $o$  é identificado como o primeiro terminal de carregamento da viagem de índice  $m$ , em caso contrário;
- $orig2(m, o)$  → parâmetro binário, igual a 1, se o terminal  $o$  é identificado como o segundo terminal de carregamento da viagem de índice  $m$ , e igual a 0, em caso contrário;
- $orig3(m, o)$  → parâmetro binário, igual a 1, se o terminal  $o$  é identificado como o terceiro terminal de carregamento da viagem de índice  $m$ , e igual a 0, em caso contrário;
- $dest1(m, d)$  → parâmetro binário, igual a 1, se o terminal  $d$  é identificado como o primeiro terminal de descarregamento da viagem de índice  $m$ , e igual a 0, em caso contrário;

- $dest2(m, d) \rightarrow$  parâmetro binário, igual a 1, se o terminal  $d$  é identificado como o segundo terminal de carregamento da viagem de índice  $m$ , e igual a 0, em caso contrário;
- $dest3(m, d) \rightarrow$  parâmetro binário igual a 1, se o terminal  $d$  é identificado como o terceiro terminal de descarregamento da viagem de índice  $m$ , e igual a 0, em caso contrário;
- $nav(m, s) \rightarrow$  parâmetro binário, igual a 1, se o navio de classe  $s$  é utilizado na viagem de índice  $m$ , e igual a 0, em caso contrário;
- $qtd1(m) \rightarrow$  quantidade máxima do produto  $p1$  que pode ser transportada para o primeiro terminal de descarregamento da viagem de índice  $m$ ;
- $qtd2(m) \rightarrow$  quantidade máxima do produto  $p2$  que pode ser transportada para o segundo terminal de descarregamento da viagem de índice  $m$ ;
- $qtd3(m) \rightarrow$  quantidade máxima do produto  $p3$  que pode ser transportada para o terceiro terminal de descarregamento da viagem de índice  $m$ ;

Destacam-se ainda os elementos  $Ttotal(m)$  - tempo da viagem redonda de índice  $m$  - e  $c(m)$  - custo da viagem redonda de índice  $m$ .

As variáveis de decisão são definidas como  $x1(m)$ ,  $x2(m)$ ,  $x3(m)$  e  $NVR(m)$  que significam, respectivamente, a quantidade do produto  $p1$  transportada para o primeiro terminal de descarregamento em todas as viagens de índice  $m$ , a quantidade do produto  $p2$  transportada para o segundo terminal de descarregamento em todas as viagens de índice  $m$ , a quantidade do produto  $p3$  transportada para o terceiro terminal de descarregamento em todas as viagens de índice  $m$  e o número de viagens redondas de índice  $m$  realizado no período de planejamento.

A função objetivo, como nos modelos compostos 1 e 2, tem a seguinte forma:

$$\min C_t = \sum_{m=1}^M c(m) \cdot NVR(m) \quad (3.4a)$$

As restrições do modelo são as seguintes:

$$\sum_{m=1}^M x1(m) \cdot prod\ 1(m, p) \cdot orig\ 1(m, o) + \sum_{m=1}^M x2(m) \cdot prod\ 2(m, p) \cdot orig\ 2(m, o) + , \forall p \in \forall o \quad (3.4b)$$

$$\sum_{m=1}^M x3(m) \cdot prod\ 3(m, p) \cdot orig\ 3(m, o) \leq O(p, o)$$

$$\sum_{m=1}^M x1(m) \cdot prod\ 1(m, p) \cdot dest\ 1(m, d) + \sum_{m=1}^M x2(m) \cdot prod\ 2(m, p) \cdot dest\ 2(m, d) + , \forall p \in \forall d \quad (3.4c)$$

$$\sum_{m=1}^M x3(m) \cdot prod\ 3(m, p) \cdot dest\ 3(m, d) = D(p, d)$$

$$\sum_{m=1}^M x1(m) \cdot prod\ 1(m, p) \cdot orig\ 1(m, o) + \sum_{m=1}^M x2(m) \cdot prod\ 2(m, p) \cdot orig\ 2(m, o) + , \forall p \in \forall o \quad (3.4d)$$

$$\sum_{m=1}^M x3(m) \cdot prod\ 3(m, p) \cdot orig\ 3(m, o) = O(p, o)$$

$$\sum_{m=1}^M x1(m) \cdot prod\ 1(m, p) \cdot dest\ 1(m, d) + \sum_{m=1}^M x2(m) \cdot prod\ 2(m, p) \cdot dest\ 2(m, d) + , \forall p \in \forall d \quad (3.4e)$$

$$\sum_{m=1}^M x3(m) \cdot prod\ 3(m, p) \cdot dest\ 3(m, d) \leq D(p, d)$$

$$\sum_{m=1}^M NVR(m) \cdot nav(m, s) \cdot Ttotal(m) \leq AOP(s) \cdot N(s), \quad \forall m \quad (3.4f)$$

$$x1(m) \leq qtd1(m) \cdot NVR(m), \quad \forall m \quad (3.4g)$$

$$x2(m) \leq qtd2(m) \cdot NVR(m), \quad \forall m \quad (3.4h)$$

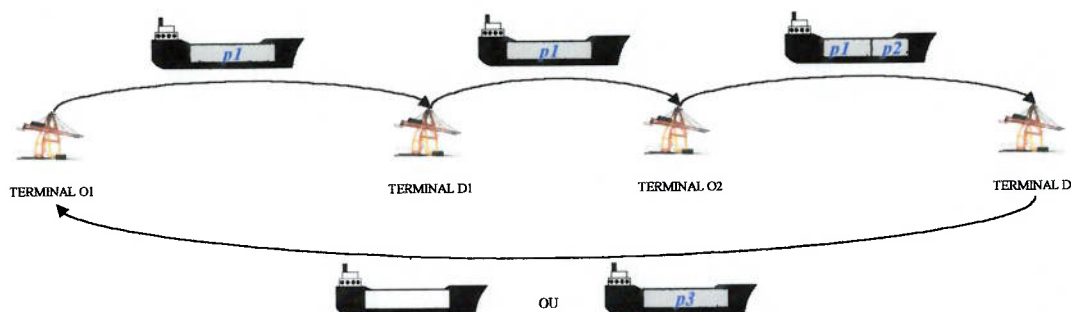
$$x3(m) \leq qtd3(m) \cdot NVR(m), \quad \forall m \quad (3.4i)$$

$$x1(m) \geq 0, x2(m) \geq 0, x3(m) \geq 0, NVR(m) \geq 0 \text{ e } NVR(m) \in N, \quad \forall m \quad (3.4j)$$

### 3.6 Modelo composto 4

O modelo composto 4 baseia-se em uma configuração extraída da junção dos modelos compostos 2 e 3, ou seja, dois produtos são transportados no percurso entre os terminais  $o1$  e  $d2$ , e apenas um produto no trecho de volta entre  $d2$  e  $o1$ . Como é mostrado na figura 3.6, um navio de classe  $s$  transporta um produto  $p1$  da origem  $o1$  para os destinos  $d1$  e  $d2$  conforme quantidades pré-especificadas. Ao chegar no destino  $d1$  ocorre o descarregamento parcial do produto  $p1$ . Posteriormente, o navio segue com a carga restante de  $p1$  para a origem  $o2$ , onde ocorre o carregamento de um segundo produto  $p2$  - que preenche o espaço deixado pelo produto  $p1$  em seu descarregamento

parcial no terminal  $d1$  -, e assim desloca-se com os dois produtos até o destino  $d2$ , onde são descarregados. No percurso de volta, o navio transporta um terceiro produto  $p3$  para a origem  $o1$  ou volta a esta origem em vazio.



**Fig. 3.6 – Viagem composta do modelo composto 4**

Apesar de os parâmetros deste modelo serem semelhantes aos apresentados nos últimos dois modelos, convém apresentá-los:

- $prod1(m, p)$  → parâmetro binário, igual a 1, se o produto  $p$  é identificado como o primeiro produto a ser transportado na viagem de índice  $m$ , e igual a 0, em caso contrário;
- $prod2(m, p)$  → parâmetro binário, igual a 1, se o produto  $p$  é identificado como o segundo produto a ser transportado na viagem de índice  $m$ , e igual a 0, em caso contrário;
- $prod3(m, p)$  → parâmetro binário, igual a 1, se o produto  $p$  é identificado como o terceiro produto a ser transportado na viagem de índice  $m$ , e igual a 0, em caso contrário;
- $orig1(m, o)$  → parâmetro binário, igual a 1, se o terminal  $o$  é identificado como o primeiro terminal de carregamento da viagem de índice  $m$ , em caso contrário;
- $orig2(m, o)$  → parâmetro binário, igual a 1, se o terminal  $o$  é identificado como o segundo terminal de carregamento da viagem de índice  $m$ , em caso contrário;
- $orig3(m, o)$  → parâmetro binário, igual a 1, se o terminal  $o$  é identificado como o terceiro terminal de carregamento da viagem de índice  $m$ , em caso contrário;

- $dest1(m, d) \rightarrow$  parâmetro binário, igual a 1, se o terminal  $d$  é identificado como o primeiro terminal de descarregamento da viagem de índice  $m$ , e igual a 0, em caso contrário;
- $dest2(m, d) \rightarrow$  parâmetro binário, igual a 1, se o terminal  $d$  é identificado como o segundo terminal de carregamento da viagem de índice  $m$ , e igual a 0, em caso contrário;
- $dest3(m, d) \rightarrow$  parâmetro binário, igual a 1, se o terminal  $d$  é identificado como o terceiro terminal de carregamento da viagem de índice  $m$ , e igual a 0, em caso contrário;
- $nav(m, s) \rightarrow$  parâmetro binário, igual a 1, se o navio de classe  $s$  é utilizado na viagem de índice  $m$ , e igual a 0, caso contrário;
- $qtd1(m) \rightarrow$  quantidade máxima do produto  $p1$  que pode ser transportada para o primeiro terminal de descarregamento da viagem de índice  $m$ ;
- $qtd2(m) \rightarrow$  quantidade máxima do produto  $p1$  que pode ser transportada para o segundo terminal de descarregamento da viagem de índice  $m$ ;
- $qtd3(m) \rightarrow$  quantidade máxima do produto  $p2$  que pode ser transportada para o segundo terminal de descarregamento da viagem de índice  $m$ ;
- $qtd4(m) \rightarrow$  quantidade máxima do produto  $p3$  que pode ser transportada para o terceiro terminal de descarregamento da viagem de índice  $m$ ;

Como nos modelos compostos anteriores, considera-se os elementos de tempo da viagem redonda de índice  $m$  -  $Ttotal(m)$  - e de custo da viagem redonda de índice  $m$  -  $c(m)$ .

A variável de decisão para o número de viagens redondas de índice  $m$  é  $NVR(m)$  e as variáveis de decisão vinculadas às quantidades transportadas são:  $x1(m)$  é a quantidade do produto  $p1$  transportada para o primeiro terminal de descarregamento em todas as viagens de índice  $m$ ;  $x2(m)$  é a quantidade do produto  $p1$  transportada para o segundo terminal de descarregamento em todas as viagens de índice  $m$ ;  $x3(m)$  é a quantidade do produto  $p2$  transportada para o segundo terminal de descarregamento em todas as viagens

de índice  $m$ ; e  $x_4(m)$  é a quantidade do produto  $p_3$  transportada para o terceiro terminal de descarregamento em todas as viagens de índice  $m$ .

A formulação matemática do problema é apresentada a seguir:

$$\min C_t = \sum_{m=1}^M c(m) \cdot NVR(m) \quad (3.5a)$$

Sujeito a:

$$\sum_{m=1}^M [x_1(m) + x_2(m)] \cdot prod_1(m, p) \cdot orig_1(m, o) + \sum_{m=1}^M x_3(m) \cdot prod_2(m, p) \cdot orig_2(m, o) + \sum_{m=1}^M x_4(m) \cdot prod_3(m, p) \cdot orig_3(m, o) \leq O(p, o), \forall p \in \forall o \quad (3.5b)$$

$$\sum_{m=1}^M x_1(m) \cdot prod_1(m, p) \cdot dest_1(m, d) + \sum_{m=1}^M x_2(m) \cdot prod_1(m, p) \cdot dest_2(m, d) + \sum_{m=1}^M x_3(m) \cdot prod_2(m, p) \cdot dest_2(m, d) + \sum_{m=1}^M x_4(m) \cdot prod_3(m, p) \cdot dest_3(m, d) = D(p, d), \forall p \in \forall d \quad (3.5c)$$

$$\sum_{m=1}^M [x_1(m) + x_2(m)] \cdot prod_1(m, p) \cdot orig_1(m, o) + \sum_{m=1}^M x_3(m) \cdot prod_2(m, p) \cdot orig_2(m, o) + \sum_{m=1}^M x_4(m) \cdot prod_3(m, p) \cdot orig_3(m, o) = O(p, o), \forall p \in \forall o \quad (3.5d)$$

$$\sum_{m=1}^M [x_1(m) + x_2(m)] \cdot prod_1(m, p) \cdot orig_1(m, o) + \sum_{m=1}^M x_3(m) \cdot prod_2(m, p) \cdot orig_2(m, o) + \sum_{m=1}^M x_4(m) \cdot prod_3(m, p) \cdot orig_3(m, o) = O(p, o), \forall p \in \forall o \quad (3.5d)$$

$$\sum_{m=1}^M x_4(m) \cdot prod_3(m, p) \cdot orig_3(m, o) = O(p, o)$$

$$\sum_{m=1}^M x_1(m) \cdot prod_1(m, p) \cdot dest_1(m, d) + \sum_{m=1}^M x_2(m) \cdot prod_1(m, p) \cdot dest_2(m, d) + \sum_{m=1}^M x_3(m) \cdot prod_2(m, p) \cdot dest_2(m, d) + \sum_{m=1}^M x_4(m) \cdot prod_3(m, p) \cdot dest_3(m, d) \leq D(p, d), \forall p \in \forall d \quad (3.5e)$$

$$\sum_{m=1}^M x_3(m) \cdot prod_2(m, p) \cdot dest_2(m, d) + \sum_{m=1}^M x_4(m) \cdot prod_3(m, p) \cdot dest_3(m, d) \leq D(p, d)$$

$$\sum_{m=1}^M NVR(m) \cdot nav(m, s) \cdot Ttotal(m) \leq AOP(s) \cdot N(s), \forall s \quad (3.5f)$$

$$x_1(m) \leq qtd_1(m) \cdot NVR(m), \quad \forall m \quad (3.5g)$$

$$x_2(m) \leq qtd_2(m) \cdot NVR(m), \quad \forall m \quad (3.5h)$$

$$x_3(m) \leq qtd_3(m) \cdot NVR(m), \quad \forall m \quad (3.5i)$$

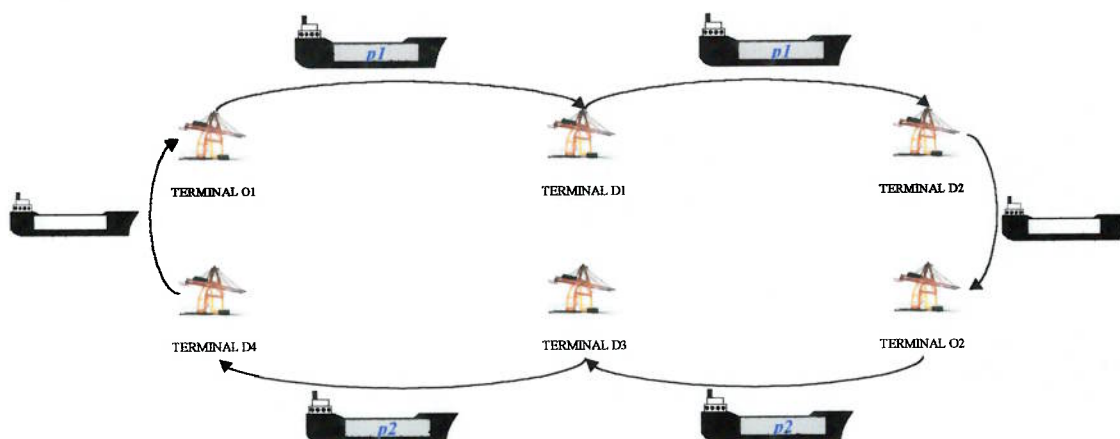
$$x_4(m) \leq qtd_4(m) \cdot NVR(m), \quad \forall m \quad (3.5j)$$

$$x_1(m) \geq 0, x_2(m) \geq 0, x_3(m) \geq 0, x_4(m) \geq 0, NVR(m) \geq 0 \text{ e } NVR(m) \in N, \quad \forall m \quad (3.5k)$$

### 3.7 Modelo composto 5



O *modelo composto 5* é formado pela composição de duas viagens do tipo apresentado no *modelo composto 2*. Como ilustra a figura 3.7, um navio de classe  $s$  transporta um produto  $p1$  de um terminal  $o1$  para dois destinos,  $d1$  e  $d2$ , segue sem carga para um terminal  $o2$ , onde é carregado um produto  $p2$ , que é distribuído para outros dois terminais,  $d3$  e  $d4$ , com demanda deste produto, e finalmente retorna em vazio para a origem  $o1$ .



**Fig. 3.7 – Viagem composta do modelo composto 5**

Esta configuração contém casos particulares que cabem ser destacados, como os casos em que os terminais  $d2$  e  $o2$ , ou os terminais  $d4$  e  $o1$ , são os mesmos. Nestas ocasiões, pode-se atingir ganhos maiores em relação ao caso usual, já que trechos em vazio são eliminados. Os parâmetros de entrada para este modelo são os seguintes:

- $prod1(m, p) \rightarrow$  parâmetro binário, igual a 1, se o produto  $p$  é identificado como o primeiro produto a ser transportado na viagem de índice  $m$ , e igual a 0, em caso contrário;
- $prod2(m, p) \rightarrow$  parâmetro binário, igual a 1, se o produto  $p$  é identificado como o segundo produto a ser transportado na viagem de índice  $m$ , e igual a 0, em caso contrário;
- $orig1(m, o) \rightarrow$  parâmetro binário, igual a 1, se o terminal  $o$  é identificado como o primeiro terminal de carregamento da viagem de índice  $m$ , em caso contrário;
- $orig2(m, o) \rightarrow$  parâmetro binário, igual a 1, se o terminal  $o$  é identificado como o segundo terminal de carregamento da viagem de índice  $m$ , em caso contrário;

- $dest1(m, d) \rightarrow$  parâmetro binário, igual a 1, se o terminal  $d$  é identificado como o primeiro terminal de descarregamento da viagem de índice  $m$ , e igual a 0, em caso contrário;
- $dest2(m, d) \rightarrow$  parâmetro binário, igual a 1, se o terminal  $d$  é identificado como o segundo terminal de carregamento da viagem de índice  $m$ , e igual a 0, em caso contrário;
- $dest3(m, d) \rightarrow$  parâmetro binário, igual a 1, se o terminal  $d$  é identificado como o terceiro terminal de carregamento da viagem de índice  $m$ , e igual a 0, em caso contrário;
- $dest4(m, d) \rightarrow$  parâmetro binário, igual a 1, se o terminal  $d$  é identificado como o quarto terminal de carregamento da viagem de índice  $m$ , e igual a 0, em caso contrário;
- $nav(m, s) \rightarrow$  parâmetro binário igual a 1, se o navio de classe  $s$  é utilizado na viagem de índice  $m$ , e igual a 0, em caso contrário;
- $qtd1(m) \rightarrow$  quantidade máxima do produto  $p1$  que pode ser transportada para o primeiro terminal de descarregamento da viagem de índice  $m$ ;
- $qtd2(m) \rightarrow$  quantidade máxima do produto  $p1$  que pode ser transportada para o segundo terminal de descarregamento da viagem de índice  $m$ ;
- $qtd3(m) \rightarrow$  quantidade máxima do produto  $p2$  que pode ser transportada para o terceiro terminal de descarregamento da viagem de índice  $m$ ;
- $qtd4(m) \rightarrow$  quantidade máxima do produto  $p2$  que pode ser transportada para o quarto terminal de descarregamento da viagem de índice  $m$ ;

Novamente, são calculados os valores de tempo da viagem redonda de índice  $m$  -  $Ttotal(m)$  - e o custo da viagem redonda de índice  $m$  -  $c(m)$  - para completar os dados de entrada do modelo. As variáveis de decisão são análogas àquelas mostradas nos itens anteriores, ou seja,  $NVR(m)$  para o número de viagens redondas de índice  $m$  e as variáveis ligadas às quantidades transportadas,  $x1(m)$ ,  $x2(m)$ ,  $x3(m)$  e  $x4(m)$  conforme os trechos carregados da viagem  $m$ .

A modelagem então toma a seguinte forma:

$$\min C_t = \sum_{m=1}^M c(m) \cdot NVR(m) \quad (3.6a)$$

Sujeito a:

$$\sum_{m=1}^M [x1(m) + x2(m)] \cdot prod1(m, p) \cdot orig1(m, o) + \sum_{m=1}^M [x3(m) + x4(m)] \cdot prod2(m, p) \cdot orig2(m, o) \leq O(p, o), \quad \forall p \in \forall o \quad (3.6b)$$

$$\sum_{m=1}^M x1(m) \cdot prod1(m, p) \cdot dest1(m, d) + \sum_{m=1}^M x2(m) \cdot prod1(m, p) \cdot dest2(m, d) + \sum_{m=1}^M x3(m) \cdot prod2(m, p) \cdot dest3(m, d) + \sum_{m=1}^M x4(m) \cdot prod2(m, p) \cdot dest4(m, d) = D(p, d), \quad \forall p \in \forall d \quad (3.6c)$$

$$\sum_{m=1}^M [x1(m) + x2(m)] \cdot prod1(m, p) \cdot orig1(m, o) + \sum_{m=1}^M [x3(m) + x4(m)] \cdot prod2(m, p) \cdot orig2(m, o) = O(p, o), \quad \forall p \in \forall o \quad (3.6d)$$

$$\sum_{m=1}^M x1(m) \cdot prod1(m, p) \cdot dest1(m, d) + \sum_{m=1}^M x2(m) \cdot prod1(m, p) \cdot dest2(m, d) + \sum_{m=1}^M x3(m) \cdot prod2(m, p) \cdot dest3(m, d) + \sum_{m=1}^M x4(m) \cdot prod2(m, p) \cdot dest4(m, d) \leq D(p, d), \quad \forall p \in \forall d \quad (3.6e)$$

$$\sum_{m=1}^M NVR(m) \cdot nav(m, s) \cdot Ttotal(m) \leq AOP(s) \cdot N(s), \quad \forall s \quad (3.6f)$$

$$x1(m) \leq qtd1(m) \cdot NVR(m), \quad \forall m \quad (3.6g)$$

$$x2(m) \leq qtd2(m) \cdot NVR(m), \quad \forall m \quad (3.6h)$$

$$x3(m) \leq qtd3(m) \cdot NVR(m), \quad \forall m \quad (3.6i)$$

$$x4(m) \leq qtd4(m) \cdot NVR(m), \quad \forall m \quad (3.6j)$$

$$x1(m) \geq 0, x2(m) \geq 0, x3(m) \geq 0, x4(m) \geq 0, NVR(m) \geq 0 \text{ e } NVR(m) \in N, \quad \forall m \quad (3.6k)$$

### 3.8 Generalização da modelagem

Foram apresentados alguns modelos de programação linear inteira mista que focam o planejamento do transporte marítimo de derivados do petróleo. Como pode ser verificado ao longo da apresentação das modelagens, nota-se a forma estruturada como são criados novos parâmetros conforme são introduzidas características novas para as viagens, pela

inclusão de novos produtos, e/ou novas origens e/ou novos destinos. Isso mostra que outras configurações de viagens podem ser exploradas, tornando possível estudar cenários com um número maior de elementos, obtendo modelos mais completos, e, conseqüentemente, mais complexos.

Admitindo-se que o modelo com somente viagens simples seja o início do processo de extensão de configurações de viagens para um dado cenário, é possível que a modelagem possa ter uma forma mais genérica. Para tanto, cada viagem simples de índice  $m$  deve ser representada pelos parâmetros  $prod\langle n_p \rangle(m, p)$ ,  $orig\langle n_o \rangle(m, o)$ ,  $dest\langle n_d \rangle(m, d)$ , em que  $n_p = n_o = n_d = 1$  já que trata-se do transporte de um único produto a partir de uma origem para um destino, permite-se que o método de modelagem seja descrito de forma mais genérica.

Ao adicionar um novo produto  $p$  em uma viagem  $m$ , acrescenta-se um novo parâmetro binário  $prd\langle n_p + 1 \rangle(m, p)$ , em que  $n_p$  identifica a quantidade de produtos consideradas no modelo anterior (viagens simples), cujo valor é igual a 1, quando o produto  $p$  é transportado na viagem  $m$ , e 0, caso contrário.

Quando se adiciona um novo terminal de oferta, acrescenta-se um parâmetro binário da forma  $orig\langle n_o + 1 \rangle(m, o)$ , que recebe valor 1, se na viagem de índice  $m$  há carregamento de pelo menos um produto no terminal  $o$ , e 0, caso contrário. Vale destacar que somente quando a expressão  $prd\langle n_p + 1 \rangle(m, p) \cdot orig\langle n_o + 1 \rangle(m, o)$  for igual a 1 é que se tem conhecimento de que há carregamento do produto  $p$  no terminal  $o$  na viagem de índice  $m$ .

A mesma lógica acima pode ser adotada no caso de terminais com demanda. Adicionando-se um novo terminal deste tipo, adota-se o parâmetro binário  $dest\langle n_d + 1 \rangle(m, d)$  que recebe valor 1, se na viagem de índice  $m$  há descarregamento de pelo menos um produto no terminal  $d$ , e 0, caso contrário. A expressão  $prd\langle n_p = 1 \rangle(m, p) \cdot dest\langle n_d + 1 \rangle(m, d)$  quando possui valor unitário, mostra que produto  $p$  é descarregado no terminal  $d$  na viagem de índice  $m$ .

Quanto às quantidades máximas que podem ser transportadas nas viagens, pode-se dizer que o número de parâmetros deste tipo está vinculado ao valor obtido da soma do

número de produtos requeridos em todos os terminais. Para compreender o que foi exposto, convém apresentar um exemplo: supõe-se que determinada configuração de viagem possui três terminais ( $d1$ ,  $d2$  e  $d3$ ) com demanda de três produtos ( $p1$ ,  $p2$  e  $p3$ ), em que o terminal  $d1$  apresenta demanda do produto  $p1$ , o terminal  $d2$ , do produto  $p2$  e o terminal  $d3$ , dos produtos  $p1$  e  $p3$ . Para este caso, haveria, então, quatro parâmetros ligados às quantidades transportadas, o primeiro,  $q1(m)$ , para a quantidade do produto  $p1$  transportada para o terminal  $d1$ , o segundo,  $q2(m)$ , para a quantidade do produto  $p2$  para o terminal  $d2$ , os terceiro e quarto parâmetros,  $q3(m)$  e  $q4(m)$ , para as quantidades dos produtos  $p1$  e  $p3$  destinadas ao terminal  $d3$ , respectivamente.

As variáveis de decisão para as quantidades a serem efetivamente transportadas entre origens e destinos dentro de uma viagem de índice  $m$  seguem o mesmo raciocínio de atribuição para as quantidades máximas, porém são variáveis a serem determinadas nos modelos, ao contrário das quantidades máximas que já são conhecidas. A variável de decisão para o número de viagens redondas permanece sempre com a mesma notação  $NVR(m)$ .

Com relação às restrições do problema, nota-se diferença de um modelo para outro quando se observam as restrições de oferta e demanda nos terminais, cujo número de parcelas varia conforme o número de terminais e número de produtos presentes na configuração estudada. A restrição de capacidade de transporte das embarcações permanece com a mesma notação, bem como àquelas referentes às quantidades máximas que podem ser transportadas, porém com a diferença de incluir mais ou menos variáveis.

Observa-se então, a partir do método descrito, que existe uma grande variedade de viagens que podem ser estudadas e combinadas de forma a prover subsídios para a implantação de planos de transporte com custos ainda mais reduzidos. Poderia, por exemplo, ser explorada a situação em que diversos produtos são carregados em um terminal e parcelas de cada um deles são descarregadas em vários outros terminais; ao esvaziar o navio, seguir para outro terminal de oferta e repetir procedimento análogo. A partir disto, efetuar análise de sensibilidade ao variar as quantidades de cada produto descarregadas.

Contudo, a elaboração do modelo terá maior complexidade quando se pretende gerar roteiros com muitos terminais e produtos, já que o número de parcelas nas restrições de

oferta e demanda tende a aumentar, bem como o número de variáveis de decisão que se deseja determinar.

Diante do que foi exposto, conclui-se que diversas opções de transporte podem ser exploradas com a técnica de modelagem aqui desenvolvida, a qual mostra-se bastante adequada ao problema.

## 4 ESTUDO DE CASO

O estudo de caso considerado para se avaliar e implementar os modelos descritos no capítulo anterior é o do transporte de derivados claros e escuros do petróleo na costa brasileira, cuja responsabilidade é da Transpetro, empresa subsidiária da Petrobrás. Para isto, são utilizados dados representativos do problema; os modelos matemáticos são implementados computacionalmente por meio da linguagem de alto nível GAMS (*Generic Algebraic Modelling System*) – Sistema Geral de Modelagem Algébrica utilizando-se do *solver* CPLEX 7.0.

O processo de composição de viagens, bem como os cálculos dos tempos e custos de cada viagem são feitos em rotinas desenvolvidas em *Visual Basic 6.0* com auxílio de planilhas do *Microsoft Excel*.

Inicialmente são apresentados os dados utilizados para o estudo de caso e, a seguir, são apresentados os resultados obtidos para diversas configurações de viagens que foram apresentadas no capítulo 3.

### 4.1 Dados para o estudo de caso

De posse de um banco de dados cedido pela Petrobrás com informações de movimentação na importação, exportação e cabotagem, e que servirá como base para a formação dos dados de entrada para os modelos no GAMS, houve a necessidade de desenvolvimento de rotinas de programação com a finalidade de se extrair os dados realmente relevantes para o problema. O banco de dados, que caracterizava as operações de transporte, continha os seguintes dados: nome do navio, número da viagem, porto de origem, porto de destino, data e hora da chegada, tempo de espera, tempo de atracação, tempo de desatracação, tempo de carregamento ou descarregamento dos produtos e quantidade embarcada ou descarregada dos mesmos.

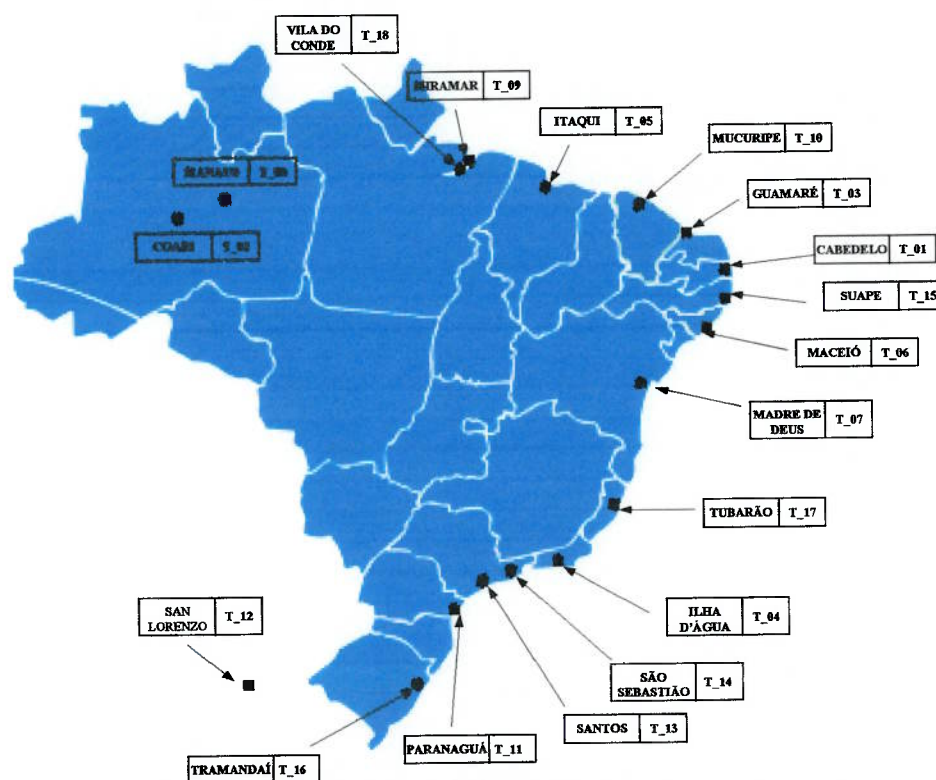
Como o foco estabelecia o transporte de cabotagem e havia terminais que não apresentavam movimentação significativa com relação à movimentação geral, definiu-se o critério de selecionar os produtos e terminais participantes da cabotagem, que apresentassem uma grande parcela da movimentação total dentro do período de um ano de movimentação, tempo este escolhido para o planejamento aqui proposto. Os terminais e

produtos selecionados são apresentados na tabela 4.1, enquanto que, na figura 4.1, é possível visualizar os terminais ao longo da costa brasileira.

**Tabela 4.1 – Terminais e produtos**

Terminal 1	CABEDELÓ
Terminal 2	COARI
Terminal 3	GUAMARÉ
Terminal 4	ILHA D'ÁGUA/GEGUA
Terminal 5	ITAQUI/S. LUIS
Terminal 6	MACEIÓ/SEAL
Terminal 7	MADRE DE DEUS/SALVADOR
Terminal 8	MANAUS-REMAN
Terminal 9	MIRAMAR/BELEM
Terminal 10	MUCURIPÉ/FORTALEZA
Terminal 11	PARANAGUA/REPAR
Terminal 12	S. LORENZO
Terminal 13	SANTOS/GESAN
Terminal 14	SSEBASTIAO/GEBAST
Terminal 15	SUAPE/GENEST
Terminal 16	TRAMANDAI/OSORIO
Terminal 17	TUBARAO/E-P-ES/GOPEV
Terminal 18	VILA DO CONDE/BAVIC

Produto 1	DIESEL B(PF60)
Produto 2	DIESEL TIPO D
Produto 3	GASOLINA A
Produto 4	NAFTA PETROQUIMICA
Produto 5	OLEO COMBUSTIVEL A1
Produto 6	RGN MISTURA
Produto 7	URUCU



**Fig. 4.1 – Localização geográfica dos terminais**

Com os dezoito (18) terminais e os sete (7) produtos selecionados, parte-se para o detalhamento dos dados de entrada dos modelos que foram relacionados no início do



capítulo anterior. Estes dados foram obtidos a partir de rotinas e filtros elaborados em *Visual Basic 6.0* e com auxílio de planilhas do *Microsoft Excel* sobre o banco de dados disponível, e também a partir do *site* da Transpetro ([www.transpetro.com.br](http://www.transpetro.com.br)).

#### 4.1.1 Demandas e ofertas nos terminais

As demandas e ofertas globais de cada produto em cada terminal marítimo foram levantadas para representarem a quantidade de carga requerida e disponível, respectivamente, em todo o período de um ano de planejamento. Os valores são mostrados na tabela 4.2 (valores em milhares de m<sup>3</sup>).

**Tabela 4.2 – Demanda e oferta de produtos nos terminais**

DEMANDA	T-01	T-02	T-03	T-04	T-05	T-06	T-07	T-08	T-09	T-10	T-11	T-12	T-13	T-14	T-15	T-16	T-17	T-18
P-1	229,33	0,00	0,00	29,30	0,00	211,15	0,00	710,69	291,47	166,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	665,79	0,00
P-4	0,00	0,00	0,00	231,89	0,00	0,00	0,00	0,00	313,67	320,21	0,00	0,00	0,00	119,86	144,81	0,00	0,00	0,00
P-5	106,18	0,00	0,00	0,00	228,42	104,07	0,00	144,51	205,69	375,52	0,00	0,00	0,00	0,00	391,67	0,00	0,00	0,00
P-7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1139,94	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2325,64	0,00	0,00	0,00
P-9	0,00	0,00	0,00	0,00	105,65	0,00	0,00	106,78	14,34	30,96	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	54,97	408,49
P-11	0,00	0,00	0,00	80,68	0,00	0,00	2144,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1016,14	0,00	0,00	0,00	0,00
P-12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	103,90	1584,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	17,65	0,00	0,00	0,00	0,00
OFERTA	T-01	T-02	T-03	T-04	T-05	T-06	T-07	T-08	T-09	T-10	T-11	T-12	T-13	T-14	T-15	T-16	T-17	T-18
P-1	0,00	0,00	0,00	0,00	1472,60	0,00	141,44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	795,94	101,38	0,00	0,00	0,00	0,00
P-2	0,00	0,00	0,00	0,00	623,45	0,00	114,07	30,94	0,00	0,00	0,00	0,00	276,96	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P-3	0,00	0,00	0,00	743,35	0,00	0,00	30,49	0,00	0,00	0,00	76,01	0,00	823,80	8,23	0,00	0,00	0,00	0,00
P-4	0,00	0,00	0,00	709,18	0,00	0,00	0,00	015,13	0,00	0,00	280,28	570,78	0,00	483,82	0,00	0,00	0,00	0,00
P-5	0,00	0,00	0,00	128,78	0,00	0,00	60,87	0,00	0,00	0,00	470,79	0,00	171,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P-6	0,00	0,00	3378,94	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P-7	0,00	1669,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

#### 4.1.2 Capacidade de carga dos navios

Os navios da frota, no total de 85, foram divididos em quatro classes conforme mostra a tabela 4.3, que para cada classe constam: as faixas inferior e superior de capacidade de carga, o número de navios, a média das capacidades de carga, e o calado de projeto.

**Tabela 4.3 – Classes e capacidades dos navios**

Classe	Capacidade (m <sup>3</sup> )	Número de navios	Capac. média (m <sup>3</sup> )	Calado (m)
1	até 15.000	4	10.000	7,5
2	de 15.001 até 40.000	27	26.000	9,5
3	de 40.001 até 65.000	28	45.000	12
4	de 65.001 em diante	26	82.000	13,5

Uma vez definidos os dados relativos às cargas e aos navios, falta relatar os dados ligados aos portos ou terminais marítimos que envolvem a tancagem nos terminais de descarregamento, segregada por produto, e os calados máximos para operação de navios.

#### 4.1.3 Tancagens nos terminais de descarregamento

Conforme explicitado nas modelagens, considera-se como restrição no problema apenas as tancagens dos terminais de descarregamento, uma vez que os terminais de carregamento, ou com oferta, localizam-se próximos a refinarias e tendem a ter tancagens maiores para abastecer diversos outros terminais. A tabela 4.4 mostra as tancagens dos terminais de descarregamento, segregadas por produto (valores em milhares de m<sup>3</sup>). Como destacado no capítulo anterior, será utilizada uma fração  $\alpha$  das tancagens em favor da manutenção de um estoque mínimo de cada produto nos terminais, fração esta que será considerada igual a 0,8 dos valores mostrados na tabela 4.4.

**Tabela 4.4 – Tancagens nos terminais de descarregamento**

TANCAGEM	T.01	T.02	T.03	T.04	T.05	T.06	T.07	T.08	T.09	T.10	T.11	T.12	T.13	T.14	T.15	T.16	T.17	T.18
P.1	6,62	0,00	0,00	0,00	0,00	20,26	0,00	100,00	5,29	2,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	14,72	0,00
P.2	0,00	0,00	0,00	10,26	0,00	0,00	0,00	0,00	5,70	5,47	0,00	0,00	0,00	54,84	4,33	0,00	0,00	0,00
P.3	3,07	0,00	0,00	0,00	5,32	9,99	0,00	100,00	3,74	6,41	0,00	0,00	0,00	0,00	11,72	0,00	0,00	0,00
P.4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	277,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	188,80	0,00	0,00
P.5	0,00	0,00	0,00	0,00	12,91	0,00	0,00	100,00	22,38	22,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	22,38	7,46
P.6	0,00	0,00	0,00	21,25	0,00	0,00	193,84	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	65,83	0,00	0,00	0,00	0,00
P.7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	9,39	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

#### 4.1.4 Calados nos terminais

Conforme já discutido, considera-se a limitação de calado no acesso dos navios aos terminais. A tabela 4.5 mostra a compatibilidade entre calado de projeto do navio e profundidade do terminal; a letra S indica que a classe de navio pode operar no terminal e a letra N indica a não permissão de acesso ao mesmo.

Convém observar que não se considera, neste estudo, que esta relação de compatibilidade possa ser alterada quando o navio estiver parcialmente carregado, por limitação da tancagem no terminal (isto poderia ser introduzido sem maior dificuldade na modelagem).

**Tabela 4.5 – Compatibilidade entre os calados dos navios e nos portos**

	T.01	T.02	T.03	T.04	T.05	T.06	T.07	T.08	T.09	T.10	T.11	T.12	T.13	T.14	T.15	T.16	T.17
Classe 1 (H=7,50m)	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Classe 2 (H=9,50m)	N	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Classe 3 (H=12,00m)	N	N	S	S	S	N	S	S	N	S	N	S	N	S	S	S	S
Classe 4 (H=13,50m)	N	N	S	S	S	N	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S	S

#### 4.1.5 Tempos e custos nas viagens

Os tempos de operação nos portos e os tempos de viagem dos navios, bem como os custos resultantes, dependem exclusivamente do tipo de viagem considerada, assim em cada modelo novos cálculos serão feitos para estes parâmetros. No entanto, há alguns dados, tempos e custos envolvidos que são considerados invariáveis, tais como: tempos de

espera dos navios para operar e tempos de atracação e desatracação dos navios nos terminais, velocidade de cruzeiro de cada classe de navio, tempos de viagem entre terminais (calculados a partir da distância e velocidade do navio), preços de combustíveis “*bunker HFO*” (*Heavy Fuel Oil*) e “*bunker MDO*” (*Middle Diesel Oil*), valor da taxa diária de afretamento do navio, custo de visita do navio em cada terminal e as taxas de consumo de combustíveis HFO e MDO por cada classe de navio. Estes dados são apresentados na tabela 4.6 a seguir, exceto àqueles ligados aos custos de utilização dos terminais e aos tempos de viagem entre terminais que são apresentados nas tabelas 4.7 e 4.8, respectivamente. Para estes últimos, os valores são iguais para todas as classes de navios, já que as velocidades de cruzeiros das quatro classes foram consideradas iguais a 14 nós. Os preços de *bunker HFO* e *bunker MDO* utilizados são de 0,85 e 0,70 reais por quilograma (R\$/kg), respectivamente.

**Tabela 4.6 – Principais parâmetros do modelo**

	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
Tempo no porto (em horas)	42,88	33,90	41,51	56,65
Custo da diária do navio (R\$/dia)	11.911,11	12.827,27	17.300,00	19.100,00
Consumo de HFO em viagem (kg/hora)	26,08	21,04	25,43	36,04
Consumo de MDO em viagem (kg/hora)	2,02	3,99	1,14	2,12
Consumo de HFO no carregamento (kg/hora)	10,00	5,27	6,14	9,39
Consumo de MDO no carregamento (kg/hora)	2,18	4,16	1,42	2,87
Consumo de HFO no descarregamento (kg/hora)	28,72	14,35	23,59	40,89
Consumo de MDO no descarregamento (kg/hora)	4,16	6,52	5,63	5,57

**Tabela 4.7 – Custos de utilização dos terminais (em milhares de reais)**

RVISITA	T_01	T_02	T_03	T_04	T_05	T_06	T_07	T_08	T_09	T_10	T_11	T_12	T_13	T_14	T_15	T_16	T_17	T_18
Classe 1	3,16	25,00	25,00	25,00	4,34	5,27	6,53	14,03	41,23	2,44	6,15	25,00	6,01	7,12	4,41	4,34	4,80	25,00
Classe 2	3,59	25,00	25,00	25,00	5,19	5,91	7,98	15,11	41,23	2,65	8,88	25,00	6,90	7,12	5,13	5,19	5,19	25,00
Classe 3	25,00	25,00	25,00	25,00	6,25	25,00	13,11	16,48	41,23	25,00	13,86	25,00	10,78	6,18	6,75	6,25	6,25	25,00
Classe 4	25,00	25,00	25,00	25,00	7,53	25,00	15,96	16,48	41,23	25,00	25,00	25,00	12,27	9,07	7,13	25,00	7,53	25,00

**Tabela 4.8 – Tempos de viagens entre terminais (em horas)**

TEMPOS DE VIAGEM	T_01	T_02	T_03	T_04	T_05	T_06	T_07	T_08	T_09	T_10	T_11	T_12	T_13	T_14	T_15	T_16	T_17	T_18
T_01	0,00	135,72	13,90	83,02	48,20	13,07	32,67	117,46	67,96	22,83	106,16	188,20	94,40	91,63	6,24	127,38	65,54	69,32
T_02	135,72	0,00	125,13	218,75	90,83	148,79	168,39	18,26	71,84	117,27	241,88	303,92	230,12	227,36	141,97	263,10	201,26	73,21
T_03	13,90	125,13	0,00	96,92	36,37	26,97	46,57	106,87	56,36	10,01	120,06	182,10	108,30	105,53	20,14	141,28	79,44	57,73
T_04	83,02	218,75	96,92	0,00	131,22	70,11	50,43	200,48	150,98	105,85	27,21	92,32	15,14	10,92	77,32	45,66	18,79	152,35
T_05	48,20	90,83	36,37	131,22	0,00	61,27	80,87	72,57	20,06	27,06	154,36	216,40	142,60	139,83	54,44	175,58	113,74	21,43
T_06	13,07	148,79	26,97	70,11	61,27	0,00	20,06	130,53	81,02	35,90	93,78	156,59	81,87	78,95	7,21	114,85	52,55	62,39
T_07	32,67	168,39	46,57	50,43	80,87	20,06	0,00	150,13	100,63	55,50	73,64	136,68	61,81	58,96	27,20	94,78	33,64	102,00
T_08	117,46	18,26	106,87	200,48	72,57	130,53	150,13	0,00	53,58	99,01	223,62	285,66	211,86	209,09	123,70	244,84	183,00	54,95
T_09	67,96	71,84	56,36	150,98	20,06	81,02	100,63	53,58	0,00	47,05	174,12	236,15	162,35	159,59	74,20	195,33	133,49	1,37
T_10	22,83	117,27	10,01	105,85	27,06	35,90	55,50	99,01	47,05	0,00	128,99	191,03	117,23	114,46	29,07	150,21	88,37	48,42
T_11	106,16	241,88	120,06	27,21	154,36	93,78	73,64	223,62	174,12	128,99	0,00	65,26	12,38	16,30	100,84	21,99	45,54	175,49
T_12	188,20	303,92	182,10	92,32	216,40	156,59	136,68	285,66	236,15	191,03	65,26	0,00	77,56	81,56	163,42	43,20	110,81	237,52
T_13	94,40	230,12	108,30	15,14	142,60	81,87	61,81	211,86	162,35	117,23	12,38	77,56	0,00	4,30	89,00	32,98	33,16	163,72
T_14	91,63	227,36	105,53	10,92	139,83	78,95	58,96	209,09	159,59	114,46	16,30	81,56	4,30	0,00	86,08	35,90	29,32	160,96
T_15	6,24	141,97	20,14	77,32	54,44	7,21	27,20	123,70	74,20	29,07	100,84	163,42	89,00	86,08	0,00	121,98	59,68	75,57
T_16	127,38	263,10	141,28	45,66	175,58	114,85	94,78	244,84	195,33	150,21	21,99	43,20	32,98	35,90	121,98	0,00	64,45	196,70
T_17	65,54	201,26	79,44	18,79	113,74	52,55	33,64	183,00	133,49	88,37	45,54	110,81	33,16	29,32	59,68	64,45	0,00	134,86
T_18	69,32	73,21	57,73	152,35	21,43	62,39	102,00	54,95	1,37	48,42	175,49	237,52	163,72	180,96	75,57	196,70	134,86	0,00

Para execução dos modelos relacionados ao problema, resta ainda calcular os tempos de duração das viagens e os custos associados, que variam conforme o tipo de viagem

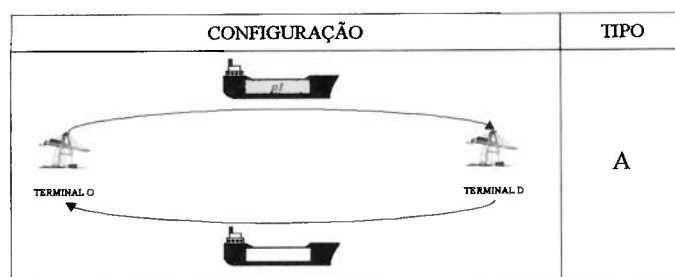
considerada. No capítulo anterior, foram apresentados seis tipos de configurações que aqui serão exploradas para fins de obtenção dos melhores resultados para o problema de planejamento do transporte marítimo de derivados do petróleo. Cada tipo de roteiro pode apresentar variações quanto às quantidades de carga a serem embarcadas em uma origem e às quantidades a serem descarregadas no(s) destino(s), bem como conter trechos em que as embarcações estejam carregadas ou sem carga.

Para o cálculo dos tempos e custos de viagem convém definir os conjuntos de viagens para os casos que serão solucionados, identificando quais os tipos de viagens que podem ser realizadas por cada classe de navio. A partir disso, pretende-se escolher o modelo a ser utilizado dentre os existentes, para, em seguida, processar sua implementação computacional no GAMS. Os modelos codificados no GAMS encontram-se no anexo A, enquanto que as soluções com a lista de viagens selecionadas em cada um dos casos testados encontram-se no anexo B.

#### 4.2 Caso 1: viagens simples

O caso 1 aborda o modelo inicial introduzido no capítulo anterior e contempla todas as viagens simples que podem ser realizadas pelos navios, conforme ilustra a figura 4.2.

Como neste caso existe apenas o transporte de um único produto de uma origem até um destino, o limite superior para a quantidade de carga que pode ser transportada em cada viagem é restringida pelo menor valor encontrado entre a capacidade de carga do navio de classe  $s$  designado para realização da viagem e a fração  $\alpha$  da tancagem no terminal de destino  $d$ .



**Fig. 4.2 – Tipo de viagem do caso 1**

**Tabela 4.9 – Produtos ofertados e demandados nos terminais**

<b>DEMANDA</b>	P_1	T_01	T_06	T_08	T_09	T_10	T_17
	P_2	T_04	T_09	T_10	T_14	T_15	
	P_3	T_01	T_05	T_06	T_08	T_09	T_10 T_15
	P_4	T_07	T_16				
	P_5	T_05	T_08	T_09	T_10	T_17	T_18
	P_6	T_04	T_07	T_14			
	P_7	T_07	T_08				
<b>OFERTA</b>	P_1	T_05	T_07	T_13	T_14		
	P_2	T_05	T_07	T_08	T_13		
	P_3	T_04	T_07	T_11	T_13	T_14	
	P_4	T_04	T_08	T_11	T_12	T_14	
	P_5	T_04	T_07	T_11	T_13		
	P_6	T_03					
	P_7	T_02					

As possibilidades de viagem podem ser visualizadas através da tabela 4.9, que mostra todos os produtos ofertados e demandados em cada terminal marítimo. Pela combinação de origens, destinos e produtos, obtém-se um conjunto de viagens simples contendo 472 candidatas, das quais 118 são atribuídas a cada classe  $s$  de navios.

Antes de apresentar os resultados deste primeiro caso, é importante esclarecer que, dada a complexidade computacional do problema, não se consegue obter uma solução exata; isto é, o procedimento é interrompido antes de se obter a solução ótima.

O *solver* CPLEX, escolhido no GAMS para determinação das soluções em programação linear inteira mista (MIP – *Mixed Integer Programming*), utiliza um algoritmo *branch-and-bound* (com cortes) para resolver uma série de subproblemas de programação linear. No processamento dos modelos no GAMS, existem opções nele embutidas que podem ser escolhidas pelo usuário de modo a orientar a busca das soluções. As opções do GAMS utilizadas no processamento dos casos descritos neste capítulo são:

- RESLIM → ajusta o limite de tempo de processamento do modelo. Adota-se nesta pesquisa, um tempo de 1.000.000 segundos.
- OPTCR → tolerância relativa, definida pela seguinte expressão:
 
$$\frac{|BP - BF|}{(1.0e - 10 + |BF|)} < OptCR$$
 onde BF é o valor da função objetivo da solução encontrada, enquanto BP é o valor da função objetivo da melhor solução inteira possível. Adota-se um *OptCR* com valor igual a 0,01, porém alguns casos podem ser interrompidos com valores de *OptCR* maiores, devido à dificuldade de se encontrar soluções abaixo desta tolerância.

NODESEL e VARSEL → opções estratégicas para seleção dos nós no método *branch-and-bound*.

Na implementação computacional do modelo no GAMS (*modelo inicial* do Anexo A), quatro situações do caso 1 foram processadas, conforme mostra a tabela 4.10. O subcaso 1.1 considera o modelo sem restrições de calado nos portos e sem restrições de tancagem nos terminais de descarregamento; os subcasos 1.2 e 1.3 avaliam a presença de uma destas restrições e a ausência da outra; e o subcaso 1.4 representa a principal situação do caso 1, em que ambos os tipos de restrições são embutidas no modelo. Estes subcasos dão a idéia da influência das restrições de calado e das restrições de tancagem sobre o valor da função objetivo obtida após o processamento do modelo no GAMS. Os principais resultados do caso são apresentados na tabela 4.10.

**Tabela 4.10 – Implementações do caso 1**

<i>Subcaso</i>	<i>Restrições de calado</i>	<i>Restrições de tancagem</i>	<i>OptCR</i>	<i>Função objetivo da solução encontrada (em milhares de reais)</i>	<i>Função objetivo da melhor solução inteira possível (em milhares de reais)</i>	<i>Número de viagens selecionadas</i>
1.1	NÃO	NÃO	1,38%	72.034,05	71.037,78	73
1.2	SIM	NÃO	0,98%	76.495,72	75.746,08	65
1.3	NÃO	SIM	1,06%	179.371,13	177.464,23	80
1.4	SIM	SIM	0,93%	186.131,18	184.399,86	68

Observa-se, na tabela 4.10, que a característica que contribui significativamente para o aumento do valor da função objetivo é a limitação de tancagem nos terminais de descarregamento de produtos, fazendo com que os navios com capacidade menor sejam os mais utilizados e tenham que executar mais viagens para atender a demanda total. Uma prova disso é o número total de viagens redondas obtido nos subcasos 1.1 e 1.4 para os navios das classes 2 e 4. No subcaso 1.1, foram obtidas 48 viagens da classe 2 e 139 viagens da classe 4, enquanto que no subcaso 1.4, 764 e 38 viagens, respectivamente.

Apesar deste caso representar uma situação extremamente simples do problema, ele serve para caracterizar o limite superior para o valor da função objetivo, uma vez que se pretende compará-lo com os valores da função objetivo obtidos do processamento dos próximos modelos que envolvem viagens compostas e que, teoricamente, tendem a apresentar valores inferiores. Conforme a tabela 4.10, o limite superior a ser comparado é aquele obtido do subcaso 1.4, cujo valor do custo de transporte é de R\$ 186.131.180,00.

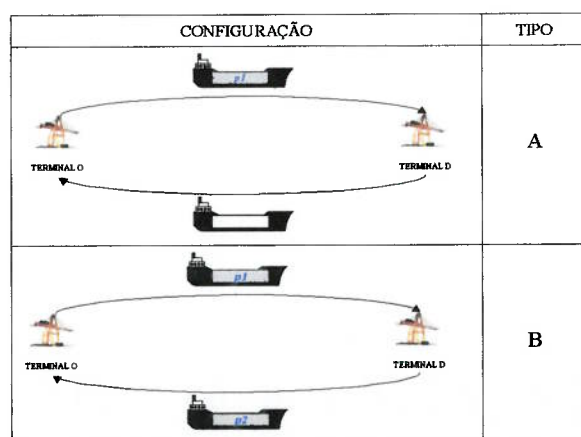
O conjunto de viagens selecionadas na solução do subcaso 1.4 (listadas no anexo B) será bastante explorado ao longo dos próximos casos, uma vez que se trata de um conjunto que contém viagens teoricamente eficientes, que podem, eventualmente, proporcionar viagens compostas também eficientes quando combinadas.

Para a geração das viagens compostas que servem de entrada nos próximos modelos, adotam-se dois conjuntos geradores, cujos elementos envolvem apenas viagens simples. Eles são:

- Conjunto-gerador 1: todas as viagens simples possíveis de serem realizadas levando em conta a compatibilidade de calado de projeto do navio de classe  $s$  com as profundidades nos portos  $o$  e  $d$  (figura 4.2). Este conjunto contém 309 viagens simples.
- Conjunto-gerador 2: as viagens simples obtidas da solução do subcaso 1.4. Contém 68 viagens simples.

### 4.3 Caso 2: viagens do modelo composto 1

O caso 2 caracteriza-se por avaliar o eventual benefício de utilizar viagens simples com retorno do navio à origem carregado de um segundo produto  $p2$ . A geração das viagens candidatas deste tipo (tipo B da figura 4.3) é realizada a partir da combinação de duas viagens simples com transporte de produtos diferentes, em que o terminal de destino de uma coincide com o terminal de origem da outra e vice-versa.



**Fig. 4.3 – Tipos de viagem do caso 2**

No processo de geração das viagens compostas do tipo B, utiliza-se o conjunto gerador 1. Com isso, geram-se 86 viagens compostas deste tipo.

O modelo a ser implementado no GAMS é o *modelo composto 1*, mostrado no Anexo A, e o conjunto de entrada envolve as 309 viagens simples possíveis do tipo A, ou conjunto gerador 1, mais as 86 viagens compostas do tipo B geradas. As viagens simples são também introduzidas no modelo pelo fato de poderem servir como candidatas, já que foi gerado um número pequeno de viagens do tipo B.

Na tabela 4.11, apresenta-se uma síntese da implementação deste modelo no GAMS.

**Tabela 4.11 – Implementação do caso 2**

Conjunto gerador	Viagens geradas	Subcaso	Conjunto de entrada no GAMS	OptCR	Função objetivo da solução encontrada (em milhares de reais)	Função objetivo da melhor solução inteira possível (em milhares de reais)	Número de viagens selecionadas
Conjunto gerador 1	86	2.1	conjunto gerador 1 86 compostas tipo 1	0,95%	<b>184.652,75</b>	<b>182.905,84</b>	61 do tipo A 10 do tipo B

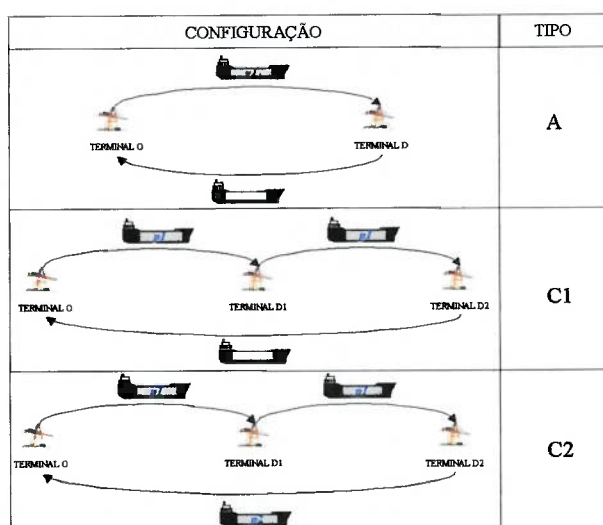
Nota-se uma pequena redução no valor da função objetivo deste caso quando comparado ao valor obtido no caso 1.4, apesar da solução atual ter selecionado 10 viagens compostas do tipo B.

#### 4.4 Caso 3: viagens do modelo composto 2

O caso 3 abrange o transporte de um produto  $p1$  de uma origem  $o$  para dois destinos diferentes  $d1$  e  $d2$ , com retorno do navio à origem em vazio (viagem tipo C1) ou carregado de um produto (viagem tipo C2). A figura 4.4 mostra os tipos de viagens para este caso.

Como um mesmo produto  $p1$  é transportado de uma única origem  $o$  para dois terminais de destino  $d1$  e  $d2$ , é fundamental definir as quantidades máximas que podem ser transportadas a cada um destes terminais na viagem de índice  $m$ . Admite-se, então, tomar a capacidade de carga do navio de classe  $s$  designado para a viagem e separar as quantidades conforme a proporcionalidade das tancagens do produto  $p1$  existentes nos terminais de destino. E, nas ocasiões em que a quantidade calculada superar a fração  $\alpha$  da tancagem do produto em determinado terminal, prevalecerá como quantidade máxima para transporte a este terminal o valor da fração  $\alpha$  de sua tancagem ( $\alpha = 0,8$ ).





**Fig. 4.4 – Tipos de viagem do caso 3**

Nas viagens do tipo C2 que há retorno do navio carregado de um produto  $p_2$ , a quantidade máxima que se pode transportar resulta do menor valor obtido entre a capacidade de carga do navio de classe  $s$  e a fração  $\alpha$  da tancagem de  $p_2$  no terminal  $o$ .

As viagens do tipo C1 são geradas a partir do conjunto gerador 1, cuja composição fornece 1190 viagens candidatas. Na geração de viagens do tipo C2, utiliza-se a composição de viagens do conjunto gerador 1 e do conjunto de viagens do tipo C1 gerado.

Para implementação computacional no GAMS, elabora-se o *modelo composto 2* apresentado no anexo A. A tabela 4.12 mostra os casos processados em tal modelo e os resultados obtidos, tanto em termos dos valores da função objetivo, como do número de viagens selecionadas de cada tipo. Observa-se que os subcasos 3.3 e 3.4 englobam viagens com retorno do navio à origem carregado (tipo C2).

**Tabela 4.12 – Implementações do caso 3**

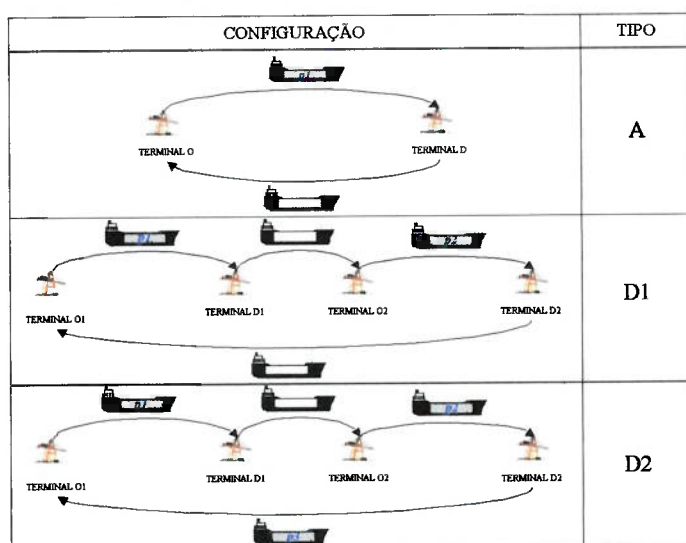
Conjunto gerador	Viagens geradas	Subcaso	Conjunto de entrada no GAMS	OptCR	Função objetivo da solução encontrada (em milhares de reais)	Função objetivo da melhor solução inteira possível (em milhares de reais)	Número de viagens selecionadas
Conjunto gerador 1	1190 viagens do tipo C1	3.1	conjunto gerador 1 1190 viagens do tipo C1	1,58%	<b>154.321,14</b>	<b>151.880,93</b>	28 do tipo A 43 do tipo C1
		3.2	conjunto gerador 2 1190 viagens do tipo C1	2,23%	<b>155.393,62</b>	<b>151.927,49</b>	28 do tipo A 49 do tipo C1
Conjunto gerador 1 1190 viagens do tipo C1	278 viagens do tipo C2	3.3	conjunto gerador 1 1190 viagens do tipo C1 278 viagens do tipo C2	2,06%	<b>153.337,35</b>	<b>150.182,14</b>	32 do tipo A 38 do tipo C1 8 do tipo C2
		3.4	conjunto gerador 2 1190 viagens do tipo C1 278 viagens do tipo C2	1,67%	<b>152.723,46</b>	<b>150.180,19</b>	21 do tipo A 43 do tipo C1 9 do tipo C2

Como não se encontra solução ótima para o problema, pode-se dizer que os resultados obtidos entre os subcasos 3.1 e 3.2 e entre os subcasos 3.3 e 3.4 se equivalem, não importando, então, qual conjunto de viagens simples candidatas utilizar.

Contudo, os resultados do caso 3 mostram uma redução brusca do valor da função objetivo quando comparado aos caso anteriores, ainda mais quando se introduzem viagens compostas do tipo C2. Por exemplo, há um decréscimo em torno de 18,00% no valor da função objetivo quando se comparam os subcasos 1.4 e 3.4, o que justifica a utilização deste tipo de viagem.

#### 4.5 Caso 4: viagens do modelo composto 3

A composição de duas viagens simples que transportam produtos diferentes é tratada no caso 4. Neste tipo de viagem, considera-se um trecho em que o navio desloca-se sem carga, trecho este compreendido entre os terminais  $d1$  e  $o2$ , conforme mostra a figura 4.5. Estas viagens também envolvem o retorno do navio à origem em vazio (tipo D1) ou carregado de um produto  $p3$  (tipo D2).



**Fig. 4.5 – Tipos de viagem do caso 4**

Admite-se que as viagens compostas do tipo D1 sejam geradas pelo conjuntos geradores 1 e 2. Tratando inicialmente o conjunto gerador 1, observa-se um número elevado de viagens compostas geradas do tipo D1, mais de 15.000, incluindo os casos

particulares em que os terminais  $d1$  e  $o2$  ou os terminais  $d2$  e  $o1$  correspondem ao mesmo terminal; no entanto, é desconsiderada a hipótese de ocorrência das duas situações simultaneamente, ocasião esta que caracteriza as viagens de tipo B.

Desta forma, surge a necessidade de pré-selecionar conjuntos menores que não comprometam os recursos computacionais disponíveis e, ao mesmo tempo, estejam embasados em algum critério de eficiência.

Os critérios utilizados para medir a eficiência de todo o conjunto de viagens do tipo D1 têm como base os conceitos de ganho absoluto e ganho relativo, explicados no capítulo 3. A validade destes critérios é justificada pelo fato de que as quantidades máximas que se pode transportar em cada trecho de uma viagem do tipo D1 são compatíveis com as quantidades máximas apresentadas nas duas viagens simples do tipo A que a compõem. Arbitrou-se, então, formar dois subconjuntos de viagens do tipo D1 para implementação do modelo no GAMS, a saber: as 800 viagens do tipo D1 com os maiores valores de ganho absoluto e as 800 com os maiores valores de ganho relativo.

Quanto à utilização do conjunto gerador 2 para geração de viagens do tipo D1, observa-se um total de 832 viagens com ganhos absolutos e relativos positivos.

A tabela 4.13 apresenta as especificações dos subcasos implementados no GAMS através do *modelo composto 3* do Anexo A.

**Tabela 4.13 – Implementações do caso 4**

Conjunto gerador	Viagens geradas	Subcaso	Conjunto de entrada no GAMS	OptCR	Função objetivo da solução encontrada (em milhares de reais)	Função objetivo da melhor solução inteira possível (em milhares de reais)	Número de viagens selecionadas
Conjunto gerador 1	12030 viagens do tipo D1 com GA>0 e GR>0	4.1	conjunto gerador 2 800 viagens do tipo D1 com maiores GA	0,73%	181.906,96	180.570,69	44 do tipo A 20 do tipo D1
		4.2	conjunto gerador 1 800 viagens do tipo D1 com maiores GA	0,91%	181.980,64	180.316,41	51 do tipo A 15 do tipo D1
		4.3	conjunto gerador 2 800 viagens do tipo D1 com maiores GR	1,36%	178.942,83	176.506,05	37 do tipo A 29 do tipo D1
		4.4	conjunto gerador 1 800 viagens do tipo D1 com maiores GR	1,43%	178.486,99	175.932,18	46 do tipo A 27 do tipo D1
Conjunto gerador 2	832 tipo D1 com GA>0 e GR>0	4.5	conjunto gerador 2 832 viagens do tipo D1	1,26%	168.221,59	166.108,65	23 do tipo A 49 do tipo D1

GA = Ganho Absoluto; GR = Ganho Relativo.

Dentre os casos 4.1 a 4.4, cujas viagens compostas do tipo D1 são geradas a partir do conjunto gerador 1, observa-se que o resultado melhor foi encontrado quando se utiliza

como entrada as viagens compostas com maiores ganhos relativos, ainda mais quando as viagens simples do conjunto gerador 1 são introduzidas como candidatas para a solução do problema. Resultado melhor ainda é encontrado ao utilizar somente viagens compostas do tipo D1 geradas a partir do conjunto gerador 2, ou subcaso 4.5, cujo valor da função objetivo encontrado é de R\$ 168.221.690,00. Observa-se um número maior de viagens do tipo C1 selecionadas neste subcaso.

As viagens com retorno carregado do tipo D2, em que um terceiro produto  $p_3$  é transportado a partir do terminal  $d_2$  até o terminal  $o_1$ , são geradas a partir da composição de viagens simples do tipo A e viagens compostas do tipo D1. Conforme as melhores soluções encontradas nos subcasos 4.1 a 4.5, escolheu-se como entrada do modelo no GAMS as candidatas mostradas na tabela 4.14.

**Tabela 4.14 – Implementações do caso 4 (continuação)**

<i>Conjunto gerador</i>	<i>Viagens geradas</i>	<i>Subcaso</i>	<i>Conjunto de entrada no GAMS</i>	<i>OptCR</i>	<i>Função objetivo da solução encontrada (em milhares de reais)</i>	<i>Função objetivo da melhor solução inteira possível (em milhares de reais)</i>	<i>Número de viagens selecionadas</i>
Conjunto gerador 1 800 viagens do tipo D1 com maiores GR	50 viagens do tipo D2	4.6	conjunto gerador 2 800 viagens do tipo D1 com maiores GR 50 viagens do tipo D2	1,30%	177.407,30	175.096,30	34 do tipo A 19 do tipo D1 7 do tipo D2
		4.7	conjunto gerador 1 800 viagens do tipo D1 com maiores GR 50 viagens do tipo D2	1,20%	176.579,23	174.453,69	44 do tipo A 19 do tipo D1 5 do tipo D2
Conjunto gerador 2 832 viagens do tipo D1 com GA>0 e GR>0	27 viagens do tipo D2	4.8	conjunto gerador 2 832 viagens do tipo D1 27 viagens do tipo D2	1,30%	165.992,36	163.835,17	18 do tipo A 35 do tipo D1 9 do tipo D2

GA = Ganho Absoluto; GR = Ganho Relativo.

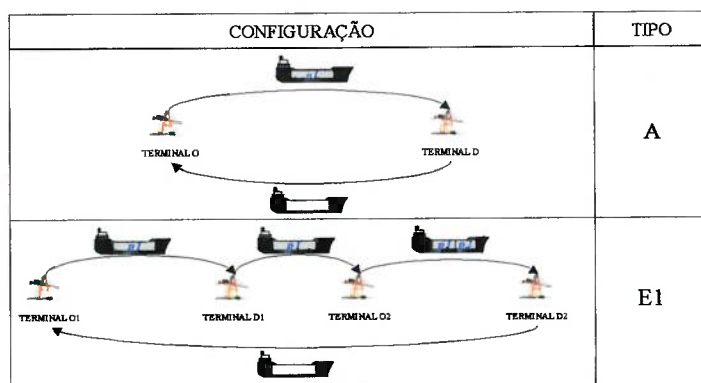
Nota-se uma leve redução na função objetivo ao introduzir viagens com retorno carregado. A melhor solução encontrada é a do subcaso 4.8, que contém 9 viagens compostas do tipo D2, 35 compostas do tipo D1 e 18 viagens simples do tipo A.

Contudo, o caso 3 ainda prevalece como aquele com melhor solução em termos de custo de transporte.

#### 4.6 Caso 5: viagens do modelo composto 4

As viagens compostas do caso 5 correspondem ao tipo E1 mostrado na figura 4.6 e são formadas a partir da composição de viagens simples do tipo A e viagens compostas do

tipo D1. As quantidades máximas de  $p1$  permitidas para transporte aos terminais  $d1$  e  $d2$  seguem o mesmo raciocínio usado no caso 3. Já para a quantidade de  $p2$  entre os terminais  $o2$  e  $d2$ , permite-se o carregamento de uma quantidade menor ou igual à parcela de  $p1$  pretendida para descarregamento em  $d1$ . Com isso, observa-se o transporte simultâneo dos produtos  $p1$  e  $p2$  no trecho entre os terminais  $o2$  e  $d2$ .



**Fig. 4.6 – Tipos de viagem do caso 5**

Para a formação de viagens do tipo E1, são utilizados o conjunto gerador 2 e as 12030 viagens do tipo D1 que apresentaram ganhos absolutos positivos. Essa combinação resulta em um conjunto contendo 759 viagens do tipo E1. Os subcasos implementados no GAMS através do *modelo composto 4* do Anexo A, são apresentados na tabela 4.15.

**Tabela 4.15 – Implementações do caso 5**

Conjunto gerador	Viagens geradas	Subcaso	Conjunto de entrada no GAMS	OptCR	Função objetivo da solução encontrada (em milhares de reais)	Função objetivo da melhor solução inteira possível (em milhares de reais)	Número de viagens selecionadas
conjunto gerador 2 12030 viagens do tipo D1 com GA>0 e GR>0	759 viagens do tipo E1	5.1	conjunto gerador 1 759 viagens do tipo E1	1,88%	148.464,12	145.672,15	29 do tipo A 36 do tipo E1
		5.2	conjunto gerador 2 759 viagens do tipo E1	1,45%	148.029,94	145.877,46	23 do tipo A 37 do tipo E1

GA = Ganho Absoluto; GR = Ganho Relativo.

Este caso apresentou o melhor resultado dentre todos os processados até aqui, com um valor de R\$ 148.029,94 para a função objetivo encontrada no caso 5.2. Porém, pode-se dizer que os resultados obtidos entre nos subcasos 5.1 e 5.2 se equivalem, já que não se trata da solução exata.

#### 4.7 Caso 6: viagens do modelo composto 5

As viagens do modelo composto 5 baseiam-se na combinação de duas viagens compostas do tipo D1. A estratégia adotada para a geração do conjunto de viagens do tipo F1, ilustradas na figura 4.7, é combinar (duas a duas) as 200 viagens compostas do tipo C1 que apresentam os maiores ganhos relativos. Optou-se por desconsiderar viagens em que os terminais  $d2$  e  $o2$  ou os terminais  $d4$  e  $o1$  correspondessem ao mesmo terminal.

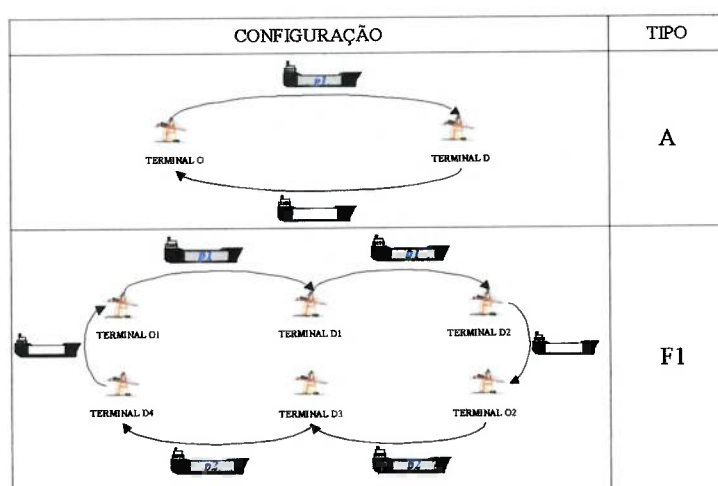


Fig. 4.7 – Tipos de viagem do caso 6

A tabela 4.16 apresenta as implementações do modelo associado ao caso 6 no GAMS, denominado *modelo composto 5* apresentado no Anexo A.

Tabela 4.16 – Implementações dos casos 3 e 6

Conjunto gerador	Viagens geradas	Subcaso	Conjunto de entrada no GAMS	OptCR	Função objetivo da solução encontrada (em milhares de reais)	Função objetivo da melhor solução inteira possível (em milhares de reais)	Número de viagens selecionadas
Conjunto gerador 1	1190 viagens do tipo C1	3.1	conjunto gerador 1 1190 viagens do tipo C1	1,58%	154.321,14	151.880,93	28 do tipo A 43 do tipo C1
		3.2	conjunto gerador 2 1190 viagens do tipo C1	2,23%	155.393,62	151.927,49	28 do tipo A 49 do tipo C1
200 viagens do tipo C1 com maiores GR	6841 viagens do tipo F1 com GA>0 e GR>0	6.1	conjunto gerador 1 700 viagens do tipo F1 com maiores GR	1,25%	159.129,75	157.136,71	37 do tipo A 27 do tipo F1
		6.2	conjunto gerador 2 700 viagens do tipo F1 com maiores GR	1,92%	162.647,26	159.528,52	34 do tipo A 19 do tipo F1
200* viagens do tipo C1 (4x50 viagens com maiores GR)	4086 viagens do tipo F1 com GA>0 e GR>0	6.3	conjunto gerador 1 700 viagens do tipo F1 com maiores GR	1,73%	161.139,39	158.352,75	44 do tipo A 24 do tipo F1
		6.4	conjunto gerador 2 700 viagens do tipo F1 com maiores GR	1,74%	161.851,77	159.040,26	38 do tipo A 28 do tipo F1

GA = Ganho Absoluto; GR = Ganho Relativo.

O conjunto gerador de viagens do tipo F1, responsável pela possibilidade de implementação computacional dos subcasos 6.3 e 6.4, foi criado da seguinte maneira: as 1190 viagens possíveis do tipo C1 foram classificadas em ordem decrescente de ganhos relativos, em seguida, formaram-se 5 subconjuntos de 238 viagens cada um. A partir destes, as 40 viagens com maiores ganhos relativos de cada subconjunto foram selecionadas para criar o grupo gerador de viagens tipo F1 dos subcasos 6.3 e 6.4. Estes subcasos foram implementados de modo a verificar se a escolha direta das 200 viagens do tipo C1 com maiores ganhos relativos é adequada.

Não houve decréscimo no valor da função objetivo em relação ao caso 3 como se imaginava, mesmo com as implementações dos subcasos 6.3 e 6.4 que se mostraram equivalentes aos subcasos 6.1 e 6.2 (solução não ótima). Talvez pelo fato de ter-se restringido em 200 viagens do tipo C1 o conjunto gerador de viagens do tipo F1, ou ainda, pela característica da viagem do tipo F1, que possui dois trechos sem carga, enquanto que a viagem de tipo C1 possui apenas um.

Seria conveniente, então, mudar a estratégia de seleção das viagens candidatas para avaliar novos resultados.

#### **4.8 Comentários finais sobre o estudo de caso**

O estudo de caso escolhido mostrou-se adequado para a implementação da modelagem proposta, dando resultados condizentes com os dados levantados e com as hipóteses admitidas.

Novas configurações poderiam ser testadas, porém a natureza combinatória do problema dificulta a implementação de todos os casos. Diante disso, somente algumas situações foram escolhidas de modo a comprovar a validade dos modelos.

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

### **5.1 Da pesquisa**

Um estudo de planejamento de médio prazo para o sistema de transporte de derivados do petróleo foi elaborado neste trabalho, em que foi analisada a influência da mudança na configuração das viagens sobre o custo de transporte. A metodologia apresentada tem a finalidade de orientar empresas de navegação a buscar estratégias de transporte para atendimento de demandas previstas para um período a um custo mínimo.

A revisão bibliográfica identificou que o planejamento de nível tático é pouco abordado em problemas de transporte, porém foi importante para escolher o tipo de modelo matemático e para orientar na implementação da heurística de pré-seleção de viagens candidatas.

Algumas configurações de viagem foram escolhidas para demonstrar a técnica de modelagem proposta diante do uso da composição de viagens. O modelo matemático contemplou aspectos operacionais do transporte de derivados do petróleo, e teve como base algoritmos desenvolvidas para a composição de viagens, bem como planilhas de dados para o cálculo de seus tempos e custos associados.

### **5.2 Dos resultados obtidos**

Os resultados apresentados foram obtidos a partir de diversos tipos de composição de viagens para o transporte de derivados do petróleo, propiciando planejar e implementar diferentes planos de transporte à medida que o processo evolui, a partir da forma mais simplificada (viagens simples) até a mais complexa através da geração de viagens compostas.

Conforme o tipo de composição de viagens utilizado, há um número elevado de candidatas geradas tornando mais difícil para o GAMS buscar soluções com tolerância relativa (OptCR) baixa, embora isso não ocorra para algumas situações. Diante disso, aplicou-se procedimentos heurísticos para escolha de subconjuntos menores de viagens de modo que a solução se aproximasse mais do ótimo, atendendo um OptCR selecionado de 1,00%; no entanto, a aplicação deste critério não se mostrou suficiente para encontrar



soluções com tolerância reduzida, necessitando, em alguns deles, interromper o processamento do GAMS devido ao elevado tempo computacional sendo consumido.

Como resultado da complexidade das viagens e obtenção de soluções não ótimas, verifica-se que, em algumas das listagens de viagens selecionadas pelo GAMS (Anexo B), são apresentados valores de quantidade de carga transportada iguais a zero para determinadas viagens, acrescentando seus custos ao valor da função objetivo. Isto comprova o aspecto não ótimo das soluções encontradas, dada a natureza complexa do problema, que impõe a obtenção de valores inteiros para a variável  $NVR$  (número de viagens redondas) no horizonte de planejamento.

Um outro ponto importante a ser ressaltado é a qualidade dos dados para implementação dos casos estudados. Para a pesquisa em questão, foi necessário efetuar uma longa análise dos dados disponibilizados de forma a se extrair um volume adequado e que pudesse refletir as operações usuais da Petrobrás.

Apesar das limitações relativas aos dados e ao método de pré-seleção de viagens, a modelagem proposta, diante das hipóteses admitidas, mostrou-se adequada para o problema de planejamento do transporte de derivados do petróleo, propiciando grande flexibilidade quanto aos conjuntos de viagens que podem servir de entrada nos modelos. Além disso, a introdução de viagens compostas foi bem aproveitada, mostrando a efetiva redução de custos para o transporte.

Outra característica observada foi que, quanto menos existirem trechos improdutivos (sem carga), menor torna-se o custo de transporte. Este fato pode ser notado pelo caso 5, que apresentou a melhor solução, já que as viagens do tipo E1 se caracterizaram por ter boa ocupação de carga no navio ao longo da viagem.

### **5.3 Das extensões e recomendações**

Esta pesquisa poderá se estender a diversas outras composições de viagem que envolva o transporte de granéis líquidos. No entanto, não se prevê até que ponto a composição de viagens pode propiciar reduções maiores no custo de transporte; assim, o campo de pesquisa está aberto para a utilização de variadas configurações de viagem e avaliação das eventuais melhorias.

Entretanto, outras considerações poderiam ser introduzidas para rebuscar ainda mais os modelos apresentados e buscar resultados mais realistas, tais como:

- tratamento individualizado dos navios, bem como uso da compartimentagem dos mesmos.
- introdução de características de manutenção de estoque nos terminais conforme taxas de consumo nas regiões atendidas e os custos associados (*inventory costs*).
- inserção de novos terminais de oferta ou demanda para análise de novos cenários (*what-if*).
- avaliação da necessidade de diminuição ou aumento da frota frente à mudança na demanda.
- introdução de restrições quanto à compatibilidade de transporte entre produtos de classificações diferentes.

No tocante aos procedimentos heurísticos desenvolvidos, há possibilidade de implementação de outros algoritmos, não só para geração dos conjuntos de viagens candidatas para compor a solução do problema, mas também para sua própria resolução, como forma paralela à utilização da linguagem de alto nível GAMS.

## ANEXO A – MODELOS NA LINGUAGEM DO GAMS

### MODELO INICIAL – VIAGENS DO TIPO A:

\$TITLE MOD1 (MOD1,SEQ=1)

\$OFFUPPER

\*DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

\*PLANEJAMENTO DE DERIVADOS - 2004

\*Modelo com viagens simples do tipo A considerando restrições

\*de tancagem e calado

### \*OPÇÕES DO GAMS

\*-----

\*-----

OPTION RESLIM = 1000000;

OPTION MIP = CPLEX;

OPTION OPTCR = 0.01;

\*-----

\*-----

### \*ÍNDICES

\*-----

\*-----

### SETS

o	centro de oferta	/ O_1*O_18 /
d	centro de demanda	/ D_1*D_18 /
p	produtos com oferta maior	/ P_1*P_7 /
s	classe de navio	/ S_1*S_4 / ;

### SETS

os(p,o) centros de oferta de cada produto p

/P\_1.(O\_5,O\_7,O\_13,O\_14)

P\_2.(O\_5,O\_7,O\_8,O\_13)

P\_3.(O\_4,O\_7,O\_11,O\_13,O\_14)

P\_4.(O\_4,O\_8,O\_11,O\_12,O\_14)

P\_5.(O\_4,O\_7,O\_11,O\_13)

P\_6.(O\_3)

P\_7.(O\_2) /

ds(p,d) centros de demanda de cada produto p

/P\_1.(D\_1,D\_6,D\_8,D\_9,D\_10,D\_17)

P\_2.(D\_4,D\_9,D\_10,D\_14,D\_15)

P\_3.(D\_1,D\_5,D\_6,D\_8,D\_9,D\_10,D\_15)

P\_4.(D\_7,D\_16)

P\_5.(D\_5,D\_8,D\_9,D\_10,D\_17,D\_18)

P\_6.(D\_4,D\_7,D\_14)

P\_7.(D\_7,D\_8) / ;

\*-----

\*-----  
 \*DADOS DE ENTRADA - INPUT DO GAMS  
 \*-----  
 \*-----

TABLE Dem(p,d) demanda do produto p no terminal d em milhares de metros cúbicos  
 \$include "dem1.prn";

TABLE Ofer(p,o) oferta do produto p no terminal o em milhares de metros cúbicos  
 \$include "ofer1.prn";

TABLE Tanc(p,d) tancagem do produto p no terminal de descarregamento d em milhares de metros cúbicos  
 \$include "tanc1.prn";

TABLE cald(o,d,s) parametro binário referente à compatibilidade entre calado do navio s e os calados nos portos o e d  
 \$include "cald1.prn";

PARAMETER Cap(s) capacidade do navio da classe s em milhares de metros cúbicos  
 / S\_1 10  
 S\_2 26  
 S\_3 45  
 S\_4 82 /;

PARAMETER Aoper(s) ano operacional do navio da classe s em horas no período de um ano  
 / S\_1 8352.00  
 S\_2 8352.00  
 S\_3 8352.00  
 S\_4 8352.00 /;

PARAMETER Nk(s) numero de navios da classe s  
 / K\_1 4.00  
 K\_2 27.00  
 K\_3 28.00  
 K\_4 26.00 /;

PARAMETER aux(p) parâmetro = 1 para produtos com oferta>demanda e =2 para aqueles com oferta<demanda

/P\_1 1  
 P\_2 2  
 P\_3 1  
 P\_4 2  
 P\_5 1  
 P\_6 1  
 P\_7 2 /;

TABLE Ttotal(o,d,p,s) tempo total da viagem redonda do navio de classe s entre o e d transportando p em horas

\$include "ttotal1\_mod2.prn";

TABLE c(o,d,p,s) custo de viagem redonda do navio de classe s entre o e d transportando p em milhares de reais

\$include "custo1\_mod2.prn";

\*-----  
\*-----

\*VARIÁVEIS

\*-----  
\*-----

VARIABLES

x(o,d,p,s) quantidade de p transportada de o para d por s em milhares de metros cúbicos  
nvr(o,d,p,s) numero de viagens redondas para levar p por um navio de classe s de o para d  
ct custo total de transporte em milhares de reais ;

POSITIVE VARIABLE x(o,d,p,s);

INTEGER VARIABLE nvr(o,d,p,s);

\*-----  
\*-----

\*EQUAÇÕES

\*-----  
\*-----

EQUATIONS

Cost função objetivo  
Capac(o,d,p,s) restrições para capacidade do navio  
Demanda1(p,d) restrições de demanda para produtos com oferta>demanda  
Oferta1(p,o) restrições de oferta para produtos com oferta>demanda  
Demanda2(p,d) restrições de demanda para produtos com oferta<demanda  
Oferta2(p,o) restrições de oferta para produtos com oferta<demanda  
Ano(s) restrições para a capacidade de transporte  
Tancagem(o,d,p,s) restrições de tancagem nos terminais de descarregamento  
;

Cost ..  $ct = E = \text{SUM}((o,d,p,s), c(o,d,p,s) * nvr(o,d,p,s));$

Demanda1(p,d)\$((aux(p) eq 1)\$ds(p,d)) ..  $Dem(p,d) = E = \text{SUM}((os(p,o),s), x(o,d,p,s));$

Oferta1(p,o)\$((aux(p) eq 1)\$os(p,o)) ..  $Ofer(p,o) = G = \text{SUM}((ds(p,d),s), x(o,d,p,s));$

Demanda2(p,d)\$((aux(p) eq 2)\$ds(p,d)) ..  $Dem(p,d) = G = \text{SUM}((os(p,o),s), x(o,d,p,s));$

Oferta2(p,o)\$((aux(p) eq 2)\$os(p,o)) ..  $Ofer(p,o) = E = \text{SUM}((ds(p,d),s), x(o,d,p,s));$

Ano(s) ..  $Aoper(s) * Nk(s) = G = \text{SUM}((o,d,p), nvr(o,d,p,s) * cald(o,d,s) * Ttotal(o,d,p,s));$

```

Capac(o,d,p,s)$c(o,d,p,s) ..          Cap(s)*nvr(o,d,p,s)*cald(o,d,s)=G= x(o,d,p,s);
Tancagem(o,d,p,s)$c(o,d,p,s) ..      0.8*Tanc(p,d)*nvr(o,d,p,s)*cald(o,d,s)=G= x(o,d,p,s);
*-----
*-----
*REGRAS LIMITANTES PARA NVR
*-----
*-----
nvr.lo (o,d,p,s) = 0;
nvr.up (o,d,p,s) = 80;
*-----
*-----
*MODEL E SOLVE
*-----
*-----
MODEL MOD1 /ALL/ ;
MOD1.optfile=1;
SOLVE MOD1 USING MIP MINIMIZING ct ;
*-----
*-----
*ARQUIVO DE SAÍDA - OUTPUT DO GAMS
*-----
*-----
FILE saida_1_sc ;
PUT saida_1_sc ;

PUT //;
PUT 'funcao objetivo:' /;
PUT ct.L /;

PUT /;
PUT 'origem' ;
PUT @10, 'destino' ;
PUT @20, 'classe' ;
PUT @30, 'produto' ;
PUT @40, 'quant.' ;
PUT @50, 'NVR' ;
PUT @75, 'custo vg' ;
PUT @85, 'tempo tot' ;
PUT @95, 'tancagem'
PUT @105, 'demanda' / ;

LOOP (p,
  LOOP (s,
    LOOP (d,
      LOOP (o,
        IF ( x.L(o,d,p,s) NE 0,
          PUT   o.TL ;

```

```

PUT @10 , d.TL ;
PUT @20 , s.TL ;
PUT @30 , p.TL ;
PUT @40 , x.L(o,d,p,s):0:2 ;
PUT @50 , nvr.L(o,d,p,s):0:2 ;
PUT @75 , c(o,d,p,s):0:2 ;
PUT @85 , Ttotal(o,d,p,s):0:2 ;
PUT @95 , Tanc(p,d):0:2 ;
PUT @105 , Dem(p,d):0:2 / ;

```

```
);
```

```
);
```

```
);
```

```
);
```

```
);
```

```
*-----
*-----
```

### **MODELO COMPOSTO 1 – VIAGENS DO TIPO B:**

```
$TITLE MOD1 (MOD1,SEQ=1)
```

```
$OFFUPPER
```

```
*DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
```

```
*PLANEJAMENTO DE DERIVADOS 05/01/2004
```

```
*Modelo com viagens simples com retorno carregado
```

```
*OPÇÕES DO GAMS
```

```
*-----
*-----
```

```
OPTION RESLIM = 1000000;
```

```
OPTION MIP = CPLEX;
```

```
OPTION OPTCR = 0.01;
```

```
*-----
*-----
```

```
*ÍNDICES
```

```
*-----
*-----
```

```
SETS
```

```

o  centro de oferta          / O_1*O_18 /
d  centro de demanda         / D_1*D_18 /
p  produtos com oferta maior / P_1*P_7 /
s  classe de navio          / S_1*S_4 /
m  viagem simples ou composta / m_1*m_395 / ;

```

```
*-----
*-----
```

```
*ENTRADA DE DADOS - INPUT DO GAMS
```

```
*-----
*-----
```

```
TABLE Dem1(p,d) demanda do produto p no terminal d em milhares de metros cúbicos
```

\$include "dem1.prn";

TABLE Ofer1(p,o) oferta do produto p no terminal o em milhares de metros cúbicos  
\$include "ofer1.prn";

TABLE nav(m,s) parâmetro binário de utilização de um navio de classe s na viagem m  
\$include "nav1.prn";

TABLE prd1(m,p) parâmetro binário de transporte do primeiro produto na viagem m  
\$include "prd1.prn";

TABLE prd2(m,p) parâmetro binário de transporte do segundo produto na viagem m  
\$include "prd2.prn";

TABLE ov1(m,o) parâmetro binário de embarque na primeira origem da viagem m  
\$include "ov1\_1.prn";

TABLE ov2(m,o) parâmetro binário de embarque na segunda origem da viagem m  
\$include "ov2\_1.prn";

TABLE dv1(m,d) parâmetro binário de descarga no primeiro destino da viagem m  
\$include "dv1\_1.prn";

TABLE dv2(m,d) parâmetro binário de descarga no segundo destino da viagem m  
\$include "dv2\_1.prn";

PARAMETER Aoper(s) ano operacional do navio de classe s em horas no período de um ano  
/ S\_1 8352.00  
S\_2 8352.00  
S\_3 8352.00  
S\_4 8352.00 /;

PARAMETER Nk(s) numero de navios da classe s  
/ S\_1 4.00  
S\_2 27.00  
S\_3 28.00  
S\_4 26.00 /;

PARAMETER aux(p)

/P\_1 1  
P\_2 2  
P\_3 1  
P\_4 2  
P\_5 1  
P\_6 1  
P\_7 2 /;

PARAMETER q1(m) quantidade máxima que pode ser transportada para o primeiro destino da viagem m  
/



```
$include "quant1_comp1.prn";
```

```
/
;
```

```
PARAMETER q2(m) quantidade máxima que pode ser transportada para o segundo destino da
viagem mm
```

```
/
$include "quant2_comp1.prn";
/
;
```

```
PARAMETER Ttotal(m) tempo total da viagem redonda m em horas
```

```
/
$include "ttotal1_comp1.prn"
/
;
```

```
PARAMETER c(m) custo da viagem redonda m em milhares de reais
```

```
/
$include "custo1_comp1.prn"
/
;
```

```
*-----
*-----
```

```
*VARIÁVEIS
```

```
*-----
*-----
```

```
VARIABLES
```

```
x1(m)      quantidade transportada para o primeiro destino da viagem m em milhares de
            metros cúbicos
x2(m)      quantidade transportada para o segundo destino da viagem m em milhares de
            metros cubicos
nvr(m)     número de viagens redondas m
ct         custo total de transporte em milhares de reais
;
```

```
POSITIVE VARIABLE x1(m);
```

```
POSITIVE VARIABLE x2(m);
```

```
INTEGER VARIABLE nvr(m);
```

```
*-----
*-----
```

```
*EQUAÇÕES
```

```
*-----
*-----
```

```
EQUATIONS
```

```
Cost          função objetivo
Demanda1(p,d) restrições de demanda para produtos com oferta>demanda
Oferta1(p,o)  restrições de oferta para produtos com oferta>demanda
```

Demanda2(p,d) restrições de demanda para produtos com oferta<demanda  
 Oferta2(p,o) restrições de oferta para produtos com oferta<demanda  
 Ano(s) restrições para a capacidade de transporte  
 Quant1(m) restrições da quantidade de carga para o primeiro destino da viagem m  
 Quant2(m) restrições da quantidade de carga para o segundo destino da viagem m  
 ;

Cost ..  $ct = E = \text{SUM}((m), c(m) * nvr1(m));$

Demanda1(p,d)\$(aux(p) eq 1) ..  $Dem1(p,d) = E = \text{SUM}((m), x1(m) * prd1(m,p) * dv1(m,d)) +$   
 $\text{SUM}((m), x2(m) * prd2(m,p) * dv2(m,d));$

Oferta1(p,o)\$(aux(p) eq 1) ..  $Ofer1(p,o) = G = \text{SUM}((m), x1(m) * prd1(m,p) * ov1(m,o)) +$   
 $\text{SUM}((m), x2(m) * prd2(m,p) * ov2(m,o));$

Demanda2(p,d)\$(aux(p) eq 2) ..  $Dem1(p,d) = G = \text{SUM}((m), x1(m) * prd1(m,p) * dv1(m,d)) +$   
 $\text{SUM}((m), x2(m) * prd2(m,p) * dv2(m,d));$

Oferta2(p,o)\$(aux(p) eq 2) ..  $Ofer1(p,o) = E = \text{SUM}((m), x1(m) * prd1(m,p) * ov1(m,o)) +$   
 $\text{SUM}((m), x2(m) * prd2(m,p) * ov2(m,o));$

Ano(s) ..  $Aoper(s) * Nk(s) = G = \text{SUM}((m), nvr(m) * nav(m,s) * Ttotal(m));$

Quant1(m) ..  $q1(m) * nvr(m) = G = x1(m);$

Quant2(m) ..  $q2(m) * nvr(m) = G = x2(m);$

\*-----

\*REGRAS LIMITANTES PARA NVR E X2

\*-----

$nvr.lo(m) = 0;$   
 $nvr.up(m) = 80;$   
 $x2.fx(m)$(ord(m) < 310)=0;$

\*-----

\*MODEL E SOLVE

\*-----

MODEL MOD1 /ALL/ ;  
 MOD1.optfile=1;  
 SOLVE MOD1 USING MIP MINIMIZING ct ;

\*-----

\*ARQUIVOS DE SAÍDA - OUTPUT DO GAMS

\*-----

\*-----

```
FILE saida_comp1_ret;  
PUT saida_comp1_ret;
```

```
PUT //;  
PUT 'funcao objetivo' /;  
PUT ct.L //;
```

```
PUT 'Viagens compostas'/;  
PUT 'm';  
PUT @10 'nvr';  
PUT @20 's';  
PUT @30 'ov1';  
PUT @40 'dv1';  
PUT @50 'pdt1';  
PUT @60 'x1';  
PUT @70 'ov2';  
PUT @80 'dv2';  
PUT @90 'pdt2';  
PUT @100 'x2';  
PUT @110 'custo' /;
```

```
Loop (m,  
  IF ( nvr.L(m) NE 0,  
    PUT m.TL ;  
    PUT @10 nvr.L(m):0:2;
```

```
  LOOP (s,  
    IF ( nav(m,s) NE 0,  
      PUT @20 , s.TL ;  
    );  
  );
```

```
  LOOP (o,  
    IF ( ov1(m,o) NE 0,  
      PUT @30 , o.TL ;  
    );  
    IF ( ov2(m,o) NE 0,  
      PUT @70 , o.TL ;  
    );  
  );
```

```
  LOOP (d,  
    IF ( dv1(m,d) NE 0,  
      PUT @40 , d.TL ;  
    );  
    IF ( dv2(m,d) NE 0,  
      PUT @80 , d.TL ;  
    );  
  );
```

```

LOOP (p,
IF ( prd1(m,p) NE 0,
PUT @50 , p.TL ;
);
IF ( prd2(m,p) NE 0,
PUT @90, p.TL ;
);
);
PUT @60 x1.L(m):0:4;
PUT @100 x2.L(m):0:4;
PUT @110 c(m):0:4 /;

);
);
*-----
*-----

```

### **OUTROS MODELOS COMPOSTOS:**

Os próximos modelos compostos, quando contruídos na linguagem do GAMS, apresentam características semelhantes ao modelo composto 1, diferenciando apenas no tocante aos parâmetros binários (parte da entrada de dados), às variáveis e às equações. Desta forma, apresentam-se aqui apenas estes elementos.

### **MODELO COMPOSTO 2: VIAGENS DO TIPO C1 E C2**

#### **\* PARÂMETROS BINÁRIOS**

```

*-----
*-----

```

TABLE nav(m,s) parâmetro binário de utilização de um navio de classe s na viagem m  
\$include "nav1.prn";

TABLE prd1(m,p) parâmetro binário de transporte do primeiro produto na viagem m  
\$include "prd1.prn";

TABLE prd2(m,p) parâmetro binário de transporte do segundo produto na viagem m  
\$include "prd2.prn";

TABLE ov1(m,o) parâmetro binário de embarque na primeira origem da viagem m  
\$include "ov1\_1.prn";

TABLE ov2(m,o) parâmetro binário de embarque na segunda origem da viagem m  
\$include "ov2\_1.prn";

TABLE dv1(m,d) parâmetro binário de descarga no primeiro destino da viagem m  
\$include "dv1\_1.prn";

TABLE dv2(m,d) parâmetro binário de descarga no segundo destino da viagem m  
\$include "dv2\_1.prn";



$$\text{SUM}((m), x2(m)*\text{prd1}(m,p)*\text{ov1}(m,o)) + \\ \text{SUM}((m), x3(m)*\text{prd2}(m,p)*\text{ov2}(m,o));$$

$$\text{Ano}(s) .. \quad \text{Aoper}(s)*\text{Nk}(s) = G = \text{SUM}((m), \text{nvr}(m)*\text{nav}(m,s)*\text{Ttotal}(m));$$

$$\text{Quant1}(m) .. \quad q1(m)*\text{nvr}(m) = G = x1(m);$$

$$\text{Quant2}(m) .. \quad q2(m)*\text{nvr}(m) = G = x2(m);$$

$$\text{Quant3}(m) .. \quad q3(m)*\text{nvr}(m) = G = x3(m);$$

\*-----  
\*-----

### **MODELO COMPOSTO 3: VIAGENS DO TIPO D1 E D2**

#### **\* PARÂMETROS BINÁRIOS**

\*-----  
\*-----

TABLE nav(m,s) parâmetro binário de utilização de um navio de classe s na viagem m  
\$include "nav1.prn";

TABLE prd1(m,p) parâmetro binário de transporte do primeiro produto na viagem m  
\$include "prd1.prn";

TABLE prd2(m,p) parâmetro binário de transporte do segundo produto na viagem m  
\$include "prd2.prn";

TABLE prd3(m,p) parâmetro binário de transporte do terceiro produto na viagem m  
\$include "prd3.prn";

TABLE ov1(m,o) parâmetro binário de embarque na primeira origem da viagem m  
\$include "ov1\_1.prn";

TABLE ov2(m,o) parâmetro binário de embarque na segunda origem da viagem m  
\$include "ov2\_1.prn";

TABLE ov3(m,o) parâmetro binário de embarque na terceira origem da viagem m  
\$include "ov3\_1.prn";

TABLE dv1(m,d) parâmetro binário de descarga no primeiro destino da viagem m  
\$include "dv1\_1.prn";

TABLE dv2(m,d) parâmetro binário de descarga no segundo destino da viagem m  
\$include "dv2\_1.prn";

TABLE dv3(m,d) parâmetro binário de descarga no terceiro destino da viagem m  
\$include "dv3\_1.prn";

\*-----  
\*-----

#### **\* VARIÁVEIS**



Quant2(m) ..  $q2(m) \cdot nvr(m) = G = x2(m);$

Quant3(m) ..  $q3(m) \cdot nvr(m) = G = x3(m);$

\*-----

\*-----

#### **MODELO COMPOSTO 4: VIAGENS DO TIPO E1 e E2**

##### **\* PARÂMETROS BINÁRIOS**

\*-----

\*-----

TABLE nav(m,s) parâmetro binário de utilização de um navio de classe s na viagem m  
\$include "nav1.prn";

TABLE prd1(m,p) parâmetro binário de transporte do primeiro produto na viagem m  
\$include "prd1.prn";

TABLE prd2(m,p) parâmetro binário de transporte do segundo produto na viagem m  
\$include "prd2.prn";

TABLE prd3(m,p) parâmetro binário de transporte do terceiro produto na viagem m  
\$include "prd3.prn";

TABLE ov1(m,o) parâmetro binário de embarque na primeira origem da viagem m  
\$include "ov1\_1.prn";

TABLE ov2(m,o) parâmetro binário de embarque na segunda origem da viagem m  
\$include "ov2\_1.prn";

TABLE ov3(m,o) parâmetro binário de embarque na terceira origem da viagem m  
\$include "ov3\_1.prn";

TABLE dv1(m,d) parâmetro binário de descarga no primeiro destino da viagem m  
\$include "dv1\_1.prn";

TABLE dv2(m,d) parâmetro binário de descarga no segundo destino da viagem m  
\$include "dv2\_1.prn";

TABLE dv3(m,d) parâmetro binário de descarga no terceiro destino da viagem m  
\$include "dv3\_1.prn";

\*-----

\*-----

##### **\* VARIÁVEIS**

\*-----

\*-----

x1(m)        quantidade do primeiro produto transportada para o primeiro destino da viagem m  
em milhares de metros cúbicos

x2(m)        quantidade do primeiro produto transportada para o segundo destino da viagem m  
em milhares de metros cúbicos



x3(m)	quantidade do segundo produto transportada para o segundo destino da viagem m em milhares de metros cúbicos
x4(m)	quantidade do terceiro produto transportada para o terceiro destino da viagem m em milhares de metros cúbicos
nvr(m)	numero de viagens redondas m
ct	custo total em milhares de reais ;

\*-----  
\*-----

### \*EQUAÇÕES

\*-----  
\*-----

### EQUATIONS

Cost	função objetivo
Demanda1(p,d)	restrições de demanda para produtos com oferta>demanda
Oferta1(p,o)	restrições de oferta para produtos com oferta>demanda
Demanda2(p,d)	restrições de demanda para produtos com oferta<demanda
Oferta2(p,o)	restrições de oferta para produtos com oferta<demanda
Ano(s)	restrições para a capacidade de transporte
Quant1(m)	quantidade do primeiro produto para o primeiro destino da viagem m
Quant2(m)	quantidade do primeiro produto para o segundo destino da viagem m
Quant3(m)	quantidade do segundo produto para o segundo destino da viagem m
Quant4(m)	quantidade do terceiro produto para o terceiro destino da viagem m

Cost ..  $ct = E = \text{SUM}((m), c(m) * nvr(m));$

Demanda1(p,d)\$(aux(p) eq 1) ..  $Dem1(p,d) = E = \text{SUM}((m), x1(m) * prd1(m,p) * dv1(m,d)) + \text{SUM}((m), x2(m) * prd1(m,p) * dv2(m,d)) + \text{SUM}((m), x3(m) * prd2(m,p) * dv2(m,d)) + \text{SUM}((m), x4(m) * prd3(m,p) * dv3(m,d));$

Oferta1(p,o)\$(aux(p) eq 1) ..  $Ofer1(p,o) = G = \text{SUM}((m), x1(m) * prd1(m,p) * ov1(m,o)) + \text{SUM}((m), x2(m) * prd1(m,p) * ov1(m,o)) + \text{SUM}((m), x3(m) * prd2(m,p) * ov2(m,o)) + \text{SUM}((m), x4(m) * prd3(m,p) * ov3(m,o));$

Demanda2(p,d)\$(aux(p) eq 2) ..  $Dem1(p,d) = G = \text{SUM}((m), x1(m) * prd1(m,p) * dv1(m,d)) + \text{SUM}((m), x2(m) * prd1(m,p) * dv2(m,d)) + \text{SUM}((m), x3(m) * prd2(m,p) * dv2(m,d)) + \text{SUM}((m), x4(m) * prd3(m,p) * dv3(m,d));$

Oferta2(p,o)\$(aux(p) eq 2) ..  $Ofer1(p,o) = E = \text{SUM}((m), x1(m) * prd1(m,p) * ov1(m,o)) + \text{SUM}((m), x2(m) * prd1(m,p) * ov1(m,o)) + \text{SUM}((m), x3(m) * prd2(m,p) * ov2(m,o)) + \text{SUM}((m), x4(m) * prd3(m,p) * ov3(m,o));$

Ano(s) ..  $Aoper(s) * Nk(s) = G = \text{SUM}((m), nvr(m) * nav(m,s) * Ttotal(m));$

Quant1(m) ..  $q1(m) * nvr(m) = G = x1(m);$

Quant2(m) ..  $q2(m)*nvr(m)=G= x2(m);$   
 Quant3(m) ..  $q3(m)*nvr(m)=G= x3(m);$   
 Quant4(m) ..  $q4(m)*nvr(m)=G= x4(m);$   
 \*-----  
 \*-----

### **MODELO COMPOSTO 5: VIAGENS DO TIPO F1**

#### **\* PARÂMETROS BINÁRIOS**

\*-----  
 \*-----

TABLE nav(m,s) parâmetro binário de utilização de um navio de classe s na viagem m  
 \$include "nav1.prn";

TABLE prd1(m,p) parâmetro binário de transporte do primeiro produto na viagem m  
 \$include "prd1.prn";

TABLE prd2(m,p) parâmetro binário de transporte do segundo produto na viagem m  
 \$include "prd2.prn";

TABLE ov1(m,o) parâmetro binário de embarque na primeira origem da viagem m  
 \$include "ov1\_1.prn";

TABLE ov2(m,o) parâmetro binário de embarque na segunda origem da viagem m  
 \$include "ov2\_1.prn";

TABLE dv1(m,d) parâmetro binário de descarga no primeiro destino da viagem m  
 \$include "dv1\_1.prn";

TABLE dv2(m,d) parâmetro binário de descarga no segundo destino da viagem m  
 \$include "dv2\_1.prn";

TABLE dv3(m,d) parâmetro binário de descarga no terceiro destino da viagem m  
 \$include "dv3\_1.prn";

TABLE dv4(m,d) parâmetro binário de descarga no quarto destino da viagem m  
 \$include "dv4\_1.prn";

\*-----  
 \*-----

#### **\* VARIÁVEIS**

\*-----  
 \*-----

x1(m)            quantidade do primeiro produto transportada para o primeiro destino da viagem m  
                  em milhares de metros cúbicos  
 x2(m)            quantidade do primeiro produto transportada para o segundo destino da viagem m  
                  em milhares de metros cúbicos

x3(m)	quantidade do segundo produto transportada para o terceiro destino da viagem m em milhares de metros cúbicos
x4(m)	quantidade do segundo produto transportada para o quarto destino da viagem m em milhares de metros cúbicos
nvr(m)	numero de viagens redondas m
ct	custo total em milhares de reais ;

\*-----  
\*-----

### \*EQUAÇÕES

\*-----  
\*-----

### EQUATIONS

Cost	função objetivo
Demanda1(p,d)	restrições de demanda para produtos com oferta>demanda
Oferta1(p,o)	restrições de oferta para produtos com oferta>demanda
Demanda2(p,d)	restrições de demanda para produtos com oferta<demanda
Oferta2(p,o)	restrições de oferta para produtos com oferta<demanda
Ano(s)	restrições para a capacidade de transporte
Quant1(m)	quantidade do primeiro produto para o primeiro destino da viagem m
Quant2(m)	quantidade do primeiro produto para o segundo destino da viagem m
Quant3(m)	quantidade do segundo produto para o terceiro destino da viagem m
Quant4(m)	quantidade do segundo produto para o quarto destino da viagem m
:	
Cost ..	$ct = E = \text{SUM}((m), c(m) * nvr(m));$
Demanda1(p,d)\$(aux(p) eq 1) ..	$Dem1(p,d) = E = \text{SUM}((m), x1(m) * prd1(m,p) * dv1(m,d)) + \text{SUM}((m), x2(m) * prd1(m,p) * dv2(m,d)) + \text{SUM}((m), x3(m) * prd2(m,p) * dv3(m,d)) + \text{SUM}((m), x4(m) * prd2(m,p) * dv4(m,d));$
Oferta1(p,o)\$(aux(p) eq 1) ..	$Ofer1(p,o) = G = \text{SUM}((m), x1(m) * prd1(m,p) * ov1(m,o)) + \text{SUM}((m), x2(m) * prd1(m,p) * ov1(m,o)) + \text{SUM}((m), x3(m) * prd2(m,p) * ov2(m,o)) + \text{SUM}((m), x4(m) * prd2(m,p) * ov2(m,o));$
Demanda2(p,d)\$(aux(p) eq 2) ..	$Dem1(l,j) = G = \text{SUM}((m), x1(m) * prd1(m,p) * dv1(m,d)) + \text{SUM}((m), x2(m) * prd1(m,p) * dv2(m,d)) + \text{SUM}((m), x3(m) * prd2(m,p) * dv3(m,d)) + \text{SUM}((m), x4(m) * prd2(m,p) * dv4(m,d));$
Oferta2(p,o)\$(aux(p) eq 2) ..	$Ofer1(p,o) = E = \text{SUM}((m), x1(m) * prd1(m,p) * ov1(m,o)) + \text{SUM}((m), x2(m) * prd1(m,p) * ov1(m,o)) + \text{SUM}((m), x3(m) * prd2(m,p) * ov2(m,o)) + \text{SUM}((m), x4(m) * prd2(m,p) * ov2(m,o));$
Ano(s) ..	$Aoper(s) * Nk(s) = G = \text{SUM}((m), nvr(m) * nav(m,s) * Ttotal(m));$
Quant1(m) ..	$q1(m) * nvr(m) = G = x1(m);$

Quant2(m) ..

$$q2(m)*nvr(m)=G= x2(m);$$

Quant3(m) ..

$$q3(m)*nvr(m)=G= x3(m);$$

Quant4(m) ..

$$q4(m)*nvr(m)=G= x4(m);$$

\*-----

\*-----

## ANEXO B – RELAÇÃO DE VIAGENS DAS SOLUÇÕES DOS CASOS PROCESSADOS

### Tabela A1 – Viagens selecionadas do subcaso 1.4

Função objetivo:		R\$ 186.131.180,00					
Origem	Destino	Classe	Produto	X(o,d,p,s) (*1000 m <sup>3</sup> )	NVR(o,d,p,s)	Custo (*1000 reais)	
I 5	J 1	K 1	P 1	185,36	35	118,09	
I 7	J 1	K 1	P 1	38,67	8	107,78	
I 14	J 1	K 1	P 1	5,30	1	158,33	
I 5	J 9	K 1	P 1	291,47	69	119,34	
I 13	J 17	K 1	P 1	20,00	2	109,25	
I 5	J 6	K 2	P 1	97,25	6	155,85	
I 7	J 6	K 2	P 1	97,69	7	118,75	
I 14	J 6	K 2	P 1	16,21	1	171,24	
I 5	J 10	K 2	P 1	166,80	74	86,73	
I 13	J 17	K 2	P 1	600,58	51	117,15	
I 14	J 17	K 2	P 1	75,21	7	104,49	
I 5	J 8	K 4	P 1	710,69	9	436,72	
I 5	J 9	K 1	P 2	4,56	1	131,29	
I 5	J 10	K 1	P 2	4,38	1	92,81	
I 8	J 14	K 1	P 2	10,00	1	305,09	
I 7	J 15	K 1	P 2	3,46	1	96,82	
I 13	J 4	K 2	P 2	229,82	28	110,49	
I 5	J 9	K 2	P 2	300,96	66	125,18	
I 5	J 10	K 2	P 2	313,55	72	86,88	
I 8	J 14	K 2	P 2	20,94	1	352,17	
I 13	J 14	K 2	P 2	47,14	2	92,49	
I 7	J 15	K 2	P 2	69,28	20	92,04	
I 7	J 14	K 3	P 2	41,33	1	250,69	
I 7	J 1	K 1	P 3	30,04	13	95,79	
I 13	J 1	K 1	P 3	76,14	31	157,27	
I 7	J 6	K 1	P 3	0,17	1	110,00	
I 4	J 5	K 2	P 3	68,10	16	228,39	
I 11	J 5	K 2	P 3	4,26	1	238,73	
I 13	J 5	K 2	P 3	147,84	35	223,41	
I 14	J 5	K 2	P 3	8,23	2	223,77	
I 4	J 6	K 2	P 3	103,90	13	176,00	
I 13	J 9	K 2	P 3	205,69	69	272,94	
I 4	J 10	K 2	P 3	374,34	73	199,33	
I 13	J 10	K 2	P 3	1,18	1	194,34	
I 13	J 15	K 2	P 3	391,67	42	170,32	
I 4	J 8	K 4	P 3	144,51	2	887,70	
I 8	J 7	K 2	P 4	26,00	1	286,88	
I 4	J 16	K 2	P 4	78,00	3	161,64	
I 11	J 16	K 2	P 4	280,28	11	105,99	
I 8	J 7	K 3	P 4	360,00	8	453,33	
I 4	J 16	K 4	P 4	631,18	8	421,21	
I 8	J 16	K 4	P 4	229,13	3	786,88	
I 12	J 16	K 4	P 4	570,78	7	382,47	
I 14	J 16	K 4	P 4	483,82	6	327,65	
I 7	J 5	K 1	P 5	2,37	1	170,96	
I 7	J 8	K 1	P 5	0,78	1	255,19	
I 13	J 17	K 1	P 5	19,16	2	121,71	
I 7	J 18	K 1	P 5	23,87	4	192,04	
I 11	J 5	K 2	P 5	10,33	1	264,87	
I 13	J 5	K 2	P 5	82,62	8	236,59	
I 11	J 8	K 2	P 5	26,00	1	407,12	
I 11	J 9	K 2	P 5	14,34	1	353,94	
I 11	J 10	K 2	P 5	30,96	2	262,08	
I 11	J 17	K 2	P 5	35,81	2	184,93	
I 4	J 18	K 2	P 5	35,81	6	274,77	
I 7	J 18	K 2	P 5	32,51	6	204,52	
I 11	J 18	K 2	P 5	250,66	42	285,10	
I 13	J 18	K 2	P 5	65,65	11	269,70	
I 4	J 5	K 4	P 5	10,33	1	406,04	
I 4	J 8	K 4	P 5	80,00	1	985,13	
I 3	J 4	K 2	P 6	80,68	5	208,49	
I 3	J 7	K 2	P 6	78,00	3	138,40	
I 3	J 14	K 2	P 6	26,00	1	203,78	
I 3	J 7	K 3	P 6	2066,21	46	214,59	
I 3	J 14	K 3	P 6	945,00	21	280,99	
I 3	J 14	K 4	P 6	45,14	1	348,52	
I 2	J 7	K 2	P 7	90,14	12	270,93	
I 2	J 8	K 2	P 7	1579,23	61	132,00	

Tabela A2 – Viagens selecionadas do caso 2

Função objetivo:		R\$ 184.652.750,00						
Origem	Destino	Classe	Produto 1	Produto 2	x1 (*1000 m <sup>3</sup> )	x2 (*1000 m <sup>3</sup> )	NVR	Custo (*1000 reais)
I 2	J 7	K 2	P 7	-	90,12	-	12	270,93
I 2	J 8	K 2	P 7	-	1579,25	-	61	132,00
I 3	J 4	K 2	P 6	-	80,68	-	5	208,49
I 3	J 7	K 2	P 6	-	52,00	-	2	138,40
I 3	J 7	K 3	P 6	-	2092,21	-	47	214,59
I 3	J 14	K 2	P 6	-	26,00	-	1	203,78
I 3	J 14	K 3	P 6	-	945,00	-	21	280,99
I 3	J 14	K 4	P 6	-	45,14	-	1	348,52
I 4	J 5	K 2	P 3	-	59,64	-	14	228,39
I 4	J 6	K 2	P 3	-	103,87	-	13	176,00
I 4	J 7	K 3	P 4	-	45,00	-	1	284,93
I 4	J 8	K 3	P 5	-	26,78	-	1	660,56
I 4	J 10	K 2	P 3	-	369,36	-	72	199,33
I 4	J 16	K 2	P 4	-	0,00	-	1	161,64
I 4	J 16	K 4	P 4	-	638,18	-	8	421,21
I 4	J 18	K 2	P 5	-	11,94	-	2	274,77
I 5	J 1	K 1	P 1	-	227,90	-	43	118,09
I 5	J 6	K 2	P 1	-	145,89	-	9	155,85
I 5	J 8	K 4	P 1	-	640,00	-	8	436,72
I 5	J 9	K 1	P 1	-	291,47	-	69	119,34
I 5	J 9	K 2	P 2	-	264,48	-	58	125,18
I 5	J 10	K 2	P 1	-	166,80	-	74	86,73
I 5	J 10	K 2	P 2	-	319,01	-	73	86,88
I 7	J 1	K 1	P 1	-	1,43	-	1	107,78
I 7	J 1	K 1	P 3	-	27,78	-	12	95,79
I 7	J 6	K 1	P 1	-	20,00	-	2	97,78
I 7	J 6	K 2	P 1	-	45,26	-	3	118,75
I 7	J 6	K 2	P 3	-	0,20	-	1	105,86
I 7	J 9	K 2	P 3	-	2,37	-	1	207,76
I 7	J 15	K 2	P 2	-	107,57	-	31	92,04
I 7	J 18	K 1	P 5	-	35,82	-	6	192,04
I 7	J 18	K 2	P 5	-	23,88	-	4	204,52
I 8	J 7	K 3	P 4	-	225,00	-	5	453,33
I 8	J 16	K 4	P 4	-	319,13	-	4	786,88
I 11	J 5	K 2	P 5	-	10,33	-	1	264,87
I 11	J 9	K 2	P 5	-	14,34	-	1	353,94
I 11	J 10	K 1	P 3	-	5,13	-	1	205,84
I 11	J 10	K 2	P 5	-	17,90	-	1	262,08
I 11	J 16	K 2	P 4	-	280,28	-	11	105,99
I 11	J 17	K 2	P 5	-	35,80	-	2	184,93
I 11	J 18	K 1	P 5	-	5,97	-	1	278,03
I 11	J 18	K 2	P 5	-	286,56	-	48	285,10
I 12	J 16	K 4	P 4	-	570,78	-	7	382,47
I 13	J 1	K 1	P 3	-	78,40	-	32	157,27
I 13	J 4	K 2	P 2	-	153,83	-	19	110,49
I 13	J 5	K 2	P 3	-	143,22	-	34	223,41
I 13	J 5	K 2	P 5	-	92,97	-	9	236,59
I 13	J 9	K 2	P 3	-	203,32	-	68	272,94
I 13	J 10	K 1	P 3	-	1,03	-	1	193,33
I 13	J 10	K 2	P 5	-	13,06	-	1	220,88
I 13	J 14	K 2	P 2	-	119,66	-	5	92,49
I 13	J 15	K 2	P 2	-	3,47	-	1	157,23
I 13	J 15	K 2	P 3	-	391,67	-	42	170,32
I 13	J 17	K 1	P 5	-	19,17	-	2	121,71
I 13	J 17	K 2	P 1	-	600,78	-	51	117,15
I 13	J 18	K 2	P 5	-	44,32	-	8	289,70
I 14	J 5	K 2	P 3	-	4,26	-	1	223,77
I 14	J 16	K 2	P 4	-	52,00	-	2	117,57
I 14	J 16	K 3	P 4	-	45,00	-	1	190,93
I 14	J 16	K 4	P 4	-	386,82	-	5	327,65
I 14	J 17	K 2	P 1	-	95,01	-	9	104,49
I 4	J 5	K 2	P 3	P 2	17,04	31,75	4	241,60
I 4	J 5	K 2	P 5	P 2	2,35	0,00	1	267,78
I 4	J 8	K 2	P 3	P 2	26,00	8,21	1	409,79
I 4	J 8	K 3	P 3	P 2	45,00	8,21	1	643,06
I 4	J 8	K 4	P 3	P 2	73,51	8,21	1	907,56
I 4	J 8	K 4	P 5	P 2	80,00	6,31	1	1024,09
I 5	J 4	K 2	P 2	P 3	8,21	4,26	1	241,60
I 7	J 4	K 2	P 2	P 4	6,50	26,00	1	190,76
I 7	J 8	K 2	P 1	P 4	26,00	26,00	1	339,26
I 7	J 8	K 3	P 1	P 4	44,69	45,00	1	576,57

Tabela A3 – Viagens selecionadas do subcaso 3.1

Função objetivo:		R\$ 154.321.140,00						
Origem	Destino 1	Destino 2	Classe	Produto 1	x1 (*1000 m³)	x2 (*1000 m³)	NVR	Custo (*1000 reais)
I 2	J 7	-	K 1	P 7	7,51	-	1	265,95
I 2	J 7	-	K 2	P 7	82,61	-	11	270,93
I 2	J 8	-	K 2	P 7	1579,25	-	61	132,00
I 3	J 7	-	K 2	P 6	52,00	-	2	138,40
I 3	J 7	-	K 3	P 6	2092,21	-	47	214,59
I 3	J 14	-	K 3	P 6	765,00	-	17	280,99
I 4	J 16	-	K 2	P 4	78,00	-	3	161,64
I 4	J 16	-	K 4	P 4	631,18	-	8	421,21
I 4	J 18	-	K 2	P 5	77,61	-	13	274,77
I 5	J 8	-	K 4	P 1	710,69	-	9	436,72
I 5	J 9	-	K 1	P 1	29,61	-	7	119,34
I 5	J 9	-	K 2	P 1	4,23	-	1	125,15
I 7	J 6	-	K 1	P 1	10,00	-	1	97,78
I 7	J 15	-	K 2	P 2	24,29	-	7	92,04
I 7	J 18	-	K 1	P 5	53,73	-	9	192,04
I 7	J 18	-	K 2	P 5	5,97	-	1	204,52
I 8	J 7	-	K 3	P 4	405,00	-	9	453,33
I 8	J 16	-	K 4	P 4	210,13	-	3	786,88
I 11	J 16	-	K 2	P 4	280,28	-	11	105,99
I 12	J 16	-	K 4	P 4	570,78	-	7	382,47
I 13	J 4	-	K 2	P 2	180,62	-	22	110,49
I 13	J 14	-	K 2	P 2	96,34	-	4	92,49
I 13	J 17	-	K 2	P 1	492,15	-	42	117,15
I 13	J 18	-	K 2	P 5	155,22	-	26	269,70
I 14	J 16	-	K 2	P 4	52,00	-	2	117,57
I 14	J 16	-	K 3	P 4	45,00	-	1	190,93
I 14	J 16	-	K 4	P 4	386,82	-	5	327,65
I 14	J 17	-	K 2	P 1	94,24	-	8	104,49
I 4	J 10	J 1	K 1	P 3	30,78	14,70	6	227,78
I 13	J 9	J 5	K 2	P 3	152,49	217,26	51	304,39
I 13	J 5	J 18	K 2	P 5	2,35	5,97	1	314,33
I 11	J 18	J 5	K 2	P 5	59,70	103,30	10	342,69
I 4	J 15	J 10	K 2	P 3	271,73	148,77	29	243,82
I 13	J 10	J 1	K 1	P 3	148,77	71,05	29	221,11
I 13	J 6	J 15	K 2	P 3	95,88	112,44	12	215,71
I 3	J 4	J 14	K 3	P 6	10,98	34,02	1	341,25
I 3	J 14	J 4	K 3	P 6	34,02	1,70	1	341,25
I 4	J 6	J 15	K 2	P 3	7,99	7,50	1	233,58
I 3	J 4	J 14	K 4	P 6	68,00	183,10	4	432,41
I 11	J 18	J 9	K 2	P 5	5,97	14,34	1	418,20
I 11	J 18	J 10	K 2	P 5	11,94	30,96	2	366,49
I 4	J 10	J 9	K 2	P 3	46,17	26,91	9	319,76
I 13	J 9	J 10	K 2	P 3	2,99	1,03	1	314,76
I 11	J 18	J 8	K 2	P 5	5,40	64,90	3	458,25
I 8	J 14	J 15	K 2	P 2	23,32	1,90	1	370,59
I 7	J 9	J 5	K 2	P 3	2,99	2,88	1	252,07
I 5	J 10	J 1	K 1	P 1	63,84	148,40	28	145,16
I 13	J 1	J 9	K 1	P 3	2,45	2,99	1	297,30
I 13	J 9	J 1	K 1	P 3	5,98	4,90	2	297,30
I 8	J 10	J 9	K 2	P 2	4,37	1,35	1	256,80
I 5	J 6	J 10	K 2	P 1	32,42	4,56	2	171,90
I 5	J 17	J 1	K 1	P 1	0,00	1,43	1	221,72
I 7	J 15	J 10	K 2	P 2	10,41	9,29	3	160,53
I 7	J 1	J 6	K 1	P 3	2,35	0,20	1	150,17
I 4	J 8	J 18	K 3	P 5	41,88	3,12	1	720,72
I 4	J 5	J 8	K 4	P 3	4,14	66,65	1	934,67
I 4	J 8	J 5	K 4	P 3	77,86	4,14	1	934,67
I 7	J 9	J 1	K 1	P 3	11,34	10,73	5	235,84
I 5	J 10	J 15	K 2	P 2	9,39	10,41	3	157,74
I 13	J 6	J 17	K 2	P 1	75,30	54,70	5	215,63
I 11	J 18	J 17	K 2	P 5	17,91	53,70	3	382,21
I 5	J 6	J 9	K 2	P 1	16,21	4,23	1	236,91
I 5	J 9	J 6	K 2	P 1	4,23	1,92	1	236,91
I 5	J 9	J 10	K 2	P 1	181,89	96,12	43	180,62
I 5	J 10	J 9	K 2	P 1	2,28	4,23	1	180,62
I 5	J 10	J 9	K 2	P 2	297,16	306,49	68	180,79
I 13	J 17	J 18	K 2	P 5	1,27	5,95	1	353,76
I 7	J 6	J 17	K 2	P 1	15,06	10,94	1	190,17
I 7	J 17	J 6	K 2	P 1	43,76	60,24	4	190,17
I 7	J 4	J 15	K 2	P 2	49,26	20,82	6	209,42
I 5	J 1	J 9	K 1	P 1	79,50	63,05	15	208,66

Tabela A4 – Viagens selecionadas do subcaso 3.2

Função objetivo:		R\$ 155.393.620,00						
Origem	Destino 1	Destino 2	Classe	Produto 1	x1 (**1000 m <sup>3</sup> )	x2 (**1000 m <sup>3</sup> )	NVR	Custo (**1000 reais)
I 5	J 1	-	K 1	P 1	5,30	-	1	118,09
I 7	J 1	-	K 1	P 1	1,43	-	1	107,78
I 5	J 9	-	K 1	P 1	46,53	-	11	119,34
I 13	J 17	-	K 2	P 1	506,54	-	43	117,15
I 14	J 17	-	K 2	P 1	94,24	-	8	104,49
I 5	J 8	-	K 4	P 1	710,69	-	9	436,72
I 13	J 4	-	K 2	P 2	180,62	-	22	110,49
I 13	J 14	-	K 2	P 2	70,34	-	3	92,49
I 7	J 15	-	K 2	P 2	24,22	-	7	92,04
I 8	J 7	-	K 2	P 4	52,00	-	2	286,88
I 4	J 16	-	K 2	P 4	0,00	-	2	161,64
I 11	J 16	-	K 2	P 4	280,28	-	11	105,99
I 8	J 7	-	K 3	P 4	360,00	-	8	453,33
I 4	J 16	-	K 4	P 4	709,18	-	9	421,21
I 8	J 16	-	K 4	P 4	203,13	-	3	786,88
I 12	J 16	-	K 4	P 4	570,78	-	7	382,47
I 14	J 16	-	K 4	P 4	483,82	-	6	327,65
I 7	J 18	-	K 1	P 5	53,14	-	10	192,04
I 11	J 8	-	K 2	P 5	26,00	-	1	407,12
I 4	J 18	-	K 2	P 5	47,76	-	8	274,77
I 11	J 18	-	K 2	P 5	35,82	-	6	285,10
I 13	J 18	-	K 2	P 5	155,22	-	26	269,70
I 4	J 8	-	K 4	P 5	80,00	-	1	985,13
I 3	J 7	-	K 2	P 6	26,00	-	1	138,40
I 3	J 7	-	K 3	P 6	2115,00	-	47	214,59
I 3	J 14	-	K 3	P 6	765,00	-	17	280,99
I 2	J 7	-	K 2	P 7	90,12	-	12	270,93
I 2	J 8	-	K 2	P 7	1579,25	-	61	132,00
I 4	J 1	J 10	K 1	P 3	7,35	15,39	3	227,78
I 4	J 10	J 1	K 1	P 3	25,65	12,25	5	227,78
I 13	J 5	J 9	K 2	P 3	217,26	152,49	51	304,39
I 13	J 9	J 5	K 2	P 3	2,99	4,26	1	304,39
I 13	J 5	J 18	K 2	P 5	0,00	5,97	1	314,33
I 11	J 15	J 6	K 2	P 3	9,37	7,99	1	231,01
I 11	J 5	J 18	K 2	P 5	10,33	5,97	1	342,69
I 11	J 18	J 5	K 2	P 5	59,70	95,32	10	342,69
I 4	J 10	J 15	K 2	P 3	138,51	252,56	27	243,82
I 13	J 10	J 1	K 1	P 3	138,51	66,15	27	221,11
I 13	J 15	J 6	K 2	P 3	112,44	95,88	12	215,71
I 3	J 4	J 14	K 3	P 6	10,98	34,02	1	341,25
I 3	J 4	J 14	K 4	P 6	69,70	217,12	5	432,41
I 13	J 15	J 1	K 1	P 3	7,93	2,07	1	198,49
I 11	J 18	J 9	K 2	P 5	5,97	14,34	1	418,20
I 11	J 10	J 18	K 2	P 5	30,96	11,94	2	366,49
I 4	J 9	J 10	K 2	P 3	2,99	5,13	1	319,76
I 4	J 10	J 9	K 2	P 3	51,30	29,90	10	319,76
I 8	J 14	J 15	K 2	P 2	24,10	1,16	1	370,59
I 5	J 1	J 10	K 1	P 1	143,10	61,56	27	145,16
I 5	J 10	J 1	K 1	P 1	2,28	5,30	1	145,16
I 13	J 1	J 9	K 1	P 3	2,45	2,99	1	297,30
I 7	J 10	J 1	K 1	P 3	1,03	2,45	1	159,66
I 8	J 10	J 14	K 2	P 2	2,36	3,32	1	368,22
I 5	J 6	J 10	K 2	P 1	30,09	6,84	3	171,90
I 13	J 15	J 9	K 2	P 3	9,37	2,99	1	317,40
I 7	J 15	J 10	K 2	P 2	10,41	13,11	3	160,53
I 7	J 1	J 6	K 1	P 3	2,35	0,20	1	150,17
I 7	J 6	J 1	K 1	P 3	0,00	2,35	1	150,17
I 3	J 4	J 7	K 2	P 6	0,00	3,21	1	242,61
I 7	J 6	J 10	K 2	P 1	13,10	0,36	1	174,55
I 7	J 8	J 18	K 3	P 5	0,78	3,12	1	568,02
I 4	J 5	J 8	K 4	P 3	4,14	66,65	1	934,67
I 4	J 8	J 5	K 4	P 3	77,86	2,76	1	934,67
I 7	J 9	J 1	K 1	P 3	11,34	8,76	4	235,84
I 5	J 15	J 10	K 2	P 2	6,94	2,21	2	157,74
I 13	J 17	J 6	K 2	P 1	43,76	60,24	4	215,63
I 11	J 17	J 18	K 2	P 5	53,70	17,91	3	382,21
I 7	J 15	J 4	K 1	P 2	2,97	4,96	1	208,21
I 13	J 4	J 14	K 2	P 2	4,10	21,90	1	156,85
I 5	J 6	J 9	K 2	P 1	16,21	3,83	1	236,91
I 5	J 9	J 6	K 2	P 1	4,23	16,21	1	236,91
I 5	J 9	J 10	K 2	P 1	177,66	95,76	42	180,62



Tabela A5 – Viagens selecionadas do subcaso 3.3

Função objetivo:		R\$ 153.337.350,00								
Origem	Destino 1	Destino 2	Classe	Produto 1	Produto 2	x1 (*1000 m³)	x2 (*1000 m³)	x3 (*1000 m³)	NVR	Custo (*1000 reais)
I 2	J 7	-	K 1	P 7	-	7,51	-	-	1	265,95
I 2	J 7	-	K 2	P 7	-	82,61	-	-	11	270,93
I 2	J 8	-	K 2	P 7	-	1579,25	-	-	61	132,00
I 3	J 7	-	K 2	P 6	-	52,00	-	-	2	138,40
I 3	J 7	-	K 3	P 6	-	2092,21	-	-	47	214,59
I 3	J 14	-	K 3	P 6	-	765,00	-	-	17	280,99
I 4	J 8	-	K 4	P 5	-	80,00	-	-	1	985,13
I 4	J 16	-	K 3	P 4	-	45,00	-	-	1	260,25
I 4	J 16	-	K 4	P 4	-	410,00	-	-	5	421,21
I 4	J 18	-	K 2	P 5	-	47,76	-	-	8	274,77
I 5	J 1	-	K 1	P 1	-	5,30	-	-	1	118,09
I 5	J 8	-	K 2	P 1	-	26,00	-	-	1	191,45
I 5	J 8	-	K 4	P 1	-	560,00	-	-	7	436,72
I 5	J 9	-	K 2	P 1	-	4,23	-	-	1	125,15
I 5	J 10	-	K 2	P 1	-	2,28	-	-	1	86,73
I 7	J 1	-	K 1	P 1	-	5,30	-	-	1	107,78
I 7	J 1	-	K 1	P 3	-	0,93	-	-	1	95,79
I 7	J 18	-	K 1	P 5	-	59,70	-	-	10	192,04
I 8	J 16	-	K 4	P 4	-	492,00	-	-	6	786,88
I 11	J 8	-	K 2	P 5	-	26,00	-	-	1	407,12
I 11	J 16	-	K 2	P 4	-	280,28	-	-	11	105,99
I 11	J 18	-	K 2	P 5	-	35,82	-	-	6	285,10
I 12	J 16	-	K 4	P 4	-	570,78	-	-	7	382,47
I 13	J 14	-	K 2	P 2	-	119,66	-	-	5	92,49
I 13	J 17	-	K 2	P 1	-	577,22	-	-	49	117,15
I 13	J 18	-	K 1	P 5	-	5,97	-	-	1	265,42
I 13	J 18	-	K 2	P 5	-	155,22	-	-	26	269,70
I 14	J 7	-	K 2	P 4	-	26,00	-	-	1	159,82
I 14	J 16	-	K 2	P 4	-	26,00	-	-	1	117,57
I 14	J 16	-	K 3	P 4	-	45,00	-	-	1	190,93
I 14	J 16	-	K 4	P 4	-	386,82	-	-	5	327,65
I 14	J 17	-	K 2	P 1	-	94,24	-	-	8	104,49
I 13	J 5	J 10	K 1	P 3	-	4,26	5,13	-	1	247,22
I 13	J 5	J 10	K 2	P 3	-	4,26	0,00	-	1	252,39
I 13	J 9	J 5	K 2	P 3	-	116,61	164,64	-	39	304,39
I 4	J 1	J 6	K 1	P 3	-	2,35	7,65	-	1	218,29
I 11	J 5	J 18	K 2	P 5	-	105,65	65,67	-	11	342,69
I 4	J 15	J 10	K 2	P 3	-	252,99	138,51	-	27	243,82
I 13	J 1	J 10	K 1	P 3	-	2,45	2,64	-	1	221,11
I 13	J 10	J 1	K 1	P 3	-	179,55	85,75	-	35	221,11
I 13	J 15	J 6	K 2	P 3	-	110,57	88,43	-	12	215,71
I 3	J 4	J 14	K 3	P 6	-	10,98	34,02	-	1	341,25
I 3	J 4	J 14	K 4	P 6	-	17,00	6,44	-	1	432,41
I 3	J 14	J 4	K 4	P 6	-	210,68	52,70	-	4	432,41
I 13	J 10	J 15	K 2	P 2	-	62,38	52,05	-	15	225,72
I 11	J 18	J 9	K 2	P 5	-	5,97	14,34	-	1	418,20
I 11	J 10	J 18	K 2	P 5	-	17,90	5,97	-	1	366,49
I 11	J 18	J 10	K 2	P 5	-	5,97	13,06	-	1	366,49
I 4	J 9	J 10	K 2	P 3	-	20,93	35,91	-	7	319,76
I 13	J 9	J 10	K 2	P 3	-	5,98	10,26	-	2	314,76
I 13	J 5	J 8	K 2	P 5	-	0,00	0,78	-	1	397,08
I 5	J 1	J 10	K 1	P 1	-	116,60	50,16	-	22	145,16
I 5	J 10	J 1	K 1	P 1	-	4,56	10,60	-	2	145,16
I 7	J 10	J 1	K 1	P 1	-	2,28	1,43	-	1	159,57
I 7	J 1	J 10	K 1	P 3	-	2,45	0,00	-	1	159,66
I 7	J 10	J 1	K 1	P 3	-	3,52	2,45	-	1	159,66
I 5	J 6	J 10	K 2	P 1	-	36,29	6,84	-	3	171,90
I 13	J 9	J 15	K 2	P 3	-	8,97	28,11	-	3	317,40
I 13	J 15	J 9	K 2	P 3	-	0,00	2,99	-	1	317,40
I 4	J 9	J 6	K 2	P 3	-	2,99	7,99	-	1	336,18
I 7	J 10	J 6	K 2	P 1	-	0,14	0,00	-	1	174,55
I 7	J 9	J 1	K 1	P 3	-	11,34	9,80	-	4	235,84
I 13	J 17	J 6	K 2	P 1	-	24,33	45,18	-	3	215,63
I 11	J 18	J 17	K 2	P 5	-	17,91	53,70	-	3	382,21
I 13	J 15	J 4	K 2	P 2	-	13,88	28,99	-	4	221,54
I 5	J 9	J 6	K 2	P 1	-	33,84	129,68	-	8	236,91
I 5	J 10	J 9	K 2	P 1	-	98,04	181,49	-	43	180,62
I 5	J 10	J 9	K 2	P 2	-	257,83	269,04	-	59	180,79
I 13	J 17	J 18	K 2	P 5	-	1,27	2,53	-	1	353,76
I 5	J 9	J 1	K 1	P 1	-	71,91	90,10	-	17	208,66
I 7	J 15	J 4	K 2	P 2	P 4	34,70	79,37	254,18	10	248,75

Tabela A6 – Viagens selecionadas do subcaso 3.4

Função objetivo:		R\$ 152.723.460,00									
Origem	Destino 1	Destino 2	Classe	Produto 1	Produto 2	x1 (*1000 m³)	x2 (*1000 m³)	x3 (*1000 m³)	NVR	Custo (*1000 reais)	
I 5	J 9	-	K 1	P 1	-	25,38	-	-	6	119,34	
I 13	J 17	-	K 2	P 1	-	553,66	-	-	47	117,15	
I 14	J 17	-	K 2	P 1	-	94,24	-	-	8	104,49	
I 5	J 8	-	K 4	P 1	-	620,04	-	-	8	436,72	
I 13	J 14	-	K 2	P 2	-	119,66	-	-	5	92,49	
I 11	J 16	-	K 2	P 4	-	280,28	-	-	11	105,99	
I 8	J 7	-	K 3	P 4	-	45,00	-	-	1	453,33	
I 4	J 16	-	K 4	P 4	-	475,18	-	-	6	421,21	
I 8	J 16	-	K 4	P 4	-	473,13	-	-	6	786,88	
I 12	J 16	-	K 4	P 4	-	570,78	-	-	7	382,47	
I 14	J 16	-	K 4	P 4	-	483,82	-	-	6	327,65	
I 7	J 18	-	K 1	P 5	-	47,76	-	-	8	192,04	
I 4	J 18	-	K 2	P 5	-	47,76	-	-	8	274,77	
I 7	J 18	-	K 2	P 5	-	11,94	-	-	2	204,52	
I 11	J 18	-	K 2	P 5	-	35,82	-	-	6	285,10	
I 13	J 18	-	K 2	P 5	-	155,22	-	-	26	269,70	
I 3	J 7	-	K 2	P 6	-	78,00	-	-	3	138,40	
I 3	J 7	-	K 3	P 6	-	2066,21	-	-	46	214,59	
I 3	J 14	-	K 3	P 6	-	765,00	-	-	17	280,99	
I 2	J 7	-	K 2	P 7	-	82,61	-	-	11	270,93	
I 2	J 8	-	K 2	P 7	-	1560,00	-	-	60	132,00	
I 4	J 1	J 10	K 1	P 3	-	2,45	5,13	-	1	227,78	
I 4	J 10	J 1	K 1	P 3	-	5,13	2,45	-	1	227,78	
I 11	J 5	J 9	K 2	P 3	-	4,26	2,99	-	1	319,71	
I 13	J 5	J 9	K 2	P 3	-	174,66	122,59	-	41	304,39	
I 13	J 5	J 18	K 2	P 5	-	2,35	5,97	-	1	314,33	
I 11	J 18	J 5	K 2	P 5	-	59,70	103,30	-	10	342,69	
I 4	J 15	10	K 2	P 3	-	262,36	143,64	-	28	243,82	
I 13	J 1	J 10	K 1	P 3	-	2,45	5,13	-	1	221,11	
I 13	J 10	J 1	K 1	P 3	-	165,38	80,85	-	33	221,11	
I 13	J 15	J 6	K 2	P 3	-	121,81	103,87	-	13	215,71	
I 3	J 4	J 14	K 3	P 6	-	10,98	34,02	-	1	341,25	
I 3	J 14	J 4	K 3	P 6	-	34,02	1,70	-	1	341,25	
I 3	J 4	J 14	K 4	P 6	-	68,00	183,10	-	4	432,41	
I 13	J 10	J 15	K 2	P 2	-	45,58	41,64	-	12	225,72	
I 11	J 9	J 18	K 2	P 5	-	14,34	5,97	-	1	418,20	
I 13	J 9	J 10	K 1	P 3	-	2,99	5,13	-	1	308,66	
I 13	J 10	J 9	K 1	P 3	-	5,13	2,99	-	1	308,66	
I 11	J 10	J 18	K 2	P 5	-	30,96	11,94	-	2	366,49	
I 4	J 9	J 10	K 2	P 3	-	17,94	30,78	-	6	319,76	
I 13	J 10	J 9	K 2	P 3	-	5,13	2,99	-	1	314,76	
I 11	J 8	J 18	K 2	P 5	-	48,40	3,60	-	2	458,25	
I 5	J 10	J 1	K 1	P 1	-	54,72	125,53	-	24	145,16	
I 13	J 9	J 1	K 1	P 3	-	2,99	2,45	-	1	297,30	
I 7	J 1	J 10	K 1	P 3	-	2,45	0,00	-	1	159,66	
I 5	J 10	J 6	K 2	P 1	-	15,96	113,47	-	7	171,90	
I 13	J 15	J 9	K 2	P 3	-	7,50	2,99	-	1	317,40	
I 7	J 15	J 10	K 2	P 2	-	6,94	8,06	-	2	160,53	
I 7	J 1	J 6	K 1	P 3	-	2,35	0,20	-	1	150,17	
I 13	J 17	J 1	K 1	P 1	-	6,90	3,10	-	1	198,88	
I 7	J 1	J 9	K 1	P 3	-	8,28	11,34	-	4	235,84	
I 7	J 9	J 1	K 1	P 3	-	2,99	2,45	-	1	235,84	
I 4	J 10	J 8	K 4	P 3	-	4,94	77,06	-	1	952,13	
I 13	J 17	J 6	K 2	P 1	-	21,88	30,12	-	2	215,63	
I 2	J 7	J 8	K 2	P 7	-	4,46	22,30	-	2	325,40	
I 11	J 18	J 17	K 2	P 5	-	17,91	53,70	-	3	382,21	
I 13	J 4	J 15	K 2	P 2	-	49,26	20,82	-	6	221,54	
I 5	J 6	J 9	K 2	P 1	-	48,63	12,69	-	3	236,91	
I 5	J 9	J 10	K 2	P 1	-	177,66	94,15	-	42	180,62	
I 5	J 9	J 10	K 2	P 2	-	273,60	262,20	-	60	180,79	
I 13	J 17	J 18	K 2	P 5	-	1,27	4,90	-	1	353,76	
I 7	J 17	J 6	K 2	P 1	-	19,11	18,93	-	2	190,17	
I 5	J 1	J 9	K 1	P 1	-	90,10	67,28	-	17	208,66	
I 5	J 9	J 1	K 1	P 1	-	8,46	10,60	-	2	208,66	
I 7	J 15	J 4	K 2	P 2	P 4	27,76	65,68	208,00	8	248,75	
I 7	J 10	J 4	K 2	P 2	P 4	4,37	1,26	26,00	1	285,87	
I 7	J 6	J 8	K 2	P 1	P 4	0,00	21,62	26,00	1	371,25	
I 7	J 10	J 8	K 2	P 1	P 4	0,72	25,28	26,00	1	368,07	
I 4	J 9	J 5	K 2	P 3	P 2	32,89	45,36	87,65	11	335,43	
I 8	J 15	J 4	K 2	P 2	P 5	3,47	8,21	26,00	1	467,21	
I 8	J 15	J 4	K 3	P 2	P 5	3,47	7,58	32,38	1	737,76	

Tabela A7 – Viagens selecionadas do subcaso 4.1

Função objetivo:		R\$ 181.906.960,00										
Origem 1	Destino 1	Origem 2	Destino 2	Classe	Produto 1	Produto 2	x1 (*1000 m³)	x2 (*1000 m³)	NVR	Custo (*1000 reais)		
I 5	J 1	-	-	K 1	P 1	-	222,60	-	42	118,09		
I 7	J 1	-	-	K 1	P 1	-	6,73	-	2	107,78		
I 5	J 9	-	-	K 1	P 1	-	291,47	-	69	119,34		
I 13	J 17	-	-	K 1	P 1	-	10,00	-	1	109,25		
I 5	J 6	-	-	K 2	P 1	-	64,84	-	4	155,85		
I 7	J 6	-	-	K 2	P 1	-	134,71	-	9	118,75		
I 14	J 6	-	-	K 2	P 1	-	11,60	-	1	171,24		
I 5	J 10	-	-	K 2	P 1	-	166,80	-	74	86,73		
I 13	J 17	-	-	K 2	P 1	-	589,00	-	50	117,15		
I 14	J 17	-	-	K 2	P 1	-	85,01	-	8	104,49		
I 5	J 8	-	-	K 4	P 1	-	710,69	-	9	436,72		
I 5	J 9	-	-	K 1	P 2	-	4,56	-	1	131,29		
I 13	J 4	-	-	K 2	P 2	-	180,62	-	22	110,49		
I 5	J 9	-	-	K 2	P 2	-	259,92	-	57	125,18		
I 5	J 10	-	-	K 2	P 2	-	315,36	-	72	86,88		
I 13	J 14	-	-	K 2	P 2	-	96,34	-	4	92,49		
I 7	J 15	-	-	K 2	P 2	-	114,07	-	33	92,04		
I 7	J 1	-	-	K 1	P 3	-	29,92	-	13	95,79		
I 13	J 1	-	-	K 1	P 3	-	76,26	-	31	157,27		
I 7	J 6	-	-	K 1	P 3	-	0,20	-	1	110,00		
I 13	J 5	-	-	K 2	P 3	-	127,80	-	30	223,41		
I 4	J 6	-	-	K 2	P 3	-	103,87	-	13	176,00		
I 13	J 9	-	-	K 2	P 3	-	197,34	-	66	272,94		
I 4	J 10	-	-	K 2	P 3	-	348,84	-	68	199,33		
I 13	J 10	-	-	K 2	P 3	-	26,68	-	6	194,34		
I 13	J 15	-	-	K 2	P 3	-	391,67	-	42	170,32		
I 11	J 16	-	-	K 2	P 4	-	280,28	-	11	105,99		
I 4	J 16	-	-	K 4	P 4	-	709,18	-	9	421,21		
I 12	J 16	-	-	K 4	P 4	-	570,78	-	7	382,47		
I 14	J 16	-	-	K 4	P 4	-	483,82	-	6	327,65		
I 7	J 5	-	-	K 1	P 5	-	4,61	-	1	170,96		
I 13	J 17	-	-	K 1	P 5	-	19,17	-	2	121,71		
I 7	J 18	-	-	K 1	P 5	-	11,94	-	2	192,04		
I 13	J 5	-	-	K 2	P 5	-	92,96	-	9	236,59		
I 11	J 10	-	-	K 2	P 5	-	30,96	-	2	262,08		
I 11	J 17	-	-	K 2	P 5	-	35,80	-	2	184,93		
I 4	J 18	-	-	K 2	P 5	-	89,55	-	15	274,77		
I 11	J 18	-	-	K 2	P 5	-	119,40	-	20	285,10		
I 13	J 18	-	-	K 2	P 5	-	59,70	-	10	269,70		
I 3	J 7	-	-	K 2	P 6	-	52,00	-	2	138,40		
I 3	J 7	-	-	K 3	P 6	-	2092,21	-	47	214,59		
I 3	J 14	-	-	K 3	P 6	-	45,00	-	1	280,99		
I 2	J 7	-	-	K 2	P 7	-	7,51	-	1	270,93		
I 2	J 8	-	-	K 2	P 7	-	1584,13	-	61	132,00		
I 8	J 16	I 11	J 9	K 2	P 4	P 5	26,00	14,34	1	545,30		
I 8	J 16	I 11	J 18	K 2	P 4	P 5	229,13	53,73	9	476,47		
I 8	J 4	I 4	J 18	K 2	P 2	P 5	7,62	5,97	1	408,44		
I 8	J 14	I 13	J 9	K 2	P 2	P 3	23,32	2,37	1	439,85		
I 2	J 7	I 11	J 8	K 2	P 7	P 3	15,02	52,00	2	479,80		
I 3	J 4	I 4	J 5	K 3	P 6	P 3	68,00	17,04	4	409,99		
I 4	J 5	I 3	J 4	K 3	P 3	P 6	4,26	12,68	1	409,99		
I 5	J 17	I 4	J 5	K 3	P 1	P 5	11,78	8,08	1	444,09		
I 3	J 14	I 4	J 5	K 4	P 6	P 3	895,39	72,42	17	538,40		
I 7	J 18	I 8	J 7	K 3	P 5	P 4	44,32	360,00	8	549,12		
I 2	J 7	I 4	J 8	K 2	P 7	P 3	7,51	14,51	1	495,27		
I 4	J 8	I 2	J 7	K 2	P 3	P 7	78,00	22,53	3	495,27		
I 2	J 7	I 11	J 8	K 2	P 7	P 5	30,04	80,78	4	505,85		
I 11	J 8	I 2	J 7	K 2	P 5	P 7	26,00	2,63	1	505,85		
I 5	J 4	I 4	J 18	K 2	P 2	P 5	16,42	11,94	2	345,31		
I 5	J 4	I 4	J 9	K 2	P 2	P 3	8,21	2,99	1	348,46		
I 3	J 14	I 14	J 5	K 3	P 6	P 3	45,00	2,64	1	428,43		
I 14	J 5	I 3	J 14	K 3	P 3	P 6	4,26	30,75	1	428,43		
I 4	J 9	I 5	J 4	K 1	P 3	P 2	2,99	8,21	1	341,82		
I 4	J 18	I 5	J 4	K 1	P 5	P 2	11,94	10,77	2	337,83		

Tabela A8 – Viagens selecionadas do subcaso 4.2

Função objetivo:		R\$ 181.980.640,00								
Origem 1	Destino 1	Origem 2	Destino 2	Classe	Produto 1	Produto 2	x1 (*1000 m³)	x2 (*1000 m³)	NVR	Custo (*1000 reais)
I 2	J 7	-	-	K 2	P 7	-	7,51	-	1	270,93
I 2	J 8	-	-	K 2	P 7	-	1584,13	-	61	132,00
I 3	J 7	-	-	K 2	P 6	-	78,00	-	3	138,40
I 3	J 7	-	-	K 3	P 6	-	2066,21	-	46	214,59
I 4	J 5	-	-	K 2	P 3	-	4,26	-	1	228,39
I 4	J 6	-	-	K 2	P 3	-	103,87	-	13	176,00
I 4	J 7	-	-	K 3	P 4	-	45,00	-	1	284,93
I 4	J 10	-	-	K 2	P 3	-	343,71	-	67	199,33
I 4	J 16	-	-	K 2	P 4	-	8,18	-	1	161,64
I 4	J 16	-	-	K 4	P 4	-	656,00	-	8	421,21
I 4	J 18	-	-	K 2	P 5	-	89,55	-	15	274,77
I 5	J 1	-	-	K 1	P 1	-	227,57	-	43	118,09
I 5	J 6	-	-	K 2	P 1	-	71,47	-	5	155,85
I 5	J 8	-	-	K 4	P 1	-	710,69	-	9	436,72
I 5	J 9	-	-	K 1	P 1	-	291,47	-	69	119,34
I 5	J 9	-	-	K 2	P 2	-	255,36	-	56	125,18
I 5	J 10	-	-	K 2	P 1	-	166,80	-	74	86,73
I 5	J 10	-	-	K 2	P 2	-	319,01	-	73	86,88
I 7	J 1	-	-	K 1	P 1	-	1,76	-	1	107,78
I 7	J 1	-	-	K 1	P 3	-	27,92	-	12	95,79
I 7	J 6	-	-	K 1	P 1	-	10,00	-	1	97,78
I 7	J 6	-	-	K 2	P 1	-	129,68	-	8	118,75
I 7	J 6	-	-	K 2	P 3	-	0,20	-	1	105,86
I 7	J 9	-	-	K 2	P 3	-	2,37	-	1	207,76
I 7	J 15	-	-	K 2	P 2	-	114,07	-	33	92,04
I 7	J 18	-	-	K 1	P 5	-	17,91	-	3	192,04
I 8	J 9	-	-	K 2	P 2	-	9,12	-	2	174,82
I 11	J 5	-	-	K 1	P 5	-	20,00	-	2	245,08
I 11	J 10	-	-	K 2	P 5	-	17,90	-	1	262,08
I 11	J 16	-	-	K 2	P 4	-	280,28	-	11	105,99
I 11	J 17	-	-	K 1	P 5	-	20,00	-	2	146,31
I 11	J 17	-	-	K 2	P 5	-	34,97	-	2	184,93
I 11	J 18	-	-	K 2	P 5	-	89,55	-	15	285,10
I 12	J 16	-	-	K 4	P 4	-	570,78	-	7	382,47
I 13	J 1	-	-	K 1	P 3	-	78,26	-	32	157,27
I 13	J 4	-	-	K 2	P 2	-	180,62	-	22	110,49
I 13	J 5	-	-	K 2	P 3	-	121,92	-	29	223,41
I 13	J 5	-	-	K 2	P 5	-	85,65	-	9	236,59
I 13	J 9	-	-	K 2	P 3	-	203,32	-	68	272,94
I 13	J 10	-	-	K 1	P 3	-	5,13	-	1	193,33
I 13	J 10	-	-	K 2	P 3	-	23,50	-	5	194,34
I 13	J 10	-	-	K 2	P 5	-	13,06	-	1	220,88
I 13	J 14	-	-	K 2	P 2	-	96,34	-	4	92,49
I 13	J 15	-	-	K 2	P 3	-	391,67	-	42	170,32
I 13	J 17	-	-	K 1	P 1	-	10,00	-	1	109,25
I 13	J 17	-	-	K 2	P 1	-	589,00	-	50	117,15
I 13	J 18	-	-	K 2	P 5	-	65,67	-	11	269,70
I 14	J 16	-	-	K 2	P 4	-	52,00	-	2	117,57
I 14	J 16	-	-	K 3	P 4	-	21,82	-	1	190,93
I 14	J 16	-	-	K 4	P 4	-	410,00	-	5	327,65
I 14	J 17	-	-	K 2	P 1	-	96,79	-	9	104,49
I 8	J 16	I 11	J 9	K 2	P 4	P 5	14,13	14,34	1	545,30
I 8	J 16	I 11	J 18	K 2	P 4	P 5	286,00	65,67	11	476,47
I 13	J 18	I 8	J 14	K 2	P 5	P 2	2,53	21,82	1	436,61
I 2	J 7	I 11	J 8	K 2	P 7	P 3	15,02	52,00	2	479,80
I 11	J 8	I 2	J 7	K 2	P 3	P 7	14,51	7,51	1	479,80
I 3	J 4	I 4	J 5	K 3	P 6	P 3	80,68	21,30	5	409,99
I 3	J 14	I 4	J 5	K 4	P 6	P 3	948,06	76,68	18	538,40
I 7	J 18	I 8	J 7	K 3	P 5	P 4	41,79	315,00	7	549,12
I 2	J 7	I 4	J 8	K 2	P 7	P 3	15,02	52,00	2	495,27
I 4	J 8	I 2	J 7	K 2	P 3	P 7	26,00	7,51	1	495,27
I 2	J 7	I 11	J 8	K 2	P 7	P 5	7,51	2,78	1	505,85
I 11	J 8	I 2	J 7	K 2	P 5	P 7	104,00	25,16	4	505,85
I 4	J 18	I 5	J 4	K 2	P 5	P 2	35,82	49,08	6	345,31
I 3	J 14	I 14	J 10	K 3	P 6	P 3	45,00	3,18	1	411,68
I 14	J 5	I 3	J 14	K 3	P 3	P 6	4,26	23,08	1	428,43

Tabela A9 – Viagens selecionadas do subcaso 4.3

Função objetivo:		R\$ 178.942.830,00								
Origem 1	Destino 1	Origem 2	Destino 2	Classe	Produto 1	Produto 2	x1 (*1000 m³)	x2 (*1000 m³)	NVR	Custo (*1000 reais)
I 5	J 1	-	-	K 1	P 1	-	201,40	-	38	118,09
I 7	J 1	-	-	K 1	P 1	-	17,33	-	4	107,78
I 5	J 9	-	-	K 1	P 1	-	291,47	-	69	119,34
I 5	J 6	-	-	K 2	P 1	-	5,99	-	1	155,85
I 7	J 6	-	-	K 2	P 1	-	124,11	-	8	118,75
I 14	J 6	-	-	K 2	P 1	-	81,05	-	5	171,24
I 5	J 10	-	-	K 2	P 1	-	166,80	-	74	86,73
I 13	J 17	-	-	K 2	P 1	-	47,12	-	4	117,15
I 5	J 8	-	-	K 4	P 1	-	158,27	-	2	436,72
I 13	J 4	-	-	K 2	P 2	-	172,41	-	21	110,49
I 5	J 9	-	-	K 2	P 2	-	291,84	-	64	125,18
I 5	J 10	-	-	K 2	P 2	-	319,74	-	73	86,88
I 13	J 14	-	-	K 2	P 2	-	99,99	-	4	92,49
I 7	J 15	-	-	K 2	P 2	-	83,04	-	24	92,04
I 7	J 1	-	-	K 1	P 3	-	30,49	-	13	95,79
I 13	J 1	-	-	K 1	P 3	-	73,80	-	30	157,27
I 4	J 6	-	-	K 2	P 3	-	79,90	-	10	176,00
I 13	J 9	-	-	K 2	P 3	-	202,70	-	68	272,94
I 4	J 10	-	-	K 2	P 3	-	359,10	-	70	199,33
I 13	J 15	-	-	K 2	P 3	-	382,30	-	41	170,32
I 4	J 8	-	-	K 4	P 3	-	80,00	-	1	887,70
I 11	J 16	-	-	K 2	P 4	-	280,28	-	11	105,99
I 4	J 16	-	-	K 4	P 4	-	709,18	-	9	421,21
I 12	J 16	-	-	K 4	P 4	-	570,78	-	7	382,47
I 14	J 16	-	-	K 4	P 4	-	483,82	-	6	327,65
I 7	J 5	-	-	K 1	P 5	-	2,35	-	1	170,96
I 13	J 17	-	-	K 1	P 5	-	1,27	-	1	121,71
I 7	J 18	-	-	K 1	P 5	-	41,79	-	7	192,04
I 11	J 9	-	-	K 2	P 5	-	14,34	-	1	353,94
I 11	J 10	-	-	K 2	P 5	-	17,90	-	1	262,08
I 11	J 17	-	-	K 2	P 5	-	53,70	-	3	184,93
I 4	J 18	-	-	K 2	P 5	-	89,55	-	15	274,77
I 7	J 18	-	-	K 2	P 5	-	8,50	-	2	204,52
I 11	J 18	-	-	K 2	P 5	-	35,82	-	6	285,10
I 3	J 7	-	-	K 2	P 6	-	52,00	-	2	138,40
I 3	J 7	-	-	K 3	P 6	-	2092,21	-	47	214,59
I 2	J 8	-	-	K 2	P 7	-	1584,13	-	61	132,00
I 8	J 16	I 11	J 8	K 2	P 4	P 3	26,00	12,51	1	504,14
I 8	J 16	I 11	J 8	K 2	P 4	P 5	43,13	52,00	2	530,20
I 11	J 8	I 8	J 16	K 2	P 5	P 4	52,00	52,00	2	530,20
I 4	J 9	I 5	J 4	K 2	P 3	P 2	2,99	1,87	1	348,46
I 8	J 4	I 4	J 18	K 2	P 2	P 5	21,27	17,91	3	408,44
I 3	J 4	I 4	J 10	K 2	P 6	P 3	17,00	5,13	1	276,71
I 2	J 7	I 7	J 8	K 1	P 7	P 5	7,51	2,78	1	353,78
I 14	J 5	I 5	J 17	K 2	P 3	P 1	2,64	11,78	1	294,50
I 5	J 17	I 11	J 5	K 2	P 1	P 5	106,79	103,30	10	322,80
I 4	J 5	I 5	J 17	K 2	P 3	P 1	68,16	188,48	16	299,08
I 3	J 14	I 14	J 10	K 2	P 6	P 3	26,00	1,03	1	284,97
I 5	J 17	I 13	J 18	K 2	P 1	P 5	329,84	167,16	28	332,81
I 3	J 14	I 14	J 1	K 1	P 6	P 1	10,00	5,30	1	244,78
I 4	J 5	I 3	J 4	K 2	P 3	P 6	4,26	17,00	1	305,79
I 3	J 14	I 13	J 10	K 2	P 6	P 3	52,00	10,26	2	278,90
I 8	J 7	I 13	J 8	K 2	P 4	P 1	338,00	338,00	13	438,78
I 4	J 15	I 3	J 4	K 2	P 3	P 6	9,37	17,00	1	279,06
I 8	J 16	I 11	J 18	K 2	P 4	P 5	156,00	35,82	6	476,47
I 13	J 9	I 5	J 17	K 2	P 2	P 1	4,56	11,78	1	348,96
I 3	J 14	I 14	J 1	K 1	P 6	P 3	10,00	1,89	1	256,73
I 8	J 14	I 11	J 18	K 2	P 2	P 5	9,67	5,97	1	452,02
I 4	J 10	I 3	J 4	K 2	P 5	P 6	13,06	12,68	1	329,20
I 5	J 14	I 13	J 1	K 1	P 2	P 1	10,00	5,30	1	279,53
I 2	J 7	I 13	J 8	K 2	P 7	P 1	60,08	208,00	8	437,94
I 2	J 7	I 14	J 8	K 2	P 7	P 1	7,51	6,42	1	438,13
I 3	J 14	I 13	J 5	K 2	P 6	P 3	918,14	153,36	36	307,98
I 2	J 7	I 11	J 8	K 2	P 7	P 3	10,14	52,00	2	479,80
I 4	J 6	I 7	J 4	K 2	P 3	P 2	24,17	31,03	4	236,48
I 3	J 4	I 4	J 18	K 2	P 6	P 5	17,00	5,97	1	352,17

Tabela A10 – Viagens selecionadas do subcaso 4.4

Função objetivo:		R\$ 178.486.990,00								
Origem 1	Destino 1	Origem 2	Destino 2	Classe	Produto 1	Produto 2	x1 (*1000 m³)	x2 (*1000 m³)	NVR	Custo (*1000 reais)
I 2	J 8	-	-	K 2	P 7	-	1584,13	-	61	132,00
I 3	J 7	-	-	K 2	P 6	-	52,00	-	2	138,40
I 3	J 7	-	-	K 3	P 6	-	2092,21	-	47	214,59
I 4	J 1	-	-	K 1	P 3	-	2,45	-	1	175,82
I 4	J 6	-	-	K 2	P 3	-	55,93	-	7	176,00
I 4	J 7	-	-	K 2	P 4	-	78,00	-	3	177,57
I 4	J 8	-	-	K 4	P 3	-	80,00	-	1	887,70
I 4	J 9	-	-	K 2	P 3	-	2,99	-	1	277,92
I 4	J 10	-	-	K 2	P 3	-	328,32	-	64	199,33
I 4	J 15	-	-	K 2	P 3	-	9,37	-	1	188,15
I 4	J 16	-	-	K 4	P 4	-	631,18	-	8	421,21
I 4	J 18	-	-	K 2	P 5	-	125,37	-	21	274,77
I 5	J 1	-	-	K 1	P 1	-	95,40	-	18	118,09
I 5	J 6	-	-	K 2	P 1	-	16,21	-	1	155,85
I 5	J 8	-	-	K 4	P 1	-	160,00	-	2	436,72
I 5	J 9	-	-	K 1	P 1	-	283,41	-	67	119,34
I 5	J 9	-	-	K 2	P 1	-	8,06	-	2	125,15
I 5	J 9	-	-	K 2	P 2	-	313,18	-	69	125,18
I 5	J 10	-	-	K 2	P 1	-	166,80	-	74	86,73
I 5	J 10	-	-	K 2	P 2	-	310,27	-	71	86,88
I 7	J 1	-	-	K 1	P 1	-	127,20	-	24	107,78
I 7	J 1	-	-	K 1	P 3	-	26,95	-	11	95,79
I 7	J 5	-	-	K 2	P 5	-	2,35	-	1	171,43
I 7	J 6	-	-	K 1	P 1	-	10,00	-	1	97,78
I 7	J 9	-	-	K 2	P 3	-	2,99	-	1	207,76
I 7	J 15	-	-	K 2	P 2	-	62,46	-	18	92,04
I 7	J 18	-	-	K 1	P 5	-	47,76	-	8	192,04
I 11	J 9	-	-	K 2	P 5	-	14,34	-	1	353,94
I 11	J 10	-	-	K 2	P 5	-	17,90	-	1	262,08
I 11	J 15	-	-	K 2	P 3	-	7,50	-	1	185,64
I 11	J 16	-	-	K 2	P 4	-	280,28	-	11	105,99
I 11	J 17	-	-	K 1	P 5	-	20,00	-	2	146,31
I 11	J 17	-	-	K 2	P 5	-	34,97	-	2	184,93
I 11	J 18	-	-	K 2	P 5	-	17,91	-	3	285,10
I 12	J 16	-	-	K 4	P 4	-	570,78	-	7	382,47
I 13	J 1	-	-	K 1	P 3	-	76,78	-	32	157,27
I 13	J 4	-	-	K 2	P 2	-	180,28	-	22	110,49
I 13	J 6	-	-	K 2	P 1	-	178,31	-	11	171,04
I 13	J 9	-	-	K 2	P 3	-	194,35	-	65	272,94
I 13	J 14	-	-	K 2	P 2	-	96,68	-	4	92,49
I 13	J 15	-	-	K 2	P 3	-	365,43	-	39	170,32
I 14	J 1	-	-	K 1	P 1	-	1,43	-	1	158,33
I 14	J 6	-	-	K 1	P 1	-	6,63	-	1	160,21
I 14	J 16	-	-	K 2	P 4	-	52,00	-	2	117,57
I 14	J 16	-	-	K 3	P 4	-	45,00	-	1	190,93
I 14	J 16	-	-	K 4	P 4	-	386,82	-	5	327,65
I 11	J 8	I 8	J 16	K 2	P 5	P 4	104,00	104,00	4	530,20
I 3	J 4	I 4	J 10	K 2	P 6	P 3	68,00	16,42	4	276,71
I 2	J 7	I 7	J 8	K 1	P 7	P 5	7,51	2,78	1	353,78
I 13	J 5	I 5	J 17	K 2	P 3	P 1	8,52	23,56	2	294,15
I 5	J 17	I 11	J 5	K 2	P 1	P 5	106,02	92,97	9	322,80
I 11	J 5	I 5	J 17	K 2	P 5	P 1	10,33	11,78	1	322,80
I 4	J 5	I 5	J 17	K 2	P 3	P 1	80,94	223,82	19	299,08
I 5	J 17	I 4	J 5	K 2	P 1	P 3	0,77	4,26	1	299,08
I 13	J 18	I 5	J 17	K 2	P 5	P 1	157,75	318,06	27	332,81
I 13	J 10	I 3	J 14	K 2	P 3	P 6	30,78	148,14	6	278,90
I 13	J 8	I 8	J 7	K 2	P 1	P 4	208,00	208,00	8	438,78
I 3	J 4	I 4	J 15	K 2	P 6	P 3	12,68	9,37	1	279,06
I 8	J 14	I 13	J 9	K 2	P 2	P 3	0,00	2,37	1	439,85
I 3	J 14	I 14	J 5	K 2	P 6	P 3	26,00	4,26	1	301,20
I 11	J 18	I 8	J 16	K 2	P 5	P 4	53,73	213,13	9	476,47
I 14	J 9	I 5	J 17	K 2	P 3	P 1	2,99	11,78	1	349,18
I 8	J 14	I 11	J 18	K 2	P 2	P 5	22,98	5,97	1	452,02
I 8	J 10	I 5	J 8	K 2	P 2	P 1	7,96	46,93	2	273,14
I 2	J 7	I 13	J 8	K 2	P 7	P 1	60,08	208,00	8	437,94
I 3	J 14	I 13	J 10	K 2	P 6	P 5	26,00	13,06	1	305,44
I 3	J 14	I 13	J 5	K 2	P 6	P 3	806,00	130,44	31	307,98
I 2	J 7	I 11	J 8	K 2	P 7	P 3	7,51	26,00	1	479,80
I 11	J 8	I 2	J 7	K 2	P 3	P 7	38,51	10,14	2	479,80
I 4	J 6	I 7	J 4	K 2	P 3	P 2	48,14	51,61	7	236,48
I 14	J 8	I 8	J 7	K 3	P 1	P 4	87,76	90,00	2	691,69

Tabela A11 – Viagens selecionadas do subcaso 4.5

Função objetivo:		R\$ 168.221.590,00								
Origem 1	Destino 1	Origem 2	Destino 2	Classe	Produto 1	Produto 2	x1 (**1000 m³)	x2 (**1000 m³)	NVR	Custo (**1000 reais)
I 5	J 1	-	-	K 1	P 1	-	42,40	-	8	118,09
I 7	J 1	-	-	K 1	P 1	-	128,63	-	25	107,78
I 5	J 9	-	-	K 1	P 1	-	291,47	-	69	119,34
I 5	J 10	-	-	K 2	P 1	-	2,28	-	1	86,73
I 13	J 17	-	-	K 2	P 1	-	565,44	-	48	117,15
I 14	J 17	-	-	K 2	P 1	-	70,68	-	6	104,49
I 5	J 8	-	-	K 4	P 1	-	710,69	-	9	436,72
I 5	J 10	-	-	K 1	P 2	-	4,38	-	1	92,81
I 5	J 9	-	-	K 2	P 2	-	305,52	-	67	125,18
I 5	J 10	-	-	K 2	P 2	-	13,14	-	3	86,88
I 7	J 15	-	-	K 2	P 2	-	3,46	-	1	92,04
I 7	J 14	-	-	K 3	P 2	-	41,41	-	1	250,69
I 7	J 1	-	-	K 1	P 3	-	27,06	-	11	95,79
I 13	J 1	-	-	K 1	P 3	-	71,74	-	30	157,27
I 7	J 6	-	-	K 1	P 3	-	0,20	-	1	110,00
I 13	J 15	-	-	K 2	P 3	-	110,27	-	12	170,32
I 11	J 16	-	-	K 2	P 4	-	280,28	-	11	105,99
I 4	J 16	-	-	K 4	P 4	-	246,00	-	3	421,21
I 12	J 16	-	-	K 4	P 4	-	570,78	-	7	382,47
I 14	J 16	-	-	K 4	P 4	-	483,82	-	6	327,65
I 13	J 17	-	-	K 1	P 5	-	1,27	-	1	121,71
I 11	J 8	-	-	K 2	P 5	-	26,00	-	1	407,12
I 2	J 8	-	-	K 2	P 7	-	1584,13	-	61	132,00
I 8	J 16	I 4	J 8	K 4	P 4	P 5	82,00	80,00	1	1400,93
I 4	J 8	I 8	J 16	K 4	P 3	P 4	144,51	143,13	2	1303,50
I 8	J 7	I 11	J 8	K 2	P 4	P 5	26,00	0,78	1	506,69
I 8	J 14	I 13	J 9	K 2	P 2	P 3	26,00	2,99	1	439,85
I 4	J 10	I 3	J 4	K 2	P 3	P 6	25,65	80,68	5	276,71
I 14	J 5	I 3	J 14	K 2	P 3	P 6	4,26	26,00	1	301,20
I 13	J 10	I 3	J 14	K 2	P 3	P 6	10,26	52,00	2	278,90
I 3	J 14	I 11	J 10	K 2	P 6	P 5	26,00	17,90	1	346,64
I 13	J 18	I 3	J 14	K 2	P 5	P 6	47,76	208,00	8	354,28
I 11	J 9	I 3	J 14	K 2	P 5	P 6	14,34	26,00	1	438,52
I 13	J 18	I 2	J 7	K 2	P 5	P 7	11,94	15,02	2	421,61
I 8	J 7	I 13	J 18	K 2	P 4	P 5	338,00	77,61	13	437,56
I 13	J 9	I 2	J 7	K 2	P 3	P 7	23,92	60,08	8	424,85
I 2	J 7	I 13	J 9	K 2	P 7	P 3	7,51	2,37	1	424,85
I 11	J 18	I 2	J 7	K 2	P 5	P 7	5,97	2,63	1	437,01
I 8	J 7	I 11	J 18	K 2	P 4	P 5	26,00	5,97	1	452,96
I 8	J 14	I 13	J 1	K 1	P 2	P 3	4,94	2,46	1	363,44
I 13	J 15	I 3	J 14	K 2	P 3	P 6	9,38	26,00	1	281,23
I 3	J 14	I 13	J 15	K 2	P 6	P 3	650,00	234,50	25	281,23
I 5	J 6	I 4	J 5	K 2	P 1	P 3	3,82	4,26	1	299,87
I 4	J 5	I 5	J 6	K 2	P 3	P 1	21,30	81,05	5	299,87
I 5	J 6	I 4	J 18	K 2	P 1	P 5	113,47	41,79	7	351,45
I 5	J 1	I 7	J 5	K 1	P 1	P 5	5,30	2,35	1	223,23
I 4	J 10	I 3	J 7	K 2	P 3	P 6	328,32	1664,00	64	284,75
I 13	J 4	I 4	J 16	K 2	P 2	P 4	123,15	390,00	15	220,97
I 4	J 16	I 13	J 4	K 2	P 4	P 2	26,00	8,21	1	220,97
I 5	J 1	I 7	J 18	K 1	P 1	P 5	53,00	56,26	10	280,56
I 5	J 10	I 11	J 5	K 2	P 2	P 5	39,42	92,97	9	307,12
I 11	J 5	I 5	J 10	K 2	P 5	P 2	10,33	2,57	1	307,12
I 5	J 10	I 13	J 5	K 2	P 1	P 3	72,96	134,70	32	265,52
I 5	J 10	I 4	J 5	K 2	P 1	P 3	34,20	63,90	15	270,50
I 13	J 17	I 3	J 14	K 2	P 1	P 6	11,78	2,14	1	281,45
I 13	J 18	I 5	J 10	K 2	P 5	P 1	29,85	9,48	5	317,01
I 5	J 10	I 11	J 18	K 2	P 1	P 5	47,88	125,37	21	332,41
I 4	J 16	I 11	J 10	K 2	P 4	P 5	26,00	13,06	1	384,39
I 13	J 4	I 4	J 10	K 2	P 2	P 3	8,21	5,13	1	271,92
I 13	J 4	I 4	J 6	K 2	P 2	P 3	90,31	87,89	11	248,60
I 7	J 15	I 3	J 7	K 2	P 2	P 6	62,28	468,00	18	195,84
I 5	J 10	I 13	J 9	K 2	P 2	P 3	258,42	176,41	59	333,22
I 4	J 6	I 3	J 7	K 2	P 3	P 6	7,99	12,21	1	288,04
I 13	J 17	I 4	J 16	K 2	P 1	P 4	11,78	21,18	1	252,65
I 13	J 17	I 4	J 10	K 2	P 1	P 3	11,78	5,13	1	303,59
I 4	J 6	I 13	J 17	K 2	P 3	P 1	7,99	0,77	1	280,28
I 13	J 15	I 11	J 17	K 2	P 3	P 5	28,14	53,70	3	342,41
I 7	J 6	I 13	J 10	K 2	P 1	P 3	12,81	1,03	1	300,26
I 14	J 17	I 13	J 14	K 2	P 1	P 2	23,56	47,08	2	189,85
I 13	J 15	I 4	J 18	K 2	P 3	P 5	9,38	5,97	1	445,08
I 7	J 15	I 13	J 1	K 1	P 2	P 3	3,46	2,46	1	254,09





Tabela A12 – Viagens selecionadas do subcaso 4.6

Função objetivo:		R\$ 177.407.300,00										
Origem 1	Destino 1	Origem 2	Destino 2	Classe	Produto 1	Produto 2	Produto 3	x1 (*1000 m²)	x2 (*1000 m²)	x1 (*1000 m²)	NVR	Custo (*1000 reais)
I 5	J 1	-	-	K 1	P 1	-	-	212,00	-	-	40	118,09
I 7	J 1	-	-	K 1	P 1	-	-	17,33	-	-	4	107,78
I 5	J 9	-	-	K 1	P 1	-	-	291,47	-	-	69	119,34
I 7	J 6	-	-	K 2	P 1	-	-	113,89	-	-	8	118,75
I 14	J 6	-	-	K 2	P 1	-	-	97,26	-	-	6	171,24
I 5	J 10	-	-	K 2	P 1	-	-	166,80	-	-	74	86,73
I 13	J 17	-	-	K 2	P 1	-	-	259,16	-	-	22	117,15
I 13	J 4	-	-	K 2	P 2	-	-	180,62	-	-	22	110,49
I 5	J 9	-	-	K 2	P 2	-	-	291,84	-	-	64	125,18
I 5	J 10	-	-	K 2	P 2	-	-	319,74	-	-	73	86,88
I 13	J 14	-	-	K 2	P 2	-	-	96,34	-	-	4	92,49
I 7	J 15	-	-	K 2	P 2	-	-	86,50	-	-	25	92,04
I 7	J 1	-	-	K 1	P 3	-	-	19,68	-	-	8	95,79
I 13	J 1	-	-	K 1	P 3	-	-	84,05	-	-	35	157,27
I 7	J 6	-	-	K 1	P 3	-	-	0,20	-	-	1	110,00
I 4	J 6	-	-	K 2	P 3	-	-	103,87	-	-	13	176,00
I 13	J 9	-	-	K 2	P 3	-	-	175,79	-	-	59	272,94
I 4	J 10	-	-	K 2	P 3	-	-	343,71	-	-	67	199,33
I 13	J 15	-	-	K 2	P 3	-	-	391,67	-	-	42	170,32
I 11	J 16	-	-	K 2	P 4	-	-	280,28	-	-	11	105,99
I 4	J 16	-	-	K 4	P 4	-	-	647,18	-	-	8	421,21
I 12	J 16	-	-	K 4	P 4	-	-	570,78	-	-	7	382,47
I 14	J 16	-	-	K 4	P 4	-	-	483,82	-	-	6	327,65
I 13	J 17	-	-	K 1	P 5	-	-	1,27	-	-	1	121,71
I 7	J 18	-	-	K 1	P 5	-	-	29,85	-	-	5	192,04
I 11	J 9	-	-	K 2	P 5	-	-	14,34	-	-	1	353,94
I 11	J 10	-	-	K 2	P 5	-	-	30,96	-	-	2	262,08
I 11	J 17	-	-	K 2	P 5	-	-	53,70	-	-	3	184,93
I 4	J 18	-	-	K 2	P 5	-	-	119,40	-	-	20	274,77
I 7	J 18	-	-	K 2	P 5	-	-	23,88	-	-	4	204,52
I 11	J 18	-	-	K 2	P 5	-	-	137,31	-	-	23	285,10
I 3	J 7	-	-	K 2	P 6	-	-	78,00	-	-	3	138,40
I 3	J 7	-	-	K 3	P 6	-	-	2066,21	-	-	46	214,59
I 2	J 8	-	-	K 2	P 7	-	-	1584,13	-	-	61	132,00
I 8	J 4	I 11	J 8	K 2	P 2	P 5	-	7,62	26,00	-	1	497,58
I 3	J 4	I 4	J 10	K 2	P 6	P 3	-	68,00	20,52	-	4	276,71
I 2	J 7	I 7	J 8	K 1	P 7	P 5	-	7,51	2,78	-	1	353,78
I 11	J 5	I 5	J 17	K 2	P 5	P 1	-	82,64	94,24	-	8	322,80
I 4	J 5	I 5	J 17	K 2	P 3	P 1	-	12,78	35,34	-	3	299,08
I 5	J 17	I 13	J 18	K 2	P 1	P 5	-	176,70	89,55	-	15	332,81
I 13	J 18	I 5	J 17	K 2	P 5	P 1	-	2,53	11,78	-	1	332,81
I 3	J 14	I 13	J 10	K 2	P 6	P 3	-	78,00	11,29	-	3	278,90
I 8	J 7	I 13	J 8	K 2	P 4	P 1	-	156,00	156,00	-	6	438,78
I 7	J 4	I 4	J 1	K 1	P 2	P 3	-	8,21	2,45	-	1	231,71
I 4	J 5	I 5	J 17	K 2	P 5	P 1	-	2,35	0,77	-	1	325,25
I 14	J 9	I 5	J 17	K 2	P 3	P 1	-	2,99	11,78	-	1	349,18
I 13	J 8	I 2	J 7	K 2	P 5	P 7	-	78,00	17,65	-	3	464,56
I 2	J 7	I 13	J 8	K 2	P 7	P 1	-	52,57	182,00	-	7	437,94
I 3	J 14	I 13	J 5	K 2	P 6	P 3	-	938,14	157,62	-	37	307,98
I 2	J 7	I 11	J 8	K 2	P 7	P 3	-	7,51	14,51	-	1	479,80
I 4	J 8	I 8	J 7	K 2	P 3	P 4	-	26,00	26,00	-	1	496,11
I 5	J 17	I 4	J 9	K 2	P 1	P 3	-	106,02	26,91	-	9	353,80
I 4	J 18	I 3	J 4	K 2	P 5	P 6	-	5,97	12,68	-	1	352,17
I 8	J 16	I 11	J 5	K 2	P 4	P 3	P 1	260,00	42,60	260,00	10	483,04
I 7	J 8	I 8	J 4	K 1	P 1	P 2	P 4	8,69	0,00	10,00	1	403,01
I 8	J 14	I 14	J 5	K 2	P 2	P 3	P 1	23,32	4,26	26,00	1	449,31
I 8	J 16	I 11	J 5	K 2	P 4	P 5	P 1	52,00	20,66	52,00	2	509,18
I 8	J 16	I 13	J 5	K 2	P 4	P 3	P 1	17,13	2,64	26,00	1	480,96
I 7	J 5	I 5	J 4	K 2	P 3	P 2	P 4	8,52	11,87	52,00	2	341,04
I 4	J 8	I 8	J 7	K 2	P 3	P 4	P 2	104,00	104,00	19,36	4	509,29

Tabela A13 – Viagens selecionadas do subcaso 4.7

Função objetivo:		R\$ 176.579.230,00										
Origem 1	Destino 1	Origem 2	Destino 2	Classe	Produto 1	Produto 2	Produto 3	x1 (*1000 m <sup>2</sup> )	x2 (*1000 m <sup>2</sup> )	x1 (*1000 m <sup>2</sup> )	NVR	Custo (*1000 reais)
I 2	J 8	-	-	K 2	P 7	-	-	1584,13	-	-	61	132,00
I 3	J 7	-	-	K 2	P 6	-	-	52,00	-	-	2	138,40
I 3	J 7	-	-	K 3	P 6	-	-	2092,21	-	-	47	214,59
I 4	J 6	-	-	K 2	P 3	-	-	95,88	-	-	12	176,00
I 4	J 7	-	-	K 2	P 4	-	-	26,00	-	-	1	177,57
I 4	J 7	-	-	K 3	P 4	-	-	180,00	-	-	4	284,93
I 4	J 9	-	-	K 2	P 3	-	-	5,98	-	-	2	277,92
I 4	J 10	-	-	K 2	P 3	-	-	277,02	-	-	54	199,33
I 4	J 15	-	-	K 1	P 3	-	-	9,37	-	-	1	177,28
I 4	J 15	-	-	K 2	P 3	-	-	9,37	-	-	1	188,15
I 4	J 16	-	-	K 4	P 4	-	-	477,18	-	-	6	421,21
I 4	J 18	-	-	K 2	P 5	-	-	125,37	-	-	21	274,77
I 5	J 1	-	-	K 1	P 1	-	-	86,23	-	-	17	118,09
I 5	J 9	-	-	K 1	P 1	-	-	291,47	-	-	69	119,34
I 5	J 9	-	-	K 2	P 2	-	-	296,40	-	-	65	125,18
I 5	J 10	-	-	K 2	P 1	-	-	166,80	-	-	74	86,73
I 5	J 10	-	-	K 2	P 2	-	-	319,01	-	-	73	86,88
I 7	J 1	-	-	K 1	P 1	-	-	137,00	-	-	26	107,78
I 7	J 1	-	-	K 1	P 3	-	-	25,88	-	-	11	95,79
I 7	J 5	-	-	K 2	P 5	-	-	2,35	-	-	1	171,43
I 7	J 6	-	-	K 1	P 1	-	-	0,42	-	-	1	97,78
I 7	J 6	-	-	K 1	P 3	-	-	0,20	-	-	1	110,00
I 7	J 15	-	-	K 2	P 2	-	-	76,34	-	-	22	92,04
I 7	J 17	-	-	K 1	P 5	-	-	1,27	-	-	1	122,29
I 7	J 18	-	-	K 1	P 5	-	-	47,76	-	-	8	192,04
I 11	J 9	-	-	K 2	P 5	-	-	14,34	-	-	1	353,94
I 11	J 10	-	-	K 2	P 5	-	-	30,96	-	-	2	262,08
I 11	J 16	-	-	K 2	P 4	-	-	280,28	-	-	11	106,99
I 11	J 17	-	-	K 2	P 5	-	-	53,70	-	-	3	184,93
I 11	J 18	-	-	K 2	P 5	-	-	161,19	-	-	27	285,10
I 12	J 16	-	-	K 4	P 4	-	-	570,78	-	-	7	382,47
I 13	J 1	-	-	K 1	P 3	-	-	80,30	-	-	33	157,27
I 13	J 4	-	-	K 1	P 2	-	-	8,21	-	-	1	116,69
I 13	J 4	-	-	K 2	P 2	-	-	149,09	-	-	19	110,49
I 13	J 6	-	-	K 2	P 1	-	-	210,73	-	-	13	171,04
I 13	J 9	-	-	K 2	P 3	-	-	193,73	-	-	65	272,94
I 13	J 14	-	-	K 2	P 2	-	-	119,66	-	-	5	92,49
I 13	J 15	-	-	K 2	P 3	-	-	363,56	-	-	39	170,32
I 13	J 17	-	-	K 2	P 1	-	-	247,38	-	-	21	117,15
I 14	J 7	-	-	K 2	P 4	-	-	26,00	-	-	1	159,82
I 14	J 16	-	-	K 2	P 4	-	-	52,00	-	-	2	117,57
I 14	J 16	-	-	K 3	P 4	-	-	90,00	-	-	2	190,93
I 14	J 16	-	-	K 4	P 4	-	-	315,82	-	-	4	327,65
I 14	J 17	-	-	K 2	P 1	-	-	94,24	-	-	8	104,49
I 4	J 9	I 8	J 4	K 2	P 3	P 2	-	2,99	4,19	-	1	411,60
I 3	J 4	I 4	J 10	K 2	P 6	P 3	-	68,00	20,52	-	4	276,71
I 2	J 7	I 7	J 8	K 1	P 7	P 5	-	7,51	9,12	-	1	353,78
I 5	J 17	I 11	J 5	K 2	P 1	P 5	-	23,56	20,66	-	2	322,80
I 4	J 5	I 5	J 17	K 2	P 3	P 1	-	4,26	11,78	-	1	299,08
I 5	J 17	I 4	J 5	K 2	P 1	P 3	-	176,70	63,90	-	15	299,08
I 13	J 18	I 5	J 17	K 2	P 5	P 1	-	71,64	130,35	-	12	332,81
I 8	J 16	I 13	J 18	K 2	P 4	P 5	-	26,00	2,53	-	1	461,48
I 3	J 14	I 13	J 10	K 2	P 6	P 3	-	416,00	77,98	-	16	278,90
I 4	J 15	I 3	J 4	K 2	P 3	P 6	-	9,37	12,68	-	1	279,06
I 3	J 14	I 14	J 5	K 2	P 6	P 3	-	26,00	4,26	-	1	301,20
I 14	J 9	I 5	J 17	K 2	P 3	P 1	-	2,99	11,78	-	1	349,18
I 2	J 7	I 13	J 8	K 2	P 7	P 5	-	30,04	97,66	-	4	464,56
I 13	J 8	I 2	J 7	K 2	P 1	P 7	-	156,00	40,18	-	6	437,94
I 13	J 5	I 3	J 14	K 2	P 3	P 6	-	93,72	564,14	-	22	307,98
I 2	J 7	I 11	J 8	K 2	P 7	P 3	-	7,51	26,00	-	1	479,80
I 4	J 6	I 7	J 4	K 2	P 3	P 2	-	7,99	4,89	-	1	236,48
I 13	J 8	I 8	J 15	K 2	P 3	P 2	-	14,51	2,12	-	1	423,24
I 3	J 14	I 13	J 1	K 1	P 6	P 1	-	10,00	5,30	-	1	262,85
I 8	J 4	I 4	J 5	K 2	P 2	P 3	P 1	24,63	12,78	78,00	3	427,84
I 8	J 16	I 11	J 5	K 2	P 4	P 3	P 1	286,00	46,86	268,69	11	483,04
I 8	J 16	I 11	J 5	K 2	P 4	P 5	P 1	199,13	82,64	208,00	8	509,18
I 7	J 5	I 5	J 4	K 2	P 3	P 2	P 4	2,64	8,04	26,00	1	341,04
I 4	J 8	I 8	J 7	K 2	P 3	P 4	P 2	104,00	104,00	32,84	4	509,29

Tabela A14 – Viagens selecionadas do subcaso 4.8

Função objetivo:		R\$ 165.992.360,00										
Origem 1	Destino 1	Origem 2	Destino 2	Classe	Produto 1	Produto 2	Produto 3	x1 (*1000 m²)	x2 (*1000 m²)	x1 (*1000 m²)	NVR	Custo (*1000 reais)
1 5	J 1	-	-	K 1	P 1	-	-	84,80	-	-	16	118,09
1 7	J 1	-	-	K 1	P 1	-	-	137,80	-	-	26	107,78
1 5	J 9	-	-	K 1	P 1	-	-	291,47	-	-	69	119,34
1 13	J 17	-	-	K 2	P 1	-	-	447,64	-	-	38	117,15
1 14	J 17	-	-	K 2	P 1	-	-	47,12	-	-	4	104,49
1 5	J 8	-	-	K 4	P 1	-	-	630,69	-	-	8	436,72
1 5	J 9	-	-	K 2	P 2	-	-	305,52	-	-	67	125,18
1 7	J 14	-	-	K 3	P 2	-	-	41,41	-	-	1	250,69
1 7	J 1	-	-	K 1	P 3	-	-	30,29	-	-	13	95,79
1 13	J 1	-	-	K 1	P 3	-	-	75,89	-	-	31	157,27
1 7	J 6	-	-	K 1	P 3	-	-	0,20	-	-	1	110,00
1 13	J 15	-	-	K 2	P 3	-	-	309,54	-	-	33	170,32
1 11	J 16	-	-	K 2	P 4	-	-	280,28	-	-	11	105,99
1 4	J 16	-	-	K 4	P 4	-	-	656,00	-	-	8	421,21
1 12	J 16	-	-	K 4	P 4	-	-	570,78	-	-	7	382,47
1 14	J 16	-	-	K 4	P 4	-	-	483,82	-	-	6	327,65
1 13	J 17	-	-	K 1	P 5	-	-	1,27	-	-	2	121,71
1 2	J 8	-	-	K 2	P 7	-	-	1267,25	-	-	49	132,00
1 8	J 16	1 4	J 8	K 4	P 4	P 3	-	164,00	144,51	-	2	1303,50
1 8	J 7	1 11	J 8	K 2	P 4	P 5	-	26,00	26,00	-	1	506,69
1 2	J 7	1 11	J 8	K 2	P 7	P 5	-	7,51	26,00	-	1	505,85
1 13	J 10	1 3	J 14	K 2	P 3	P 6	-	67,72	364,00	-	14	278,90
1 11	J 10	1 3	J 14	K 2	P 5	P 6	-	17,90	26,00	-	1	346,64
1 3	J 14	1 11	J 10	K 2	P 6	P 5	-	26,00	13,06	-	1	346,64
1 3	J 14	1 13	J 9	K 2	P 6	P 3	-	390,00	44,85	-	15	357,52
1 2	J 7	1 13	J 18	K 2	P 7	P 5	-	15,02	11,94	-	2	421,61
1 13	J 9	1 2	J 7	K 2	P 3	P 7	-	26,91	67,59	-	9	424,85
1 8	J 7	1 11	J 18	K 2	P 4	P 6	-	26,00	5,97	-	1	452,96
1 3	J 14	1 13	J 15	K 2	P 6	P 3	-	182,00	63,37	-	7	281,23
1 7	J 5	1 5	J 1	K 1	P 5	P 1	-	2,35	5,30	-	1	223,23
1 3	J 7	1 4	J 10	K 2	P 6	P 3	-	1560,00	307,80	-	60	284,75
1 3	J 7	1 4	J 18	K 2	P 6	P 5	-	104,00	23,88	-	4	360,22
1 13	J 9	1 3	J 7	K 2	P 3	P 6	-	2,99	26,00	-	1	358,39
1 5	J 1	1 7	J 18	K 1	P 1	P 5	-	1,43	2,53	-	1	260,56
1 5	J 10	1 11	J 5	K 2	P 2	P 5	-	4,38	10,33	-	1	307,12
1 11	J 5	1 5	J 10	K 2	P 5	P 2	-	82,64	35,04	-	8	307,12
1 5	J 10	1 13	J 5	K 2	P 1	P 3	-	38,76	66,83	-	17	265,52
1 13	J 5	1 5	J 10	K 2	P 3	P 1	-	4,26	0,36	-	1	265,52
1 5	J 10	1 13	J 18	K 2	P 1	P 5	-	54,72	143,28	-	24	317,01
1 5	J 10	1 11	J 18	K 2	P 1	P 5	-	29,64	77,61	-	13	332,41
1 4	J 16	1 11	J 17	K 2	P 4	P 5	-	52,00	35,80	-	2	307,17
1 7	J 15	1 3	J 7	K 2	P 2	P 6	-	58,82	442,00	-	17	195,84
1 5	J 10	1 13	J 5	K 2	P 2	P 3	-	4,38	4,26	-	1	278,49
1 13	J 5	1 5	J 10	K 2	P 3	P 2	-	4,26	4,38	-	1	278,49
1 13	J 15	1 3	J 7	K 2	P 3	P 6	-	9,38	12,21	-	1	282,10
1 5	J 10	1 4	J 18	K 2	P 2	P 5	-	65,70	89,55	-	15	335,05
1 11	J 9	1 5	J 10	K 2	P 5	P 2	-	14,34	4,38	-	1	414,22
1 13	J 9	1 5	J 10	K 2	P 3	P 2	-	130,94	190,91	-	44	333,22
1 4	J 16	1 13	J 17	K 2	P 4	P 1	-	1,18	11,78	-	1	252,65
1 13	J 17	1 4	J 6	K 2	P 1	P 3	-	141,36	95,88	-	12	280,28
1 4	J 6	1 13	J 17	K 2	P 3	P 1	-	7,99	11,78	-	1	280,28
1 13	J 15	1 11	J 17	K 2	P 3	P 5	-	9,38	17,90	-	1	342,41
1 13	J 14	1 14	J 17	K 2	P 2	P 1	-	47,08	12,55	-	2	189,85
1 5	J 6	1 13	J 4	K 2	P 1	P 2	P 3	211,15	114,94	59,64	14	333,17
1 5	J 10	1 13	J 4	K 2	P 1	P 2	P 3	31,92	114,94	59,64	14	316,62
1 5	J 10	1 3	J 4	K 2	P 1	P 6	P 3	11,40	80,68	21,30	5	308,57
1 14	J 17	1 11	J 8	K 2	P 1	P 5	P 2	23,56	52,00	30,94	2	563,81
1 5	J 10	1 3	J 14	K 2	P 2	P 6	P 3	8,76	28,14	8,23	2	316,96
1 7	J 15	1 11	J 8	K 2	P 2	P 5	P 4	3,46	2,78	26,00	1	551,45
1 7	J 15	1 2	J 8	K 2	P 2	P 7	P 4	10,38	78,00	78,00	3	409,06
1 8	J 16	1 4	J 5	K 4	P 4	P 5	P 1	82,00	10,33	80,00	1	1153,25
1 7	J 16	1 2	J 8	K 2	P 5	P 7	P 4	53,73	234,00	213,13	9	441,98

Tabela A15 – Viagens selecionadas do subcaso 5.1

Função objetivo:		R\$ 148.464.120,00									
Origem 1	Destino 1	Origem 2	Destino 2	Classe	Produto 1	Produto 2	x1 (*1000 m³)	x2 (*1000 m³)	x3 (*1000 m³)	NVR	Custo (*1000 reais)
I_2	J_7	-	-	K_2	P_7	-	30,04	-	-	4	270,93
I_2	J_8	-	-	K_2	P_7	-	1012,76	-	-	39	132,00
I_3	J_7	-	-	K_2	P_6	-	26,00	-	-	1	138,40
I_3	J_7	-	-	K_3	P_6	-	2115,00	-	-	47	214,59
I_3	J_14	-	-	K_3	P_6	-	810,00	-	-	18	280,99
I_4	J_8	-	-	K_3	P_3	-	40,08	-	-	1	607,98
I_4	J_8	-	-	K_4	P_3	-	80,00	-	-	1	887,70
I_4	J_8	-	-	K_4	P_5	-	80,00	-	-	1	985,13
I_4	J_16	-	-	K_2	P_4	-	52,00	-	-	2	161,64
I_4	J_16	-	-	K_3	P_4	-	45,00	-	-	1	260,25
I_4	J_16	-	-	K_4	P_4	-	612,18	-	-	8	421,21
I_4	J_18	-	-	K_2	P_5	-	41,79	-	-	7	274,77
I_5	J_8	-	-	K_4	P_1	-	707,72	-	-	9	436,72
I_5	J_10	-	-	K_2	P_2	-	30,59	-	-	7	86,88
I_7	J_18	-	-	K_1	P_5	-	59,70	-	-	10	192,04
I_8	J_7	-	-	K_3	P_4	-	45,00	-	-	1	453,33
I_11	J_16	-	-	K_2	P_4	-	280,28	-	-	11	105,99
I_11	J_18	-	-	K_1	P_5	-	11,94	-	-	2	278,03
I_11	J_18	-	-	K_2	P_5	-	191,04	-	-	32	285,10
I_12	J_16	-	-	K_4	P_4	-	570,78	-	-	7	382,47
I_13	J_4	-	-	K_2	P_2	-	54,41	-	-	7	110,49
I_13	J_14	-	-	K_2	P_2	-	119,66	-	-	5	92,49
I_13	J_17	-	-	K_2	P_1	-	600,78	-	-	51	117,15
I_13	J_18	-	-	K_2	P_5	-	11,94	-	-	2	269,70
I_14	J_16	-	-	K_2	P_4	-	52,00	-	-	2	117,57
I_14	J_16	-	-	K_3	P_4	-	45,00	-	-	1	190,93
I_14	J_16	-	-	K_4	P_4	-	386,82	-	-	5	327,65
I_14	J_17	-	-	K_2	P_1	-	47,12	-	-	4	104,49
I_5	J_4	I_4	J_9	K_2	P_2	P_3	38,34	22,80	14,95	5	361,53
I_11	J_18	I_5	J_17	K_2	P_5	P_1	17,91	53,70	15,85	3	426,59
I_7	J_4	I_4	J_15	K_2	P_2	P_3	40,62	17,30	46,85	5	248,78
I_13	J_10	I_3	J_4	K_2	P_2	P_6	4,37	8,21	8,37	1	309,87
I_11	J_8	I_5	J_17	K_2	P_5	P_1	21,25	1,27	0,00	1	483,15
I_13	J_5	I_5	J_1	K_1	P_3	P_1	4,26	2,46	1,43	1	272,46
I_5	J_1	I_7	J_9	K_1	P_1	P_2	0,00	4,23	4,56	1	276,98
I_5	J_6	I_7	J_10	K_2	P_1	P_2	48,63	6,84	6,09	3	232,56
I_13	J_8	I_8	J_9	K_2	P_3	P_2	0,00	0,94	4,56	1	472,28
I_4	J_5	I_5	J_10	K_2	P_3	P_1	11,16	20,52	9,12	4	283,59
I_5	J_10	I_7	J_9	K_2	P_2	P_1	43,70	45,60	37,74	10	281,18
I_5	J_9	I_8	J_10	K_2	P_1	P_2	21,15	11,40	21,82	5	288,13
I_5	J_10	I_7	J_9	K_1	P_1	P_2	29,64	54,99	45,50	13	276,13
I_13	J_10	I_5	J_1	K_1	P_3	P_1	215,46	103,32	222,60	42	275,00
I_5	J_15	I_7	J_10	K_2	P_2	P_1	93,69	118,26	61,56	27	218,55
I_11	J_18	I_5	J_10	K_2	P_5	P_1	11,94	30,96	4,56	2	397,87
I_5	J_10	I_13	J_9	K_1	P_1	P_3	4,56	8,46	5,98	2	337,58
I_5	J_10	I_7	J_9	K_2	P_2	P_3	39,33	41,04	25,35	9	281,11
I_13	J_10	I_5	J_15	K_2	P_3	P_2	50,76	91,83	33,82	10	296,82
I_4	J_8	I_5	J_10	K_2	P_3	P_1	24,43	1,57	2,28	1	443,86
I_4	J_15	I_5	J_6	K_2	P_3	P_1	93,70	79,90	140,30	10	344,29
I_5	J_10	I_13	J_9	K_2	P_2	P_3	48,07	50,16	32,89	11	346,29
I_5	J_10	I_14	J_9	K_2	P_2	P_3	4,37	4,56	2,99	1	346,61
I_2	J_8	I_8	J_7	K_2	P_7	P_4	570,48	53,52	570,13	24	390,84
I_13	J_5	I_5	J_9	K_2	P_3	P_1	166,14	116,61	164,90	39	343,50
I_13	J_5	I_5	J_9	K_2	P_3	P_2	8,52	5,98	9,12	2	343,53
I_13	J_6	I_7	J_1	K_1	P_3	P_1	0,20	0,40	5,30	1	267,46
I_4	J_15	I_7	J_10	K_2	P_3	P_1	159,29	87,21	36,84	17	304,63
I_3	J_14	I_13	J_4	K_2	P_6	P_2	206,14	69,74	90,31	11	301,11
I_11	J_5	I_5	J_8	K_2	P_5	P_1	2,97	5,53	2,97	1	464,55
I_13	J_18	I_7	J_5	K_2	P_5	P_3	5,97	10,33	0,00	1	441,30
I_11	J_18	I_8	J_9	K_2	P_5	P_2	5,97	14,34	4,56	1	525,72
I_3	J_4	I_2	J_7	K_2	P_6	P_7	2,57	3,21	2,57	1	466,58
I_13	J_18	I_4	J_5	K_2	P_5	P_3	50,29	92,35	38,34	9	511,46
I_14	J_17	I_4	J_6	K_2	P_1	P_3	32,04	22,22	23,97	3	306,63

Tabela A16 – Viagens selecionadas do subcaso 5.2

Função objetivo:		R\$ 148.029.940,00									
Origem 1	Destino 1	Origem 2	Destino 2	Classe	Produto 1	Produto 2	x1 (*1000 m³)	x2 (*1000 m³)	x3 (*1000 m³)	NVR	Custo (*1000 reais)
I_5	J_9	-	-	K_1	P_1	-	42,30	-	-	10	119,34
I_13	J_17	-	-	K_2	P_1	-	589,00	-	-	50	117,15
I_14	J_17	-	-	K_2	P_1	-	70,68	-	-	6	104,49
I_5	J_8	-	-	K_4	P_1	-	710,69	-	-	9	436,72
I_13	J_4	-	-	K_2	P_2	-	57,47	-	-	7	110,49
I_5	J_10	-	-	K_2	P_2	-	35,04	-	-	8	86,88
I_13	J_14	-	-	K_2	P_2	-	119,66	-	-	5	92,49
I_7	J_1	-	-	K_1	P_3	-	0,51	-	-	1	95,79
I_4	J_8	-	-	K_4	P_3	-	80,00	-	-	1	887,70
I_4	J_16	-	-	K_2	P_4	-	52,00	-	-	2	161,64
I_11	J_16	-	-	K_2	P_4	-	280,28	-	-	11	105,99
I_4	J_16	-	-	K_4	P_4	-	656,00	-	-	8	421,21
I_12	J_16	-	-	K_4	P_4	-	570,78	-	-	7	382,47
I_14	J_16	-	-	K_4	P_4	-	483,82	-	-	6	327,65
I_7	J_18	-	-	K_1	P_5	-	59,60	-	-	10	192,04
I_4	J_18	-	-	K_2	P_5	-	54,56	-	-	11	274,77
I_11	J_18	-	-	K_2	P_5	-	191,04	-	-	32	285,10
I_4	J_8	-	-	K_4	P_5	-	59,55	-	-	1	985,13
I_3	J_7	-	-	K_2	P_6	-	104,00	-	-	4	138,40
I_3	J_7	-	-	K_3	P_6	-	2025,00	-	-	45	214,59
I_3	J_14	-	-	K_3	P_6	-	810,00	-	-	18	280,99
I_2	J_7	-	-	K_2	P_7	-	30,04	-	-	4	270,93
I_2	J_8	-	-	K_2	P_7	-	963,33	-	-	38	132,00
I_5	J_4	I_4	J_9	K_2	P_2	P_3	24,63	13,68	8,97	3	361,53
I_11	J_18	I_5	J_17	K_2	P_5	P_1	17,91	53,70	14,23	3	426,59
I_7	J_4	I_4	J_15	K_2	P_2	P_3	49,26	20,76	56,22	6	248,78
I_13	J_10	I_3	J_4	K_2	P_2	P_6	1,31	8,21	8,37	1	309,87
I_3	J_4	I_4	J_7	K_2	P_6	P_4	2,57	15,21	1,18	1	268,76
I_8	J_1	I_7	J_6	K_1	P_1	P_2	5,30	4,23	4,66	1	276,98
I_5	J_6	I_7	J_10	K_2	P_1	P_2	48,63	6,84	13,11	3	232,56
I_13	J_8	I_8	J_9	K_2	P_3	P_2	40,08	1,88	9,12	2	472,28
I_4	J_5	I_5	J_10	K_2	P_3	P_1	19,68	25,65	11,40	5	283,59
I_5	J_10	I_7	J_9	K_2	P_2	P_1	39,33	41,04	37,67	9	281,18
I_5	J_9	I_8	J_10	K_2	P_1	P_2	25,38	13,68	21,82	6	288,13
I_5	J_10	I_7	J_9	K_1	P_1	P_2	15,96	29,61	24,50	7	276,13
I_13	J_6	I_7	J_17	K_2	P_1	P_5	15,06	10,94	1,27	1	302,24
I_13	J_10	I_5	J_1	K_1	P_3	P_1	214,92	103,32	222,60	42	275,00
I_5	J_15	I_7	J_10	K_2	P_2	P_1	93,69	118,26	61,56	27	218,55
I_11	J_18	I_5	J_10	K_2	P_5	P_1	11,94	30,96	4,56	2	397,87
I_5	J_10	I_13	J_9	K_1	P_1	P_3	13,68	25,38	17,94	6	337,58
I_5	J_10	I_7	J_9	K_2	P_2	P_3	43,70	45,60	27,40	10	281,11
I_13	J_10	I_5	J_15	K_2	P_3	P_2	41,04	73,09	27,76	8	296,82
I_4	J_8	I_5	J_10	K_2	P_3	P_1	24,43	1,57	2,28	1	443,86
I_4	J_15	I_5	J_6	K_2	P_3	P_1	103,07	87,89	132,40	11	344,29
I_5	J_10	I_13	J_9	K_2	P_2	P_3	34,96	36,48	23,92	8	346,29
I_11	J_18	I_5	J_10	K_2	P_5	P_2	5,97	0,00	1,26	1	410,84
I_5	J_10	I_14	J_9	K_2	P_2	P_3	8,74	9,12	5,98	2	346,61
I_2	J_8	I_8	J_7	K_2	P_7	P_4	618,02	57,98	615,13	26	390,84
I_13	J_5	I_5	J_9	K_2	P_3	P_1	123,54	86,71	122,67	29	343,50
I_13	J_5	I_5	J_9	K_2	P_3	P_2	46,86	32,89	50,16	11	343,53
I_13	J_6	I_7	J_10	K_2	P_3	P_2	7,99	5,13	1,88	1	300,40
I_13	J_6	I_7	J_1	K_1	P_3	P_1	0,20	2,35	1,43	1	267,46
I_4	J_15	I_7	J_10	K_2	P_3	P_1	159,29	87,21	36,84	17	304,63
I_3	J_14	I_13	J_4	K_2	P_6	P_2	206,14	69,74	90,31	11	301,11
I_11	J_5	I_5	J_8	K_2	P_5	P_1	2,97	23,03	0,00	1	464,55
I_11	J_18	I_5	J_9	K_2	P_5	P_1	5,97	14,34	4,23	1	476,05
I_13	J_18	I_7	J_5	K_2	P_5	P_3	5,97	10,33	0,00	1	441,30
I_11	J_18	I_5	J_8	K_2	P_5	P_1	1,80	24,20	0,00	1	503,11
I_13	J_18	I_4	J_6	K_2	P_5	P_3	53,73	92,35	38,34	9	511,46
I_14	J_17	I_4	J_6	K_2	P_1	P_3	10,94	15,06	7,99	1	306,63

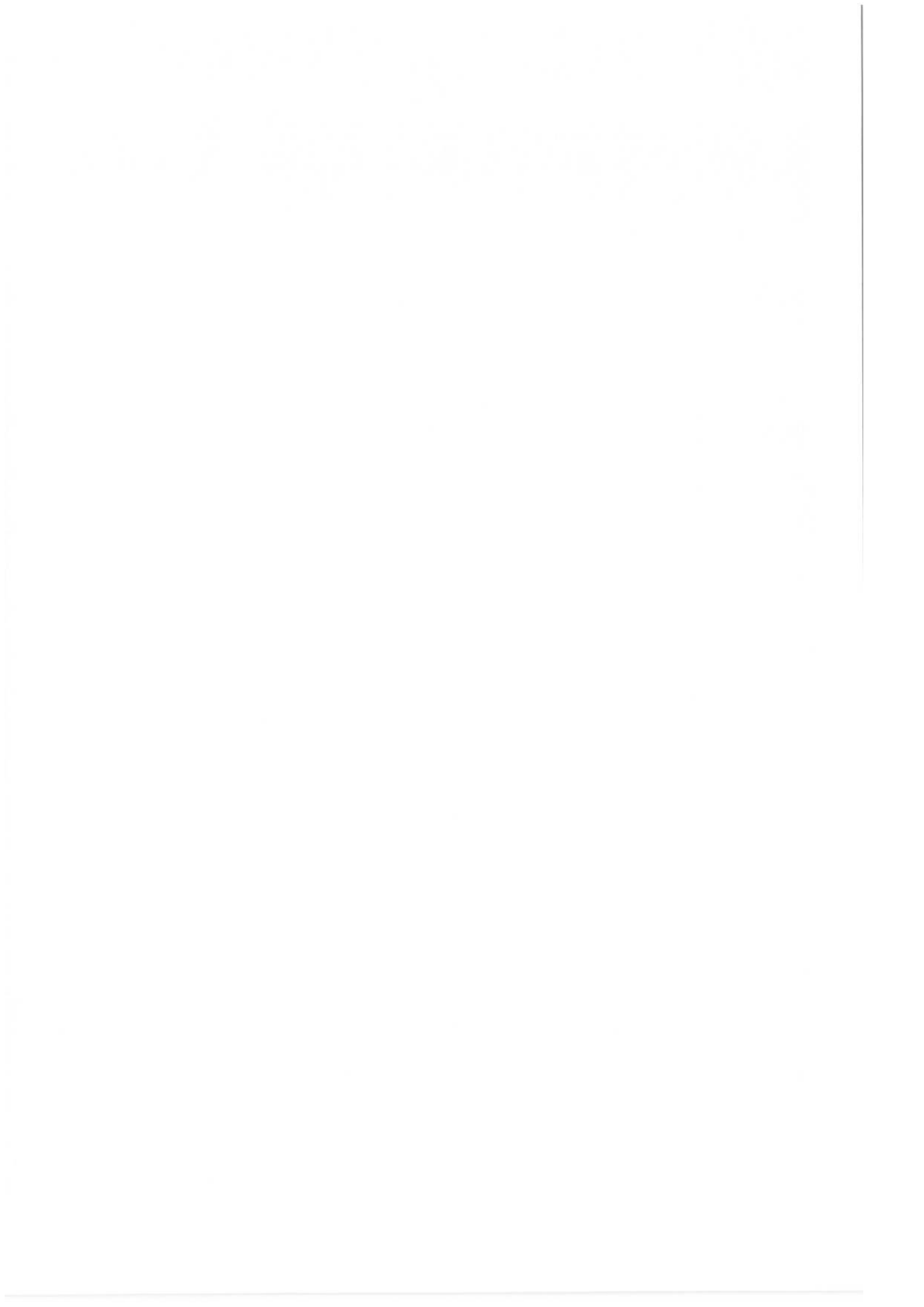




Tabela A17 – Viagens selecionadas do subcaso 6.1

Função objetivo:		R\$ 159.129.750,00													
Origem 1	Destino 1	Destino 2	Origem 2	Destino 3	Destino 4	Classe	Produto 1	Produto 2	x1 (*1000 m <sup>2</sup> )	x2 (*1000 m <sup>2</sup> )	x3 (*1000 m <sup>2</sup> )	x4 (*1000 m <sup>2</sup> )	NVR	Custo (*1000 reais)	
1,2	J,7	-	-	-	-	K,2	P,7	-	90,12	-	-	-	-	12	270,93
1,2	J,8	-	-	-	-	K,2	P,7	-	1579,25	-	-	-	-	61	132,00
1,3	J,7	-	-	-	-	K,2	P,6	-	52,00	-	-	-	-	2	138,40
1,3	J,7	-	-	-	-	K,3	P,6	-	1710,00	-	-	-	-	38	214,59
1,4	J,6	-	-	-	-	K,2	P,3	-	103,87	-	-	-	-	13	176,00
1,4	J,7	-	-	-	-	K,2	P,4	-	26,00	-	-	-	-	1	177,57
1,4	J,8	-	-	-	-	K,3	P,3	-	45,00	-	-	-	-	1	607,98
1,4	J,8	-	-	-	-	K,4	P,3	-	80,00	-	-	-	-	1	887,70
1,4	J,15	-	-	-	-	K,2	P,3	-	9,37	-	-	-	-	1	188,15
1,4	J,16	-	-	-	-	K,2	P,4	-	27,18	-	-	-	-	2	161,64
1,4	J,16	-	-	-	-	K,4	P,4	-	656,00	-	-	-	-	8	421,21
1,4	J,18	-	-	-	-	K,2	P,5	-	107,46	-	-	-	-	18	274,77
1,5	J,1	-	-	-	-	K,1	P,1	-	90,10	-	-	-	-	17	118,09
1,5	J,6	-	-	-	-	K,2	P,1	-	194,94	-	-	-	-	13	155,85
1,5	J,8	-	-	-	-	K,4	P,1	-	710,69	-	-	-	-	9	436,72
1,5	J,9	-	-	-	-	K,2	P,1	-	291,47	-	-	-	-	69	125,15
1,5	J,9	-	-	-	-	K,2	P,2	-	237,12	-	-	-	-	52	125,18
1,5	J,10	-	-	-	-	K,2	P,1	-	166,80	-	-	-	-	74	86,73
1,5	J,10	-	-	-	-	K,2	P,2	-	319,01	-	-	-	-	73	86,88
1,7	J,1	-	-	-	-	K,1	P,1	-	139,23	-	-	-	-	27	107,78
1,7	J,1	-	-	-	-	K,1	P,3	-	29,40	-	-	-	-	12	95,79
1,7	J,15	-	-	-	-	K,2	P,2	-	107,57	-	-	-	-	31	92,04
1,7	J,18	-	-	-	-	K,2	P,5	-	59,70	-	-	-	-	10	204,52
1,11	J,16	-	-	-	-	K,2	P,4	-	280,28	-	-	-	-	11	105,99
1,11	J,17	-	-	-	-	K,2	P,5	-	17,90	-	-	-	-	1	184,93
1,12	J,16	-	-	-	-	K,4	P,4	-	570,78	-	-	-	-	7	382,47
1,13	J,4	-	-	-	-	K,2	P,2	-	158,94	-	-	-	-	20	110,49
1,13	J,14	-	-	-	-	K,2	P,2	-	118,02	-	-	-	-	5	92,49
1,13	J,17	-	-	-	-	K,1	P,1	-	10,00	-	-	-	-	1	109,25
1,13	J,17	-	-	-	-	K,2	P,1	-	600,78	-	-	-	-	51	117,15
1,13	J,17	-	-	-	-	K,2	P,5	-	37,07	-	-	-	-	3	143,71
1,13	J,18	-	-	-	-	K,2	P,5	-	131,34	-	-	-	-	22	289,70
1,14	J,16	-	-	-	-	K,2	P,4	-	28,82	-	-	-	-	2	117,57
1,14	J,16	-	-	-	-	K,3	P,4	-	45,00	-	-	-	-	1	190,93
1,14	J,16	-	-	-	-	K,4	P,4	-	410,00	-	-	-	-	5	327,65
1,14	J,17	-	-	-	-	K,2	P,1	-	82,46	-	-	-	-	7	104,49
1,14	J,17	-	-	-	-	K,4	P,1	-	2,55	-	-	-	-	1	193,26
1,3	J,4	J,14	I,13	J,10	J,9	K,2	P,6	P,3	63,68	606,14	251,37	146,51	49	358,69	
1,5	J,4	J,14	I,13	J,10	J,9	K,2	P,2	P,3	16,42	0,00	10,26	5,98	2	397,89	
1,3	J,4	J,14	I,13	J,15	J,5	K,2	P,6	P,3	0,00	0,00	252,99	115,02	27	347,97	
1,13	J,5	J,9	I,8	J,15	J,4	K,2	P,3	P,2	4,26	2,99	3,47	0,00	1	448,55	
1,3	J,4	J,14	I,11	J,15	J,5	K,2	P,6	P,3	0,00	78,00	26,24	12,78	3	363,24	
1,3	J,4	J,14	I,11	J,6	J,5	K,2	P,6	P,3	17,00	0,00	0,20	2,64	1	364,19	
1,4	J,5	J,9	I,3	J,7	J,14	K,1	P,3	P,6	29,82	20,93	52,21	70,00	7	368,75	
1,3	J,14	J,4	I,13	J,15	J,5	K,2	P,6	P,3	26,00	0,00	9,37	4,26	1	359,22	
1,13	J,1	J,5	I,3	J,7	J,14	K,1	P,3	P,6	2,45	4,26	10,00	0,00	1	324,01	
1,11	J,5	J,18	I,8	J,15	J,4	K,2	P,5	P,2	72,31	41,79	24,00	0,00	7	486,81	
1,4	J,1	J,10	I,3	J,7	J,14	K,1	P,3	P,6	51,45	107,73	210,00	210,00	21	318,15	
1,3	J,4	J,14	I,13	J,5	J,15	K,2	P,6	P,3	0,00	0,00	4,26	9,37	1	372,24	
1,4	J,15	J,10	I,3	J,7	J,14	K,1	P,3	P,6	9,37	5,13	10,00	0,00	1	331,76	
1,3	J,4	J,14	I,11	J,10	J,18	K,2	P,6	P,5	0,00	0,00	30,96	11,94	2	444,49	
1,4	J,1	J,5	I,3	J,7	J,14	K,1	P,3	P,6	4,90	8,52	20,00	0,00	2	342,94	
1,5	J,4	J,14	I,13	J,6	J,10	K,2	P,2	P,1	8,21	1,84	16,21	0,00	1	388,10	
1,4	J,15	J,1	I,3	J,7	J,14	K,1	P,3	P,6	65,59	15,53	70,00	0,00	7	319,32	
1,11	J,18	J,5	I,8	J,10	J,4	K,2	P,5	P,2	5,97	2,35	0,00	0,00	1	513,32	
1,14	J,5	J,9	I,8	J,7	J,16	K,2	P,3	P,4	4,26	2,99	26,00	17,13	1	543,46	
1,4	J,5	J,9	I,8	J,7	J,16	K,2	P,3	P,4	29,82	20,93	182,00	182,00	7	541,19	
1,8	J,7	J,16	I,4	J,10	J,9	K,2	P,4	P,3	26,00	26,00	1,03	2,99	1	541,55	
1,3	J,4	J,14	I,11	J,5	J,8	K,2	P,6	P,3	0,00	26,00	4,26	19,51	1	495,08	
1,8	J,10	J,15	I,4	J,18	J,9	K,2	P,2	P,5	0,00	3,47	2,53	14,34	1	496,54	
1,4	J,1	J,15	I,3	J,7	J,14	K,1	P,3	P,6	2,45	9,37	10,00	0,00	1	327,51	
1,11	J,5	J,9	I,7	J,4	J,14	K,1	P,3	P,2	4,26	2,37	6,50	0,00	1	374,85	
1,5	J,4	J,14	I,11	J,18	J,8	K,2	P,2	P,5	41,05	0,00	29,85	108,78	5	580,37	
1,11	J,5	J,18	I,8	J,7	J,16	K,2	P,5	P,4	30,99	17,91	78,00	78,00	3	578,37	



Tabela A18 – Viagens selecionadas do subcaso 6.2

Função objetivo:				R\$ 162.647.260,00										
Origem 1	Destino 1	Destino 2	Origem 2	Destino 3	Destino 4	Classe	Produto 1	Produto 2	x1 (*1000 m <sup>2</sup> )	x2 (*1000 m <sup>2</sup> )	x3 (*1000 m <sup>2</sup> )	x4 (*1000 m <sup>2</sup> )	NVR	Custo (*1000 reais)
I 5	J 1	-	-	-	-	K 1	P 1	-	100,70	-	-	-	19	118,09
I 7	J 1	-	-	-	-	K 1	P 1	-	128,63	-	-	-	25	107,78
I 5	J 9	-	-	-	-	K 1	P 1	-	270,72	-	-	-	64	119,34
I 5	J 6	-	-	-	-	K 2	P 1	-	210,73	-	-	-	13	155,85
I 7	J 6	-	-	-	-	K 2	P 1	-	0,42	-	-	-	1	118,75
I 5	J 10	-	-	-	-	K 2	P 1	-	166,80	-	-	-	74	86,73
I 13	J 17	-	-	-	-	K 2	P 1	-	600,78	-	-	-	51	117,15
I 14	J 17	-	-	-	-	K 2	P 1	-	95,01	-	-	-	9	104,49
I 5	J 8	-	-	-	-	K 4	P 1	-	640,00	-	-	-	8	436,72
I 13	J 4	-	-	-	-	K 2	P 2	-	172,96	-	-	-	22	110,49
I 5	J 9	-	-	-	-	K 2	P 2	-	232,56	-	-	-	51	125,18
I 5	J 10	-	-	-	-	K 2	P 2	-	319,74	-	-	-	73	86,88
I 13	J 14	-	-	-	-	K 2	P 2	-	104,00	-	-	-	4	92,49
I 7	J 15	-	-	-	-	K 2	P 2	-	114,07	-	-	-	33	92,04
I 7	J 1	-	-	-	-	K 1	P 3	-	30,29	-	-	-	13	95,79
I 13	J 1	-	-	-	-	K 1	P 3	-	34,24	-	-	-	14	157,27
I 7	J 6	-	-	-	-	K 1	P 3	-	0,20	-	-	-	1	110,00
I 4	J 5	-	-	-	-	K 2	P 3	-	59,64	-	-	-	14	228,39
I 14	J 5	-	-	-	-	K 2	P 3	-	0,98	-	-	-	1	223,77
I 4	J 6	-	-	-	-	K 2	P 3	-	103,87	-	-	-	13	176,00
I 4	J 10	-	-	-	-	K 2	P 3	-	56,43	-	-	-	11	199,33
I 4	J 8	-	-	-	-	K 4	P 3	-	144,51	-	-	-	2	887,70
I 4	J 16	-	-	-	-	K 2	P 4	-	0,00	-	-	-	2	161,64
I 11	J 16	-	-	-	-	K 2	P 4	-	280,28	-	-	-	11	105,99
I 4	J 16	-	-	-	-	K 4	P 4	-	709,18	-	-	-	9	421,21
I 12	J 16	-	-	-	-	K 4	P 4	-	570,78	-	-	-	7	382,47
I 14	J 16	-	-	-	-	K 4	P 4	-	483,82	-	-	-	6	327,65
I 11	J 17	-	-	-	-	K 2	P 5	-	54,97	-	-	-	4	184,93
I 4	J 18	-	-	-	-	K 2	P 5	-	107,46	-	-	-	18	274,77
I 7	J 18	-	-	-	-	K 2	P 5	-	59,70	-	-	-	10	204,52
I 13	J 18	-	-	-	-	K 2	P 5	-	127,90	-	-	-	22	269,70
I 3	J 7	-	-	-	-	K 3	P 6	-	1980,00	-	-	-	44	214,59
I 2	J 7	-	-	-	-	K 2	P 7	-	90,12	-	-	-	12	270,93
I 2	J 8	-	-	-	-	K 2	P 7	-	1579,25	-	-	-	81	132,00
I 3	J 4	J 14	I 13	J 10	J 9	K 2	P 6	P 3	0,00	794,14	288,31	166,82	57	356,69
I 5	J 4	J 14	I 13	J 10	J 9	K 2	P 2	P 3	1,46	0,00	5,13	2,99	1	397,89
I 3	J 4	J 14	I 13	J 15	J 5	K 2	P 6	P 3	0,00	0,00	224,07	102,24	24	347,97
I 3	J 4	J 14	I 11	J 15	J 5	K 2	P 6	P 3	80,68	130,00	45,79	18,70	5	363,24
I 13	J 5	J 18	I 8	J 15	J 4	K 2	P 5	P 2	23,34	17,91	10,41	0,00	3	456,49
I 14	J 5	J 9	I 8	J 10	J 4	K 2	P 3	P 2	4,26	2,99	0,20	0,00	1	474,82
I 11	J 5	J 18	I 8	J 15	J 4	K 2	P 5	P 2	51,65	29,85	17,35	0,00	5	486,81
I 3	J 4	J 14	I 13	J 8	J 9	K 2	P 6	P 1	0,00	0,00	52,00	8,46	2	463,21
I 4	J 1	J 10	I 3	J 7	J 14	K 1	P 3	P 6	9,80	20,52	40,00	40,00	4	318,15
I 5	J 4	J 14	I 13	J 8	J 9	K 2	P 2	P 1	16,42	0,00	18,69	8,06	2	502,41
I 11	J 10	J 9	I 8	J 7	J 16	K 2	P 3	P 4	5,13	2,99	26,00	26,00	1	529,72
I 3	J 4	J 14	I 11	J 10	J 18	K 2	P 6	P 5	0,00	52,00	30,96	11,94	2	444,49
I 4	J 15	J 1	I 3	J 7	J 14	K 1	P 3	P 6	121,81	31,85	114,21	0,00	13	319,32
I 4	J 5	J 9	I 8	J 7	J 16	K 2	P 3	P 4	42,80	29,90	260,00	225,13	10	541,19
I 13	J 10	J 9	I 8	J 7	J 16	K 2	P 1	P 4	0,00	4,23	26,00	0,00	1	527,56
I 8	J 10	J 15	I 4	J 18	J 9	K 2	P 2	P 5	0,00	2,98	5,97	14,34	1	496,54
I 11	J 5	J 18	I 3	J 7	J 14	K 1	P 5	P 6	10,00	5,97	10,00	0,00	1	404,98
I 5	J 4	J 14	I 11	J 18	J 8	K 2	P 2	P 5	41,05	12,22	29,85	106,78	5	580,37
I 11	J 5	J 18	I 8	J 7	J 16	K 2	P 5	P 4	20,66	11,94	52,00	0,00	2	578,37

Tabela A19 – Viagens selecionadas do subcaso 6.3

Função objetivo:		R\$ 161.130.390,00												
Origem 1	Destino 1	Destino 2	Origem 2	Destino 3	Destino 4	Classe	Produto 1	Produto 2	x1 (*1000 m <sup>2</sup> )	x2 (*1000 m <sup>2</sup> )	x3 (*1000 m <sup>2</sup> )	x4 (*1000 m <sup>2</sup> )	NVR	Custo (*1000 reais)
I 2	J 7	-	-	-	-	K 2	P 7	-	90,12	-	-	-	12	270,93
I 2	J 8	-	-	-	-	K 2	P 7	-	1579,25	-	-	-	61	132,00
I 3	J 7	-	-	-	-	K 2	P 6	-	26,00	-	-	-	1	138,40
I 3	J 7	-	-	-	-	K 3	P 6	-	2100,19	-	-	-	47	214,59
I 4	J 6	-	-	-	-	K 2	P 3	-	71,91	-	-	-	9	176,00
I 4	J 7	-	-	-	-	K 2	P 4	-	52,00	-	-	-	2	177,57
I 4	J 8	-	-	-	-	K 4	P 3	-	144,51	-	-	-	2	887,70
I 4	J 8	-	-	-	-	K 4	P 5	-	80,00	-	-	-	1	985,13
I 4	J 15	-	-	-	-	K 2	P 3	-	196,77	-	-	-	21	188,15
I 4	J 16	-	-	-	-	K 2	P 4	-	1,18	-	-	-	1	161,64
I 4	J 16	-	-	-	-	K 4	P 4	-	656,00	-	-	-	8	421,21
I 5	J 1	-	-	-	-	K 1	P 1	-	21,20	-	-	-	4	118,09
I 5	J 8	-	-	-	-	K 4	P 1	-	630,89	-	-	-	8	436,72
I 5	J 9	-	-	-	-	K 2	P 1	-	281,88	-	-	-	62	125,15
I 5	J 9	-	-	-	-	K 2	P 2	-	218,88	-	-	-	48	125,18
I 5	J 10	-	-	-	-	K 2	P 1	-	157,32	-	-	-	66	86,73
I 5	J 10	-	-	-	-	K 2	P 2	-	301,53	-	-	-	69	86,88
I 7	J 1	-	-	-	-	K 1	P 1	-	137,80	-	-	-	26	107,78
I 7	J 1	-	-	-	-	K 1	P 3	-	29,40	-	-	-	12	95,79
I 7	J 14	-	-	-	-	K 3	P 2	-	27,32	-	-	-	1	250,60
I 7	J 15	-	-	-	-	K 2	P 2	-	86,75	-	-	-	25	92,04
I 7	J 18	-	-	-	-	K 1	P 5	-	5,97	-	-	-	1	182,04
I 7	J 18	-	-	-	-	K 2	P 5	-	53,73	-	-	-	9	204,52
I 8	J 7	-	-	-	-	K 3	P 4	-	315,00	-	-	-	7	453,33
I 8	J 16	-	-	-	-	K 4	P 4	-	300,13	-	-	-	4	786,88
I 11	J 5	-	-	-	-	K 1	P 5	-	10,00	-	-	-	1	245,08
I 11	J 16	-	-	-	-	K 2	P 4	-	280,28	-	-	-	11	155,99
I 11	J 17	-	-	-	-	K 1	P 5	-	10,00	-	-	-	1	145,31
I 11	J 17	-	-	-	-	K 2	P 5	-	35,80	-	-	-	2	184,93
I 11	J 18	-	-	-	-	K 2	P 5	-	268,65	-	-	-	45	285,10
I 12	J 16	-	-	-	-	K 4	P 4	-	570,78	-	-	-	7	362,47
I 13	J 1	-	-	-	-	K 1	P 3	-	69,91	-	-	-	29	157,27
I 13	J 4	-	-	-	-	K 2	P 2	-	180,62	-	-	-	22	110,49
I 13	J 6	-	-	-	-	K 2	P 1	-	97,28	-	-	-	6	171,04
I 13	J 14	-	-	-	-	K 2	P 2	-	22,42	-	-	-	1	92,49
I 13	J 15	-	-	-	-	K 2	P 3	-	149,49	-	-	-	16	170,32
I 13	J 17	-	-	-	-	K 1	P 5	-	9,17	-	-	-	1	121,71
I 13	J 17	-	-	-	-	K 2	P 1	-	506,54	-	-	-	43	117,15
I 13	J 18	-	-	-	-	K 2	P 5	-	5,97	-	-	-	1	289,70
I 14	J 1	-	-	-	-	K 1	P 1	-	5,30	-	-	-	1	158,33
I 14	J 8	-	-	-	-	K 4	P 1	-	80,00	-	-	-	1	655,86
I 14	J 16	-	-	-	-	K 2	P 4	-	52,00	-	-	-	2	117,57
I 14	J 16	-	-	-	-	K 3	P 4	-	45,00	-	-	-	1	190,93
I 14	J 16	-	-	-	-	K 4	P 4	-	386,82	-	-	-	5	327,65
I 5	J 15	J 14	I 4	J 10	J 9	K 2	P 2	P 3	45,60	47,18	123,12	71,76	24	372,73
I 3	J 4	J 14	I 13	J 5	J 9	K 2	P 6	P 3	0,00	432,52	83,72	65,16	22	348,13
I 8	J 4	J 14	I 13	J 5	J 9	K 2	P 2	P 3	4,10	21,90	4,26	2,99	1	440,41
I 11	J 5	J 9	I 8	J 4	J 14	K 2	P 3	P 2	4,26	2,99	4,10	0,84	1	455,70
I 3	J 14	J 4	I 13	J 5	J 10	K 2	P 6	P 3	530,82	61,68	115,02	134,41	27	330,70
I 13	J 5	J 10	I 3	J 14	J 4	K 2	P 3	P 6	4,26	5,13	19,86	0,00	1	330,86
I 5	J 10	J 17	I 13	J 15	J 9	K 2	P 1	P 2	0,36	11,78	3,47	4,56	1	359,50
I 11	J 6	J 15	I 3	J 4	J 14	K 2	P 3	P 6	23,97	26,11	19,02	33,14	3	322,09
I 3	J 4	J 14	I 11	J 6	J 15	K 2	P 6	P 3	0,00	0,00	0,54	9,37	1	322,70
I 13	J 15	J 9	I 5	J 10	J 17	K 2	P 2	P 1	3,47	4,56	2,28	11,78	1	359,62
I 3	J 4	J 14	I 13	J 5	J 18	K 2	P 6	P 5	0,00	0,00	95,65	56,70	10	379,34
I 5	J 10	J 17	I 4	J 18	J 9	K 2	P 1	P 5	2,28	9,01	0,00	14,34	1	433,75
I 3	J 7	J 4	I 13	J 5	J 10	K 1	P 6	P 3	9,01	0,00	2,84	5,13	1	320,44
I 5	J 1	J 17	I 13	J 10	J 9	K 1	P 1	P 3	65,03	144,90	107,73	62,79	21	357,77
I 3	J 7	J 4	I 14	J 1	J 5	K 1	P 6	P 3	9,01	0,00	2,45	4,23	1	334,19
I 5	J 15	J 4	I 14	J 17	J 9	K 2	P 2	P 1	2,05	8,21	11,78	4,23	1	408,89
I 5	J 15	J 14	I 4	J 18	J 8	K 2	P 2	P 5	0,00	0,00	0,73	2,58	1	530,14
I 4	J 1	J 15	I 7	J 10	J 14	K 1	P 3	P 2	2,07	7,93	0,00	0,00	1	345,32
I 4	J 6	J 1	I 7	J 10	J 14	K 1	P 3	P 2	7,65	2,35	0,00	0,00	1	348,36
I 5	J 9	J 6	I 11	J 10	J 18	K 2	P 1	P 5	8,46	32,42	30,98	11,94	2	484,08
I 4	J 18	J 8	I 5	J 10	J 6	K 2	P 5	P 1	1,80	24,20	2,28	16,21	1	510,12
I 5	J 10	J 6	I 13	J 15	J 9	K 2	P 1	P 2	2,28	16,21	3,47	4,56	1	395,57
I 13	J 4	J 10	I 5	J 9	J 6	K 2	P 2	P 1	24,63	12,62	12,89	32,84	3	402,88
I 5	J 9	J 6	I 13	J 4	J 10	K 2	P 1	P 2	4,23	16,21	8,21	4,37	1	403,00

Tabela A20 – Viagens selecionadas do subcaso 6.4

Função objetivo:		R\$ 161.851.770,00						x1	x2	x3	x4	NVR	Custo	
Origem 1	Destino 1	Destino 2	Origem 2	Destino 3	Destino 4	Classe	Produto 1	Produto 2	(*1000 m³)	(*1000 m³)	(*1000 m³)	(*1000 m³)	(*1000 reais)	
1.5	J.1	-	-	-	-	K.1	P.1	-	86,23	-	-	-	17	118,09
1.7	J.1	-	-	-	-	K.1	P.1	-	132,50	-	-	-	25	107,78
1.14	J.1	-	-	-	-	K.1	P.1	-	5,30	-	-	-	1	158,33
1.5	J.9	-	-	-	-	K.1	P.1	-	236,88	-	-	-	56	119,34
1.7	J.6	-	-	-	-	K.2	P.1	-	7,33	-	-	-	1	118,75
1.5	J.10	-	-	-	-	K.2	P.1	-	157,32	-	-	-	69	86,73
1.13	J.17	-	-	-	-	K.2	P.1	-	600,78	-	-	-	51	117,15
1.14	J.17	-	-	-	-	K.2	P.1	-	47,12	-	-	-	4	104,49
1.5	J.8	-	-	-	-	K.4	P.1	-	710,69	-	-	-	9	436,72
1.13	J.4	-	-	-	-	K.2	P.2	-	114,94	-	-	-	14	110,49
1.5	J.9	-	-	-	-	K.2	P.2	-	223,44	-	-	-	49	125,18
1.5	J.10	-	-	-	-	K.2	P.2	-	271,05	-	-	-	62	86,88
1.13	J.14	-	-	-	-	K.2	P.2	-	24,87	-	-	-	1	92,49
1.7	J.15	-	-	-	-	K.2	P.2	-	44,98	-	-	-	13	92,04
1.7	J.1	-	-	-	-	K.1	P.3	-	26,62	-	-	-	11	95,79
1.13	J.1	-	-	-	-	K.1	P.3	-	61,50	-	-	-	25	167,27
1.4	J.6	-	-	-	-	K.2	P.3	-	47,94	-	-	-	6	176,00
1.4	J.10	-	-	-	-	K.2	P.3	-	5,13	-	-	-	1	199,33
1.13	J.15	-	-	-	-	K.2	P.3	-	337,68	-	-	-	36	170,32
1.4	J.8	-	-	-	-	K.4	P.3	-	144,51	-	-	-	2	887,70
1.8	J.7	-	-	-	-	K.2	P.4	-	26,00	-	-	-	1	286,88
1.4	J.16	-	-	-	-	K.2	P.4	-	78,00	-	-	-	3	161,64
1.11	J.16	-	-	-	-	K.2	P.4	-	280,28	-	-	-	11	105,99
1.8	J.7	-	-	-	-	K.3	P.4	-	450,00	-	-	-	10	453,33
1.4	J.16	-	-	-	-	K.4	P.4	-	631,18	-	-	-	8	421,21
1.8	J.16	-	-	-	-	K.4	P.4	-	139,13	-	-	-	2	786,88
1.12	J.16	-	-	-	-	K.4	P.4	-	570,78	-	-	-	7	382,47
1.14	J.16	-	-	-	-	K.4	P.4	-	483,82	-	-	-	6	327,65
1.13	J.17	-	-	-	-	K.1	P.5	-	1,27	-	-	-	1	121,71
1.7	J.18	-	-	-	-	K.1	P.5	-	5,67	-	-	-	1	192,04
1.11	J.17	-	-	-	-	K.2	P.5	-	53,70	-	-	-	3	184,93
1.7	J.18	-	-	-	-	K.2	P.5	-	53,73	-	-	-	9	204,52
1.7	J.18	-	-	-	-	K.2	P.5	-	268,65	-	-	-	45	285,10
1.11	J.18	-	-	-	-	K.2	P.5	-	58,38	-	-	-	1	985,13
1.4	J.8	-	-	-	-	K.4	P.6	-	28,00	-	-	-	1	138,40
1.3	J.7	-	-	-	-	K.2	P.6	-	2070,00	-	-	-	46	214,59
1.3	J.7	-	-	-	-	K.3	P.6	-	90,12	-	-	-	12	270,93
1.2	J.7	-	-	-	-	K.2	P.7	-	1579,25	-	-	-	61	132,00
1.2	J.8	-	-	-	-	K.2	P.7	-	85,50	8,42	230,85	134,55	45	372,73
1.5	J.15	J.14	1.4	J.10	J.9	K.2	P.2	P.3	0,00	229,74	87,84	62,79	21	348,13
1.3	J.4	J.14	1.13	J.5	J.9	K.2	P.6	P.3	8,20	22,74	8,52	5,88	2	440,41
1.8	J.4	J.14	1.13	J.5	J.9	K.2	P.2	P.3	9,01	0,00	5,30	2,28	1	283,39
1.3	J.7	J.4	1.14	J.1	J.10	K.1	P.6	P.1	461,50	74,34	108,50	128,25	25	330,70
1.3	J.14	J.4	1.13	J.5	J.10	K.2	P.6	P.3	2,28	11,78	2,23	4,56	1	359,50
1.5	J.10	J.17	1.13	J.15	J.9	K.2	P.1	P.2	9,55	18,74	0,00	39,32	2	322,69
1.11	J.6	J.15	1.3	J.4	J.14	K.2	P.3	P.6	6,34	0,00	7,99	9,57	1	322,70
1.3	J.4	J.14	1.11	J.6	J.15	K.2	P.6	P.3	0,00	196,60	103,30	59,70	10	379,34
1.4	J.18	J.9	1.5	J.10	J.17	K.2	P.5	P.1	5,97	14,34	2,28	11,78	1	433,88
1.11	J.6	J.5	1.3	J.14	J.4	K.2	P.3	P.6	7,99	4,26	19,66	0,00	1	362,57
1.3	J.7	J.4	1.13	J.10	J.5	K.1	P.6	P.3	18,02	0,00	10,26	8,52	2	320,46
1.11	J.10	J.5	1.3	J.7	J.4	K.1	P.3	P.6	1,03	4,26	3,16	0,00	1	333,07
1.3	J.7	J.4	1.14	J.1	J.5	K.1	P.6	P.3	9,01	0,00	2,45	4,26	1	334,19
1.3	J.14	J.4	1.13	J.5	J.18	K.2	P.6	P.5	19,66	0,00	2,35	0,84	1	392,52
1.5	J.15	J.4	1.14	J.17	J.9	K.2	P.2	P.1	6,94	16,42	23,56	8,46	2	408,89
1.3	J.7	J.4	1.11	J.9	J.5	K.1	P.6	P.3	9,01	0,00	2,37	4,26	1	384,23
1.5	J.15	J.4	1.11	J.10	J.18	K.2	P.2	P.5	3,47	8,21	17,90	5,97	1	457,49
1.7	J.15	J.5	1.3	J.14	J.4	K.2	P.3	P.6	2,09	0,00	19,66	0,00	1	334,18
1.5	J.10	J.17	1.4	J.8	J.18	K.2	P.1	P.5	2,28	0,77	24,20	0,00	1	506,56
1.4	J.1	J.15	1.7	J.10	J.14	K.1	P.3	P.2	2,07	7,93	0,91	9,09	1	345,32
1.7	J.10	J.14	1.4	J.1	J.15	K.1	P.2	P.3	0,00	9,09	2,07	7,93	1	345,43
1.4	J.6	J.1	1.7	J.10	J.14	K.1	P.3	P.2	30,60	9,40	3,64	36,36	4	348,36
1.4	J.15	J.1	1.7	J.10	J.14	K.1	P.3	P.2	7,93	2,07	0,91	9,09	1	348,02
1.5	J.9	J.6	1.11	J.10	J.18	K.2	P.1	P.5	4,23	16,21	13,06	5,97	1	484,06
1.5	J.10	J.6	1.4	J.18	J.8	K.2	P.1	P.5	0,36	16,21	1,69	24,20	1	509,62
1.13	J.15	J.9	1.5	J.10	J.6	K.2	P.2	P.1	0,00	4,56	0,00	9,30	1	395,70
1.13	J.4	J.10	1.5	J.9	J.6	K.2	P.2	P.1	82,10	43,70	41,90	162,10	10	402,88

## LISTA DE REFERÊNCIAS

- APPELGREN, L. H. A Column Generation Algorithm for a Ship Scheduling Problem. *Transportation Science*, v.3, p.53-68, 1969.
- BAUSCH, D. O.; BROWN, G. G.; RONEN, D. Scheduling short-term marine transport of bulk products. *Maritime Policy Management*, n.25, p.335-348, 1998.
- BREMER, W. M.; PERAKIS, A. N. An operational tanker scheduling optimization system: model implementation, results and possible extensions. *Maritime Policy and Management*, n.19, p.189-199, 1992.
- BROWN, G. G.; GOODMAN, C. E.; WOOD, R. K. Annual scheduling of Atlantic fleet naval combatants. *Operations Research*, n.38, p.249-259, 1990.
- BROWN, G. G.; GRAVES, W.; RONEN, D. Scheduling ocean transportation of crude oil. *Management Science*, v.33, n.3, p.335-346, 1987.
- CHRISTIANSEN, M. Decomposition of a Combined Inventory and Time Constrained Ship Routing Problem. *Transportation Science*, v.33, n.1, p.3-16, fev. 1999.
- CHRISTIANSEN, M.; FAGERHOLT, K. Robust Ship Scheduling with Multiple Time Windows. *Naval Research Logistics*, n.49, p.611-625, 2002.
- CHRISTIANSEN, M.; NYGREEN, B. A method for solving ship routing problems with inventory constraints. *Annals of Operations Research*, n.81, p.357-378, 1998.
- EVERETT, J. L. et al. Optimization of a Fleet of Large Tankers and Bulkers: A Linear Programming Approach. *Marine Technology*, p. 430-438, out. 1972.
- FAGERHOLT, K. A simulation study on the design of flexible cargo holds in small-sized bulk ships. *Maritime Policy and Management*, n.26, p. 105-109, 1999a.
- FAGERHOLT, K. Evaluating the trade-off between the level of customer service and transportation costs in a ship scheduling problem”, *Maritime Policy and Management* 27(2), 145-153, 2000.
- FAGERHOLT, K. Optimal fleet design in a ship routing problem. *International Transactions in Operational Research*, n.6, p.453-464, 1999b.
- FAGERHOLT, K.; CHRISTIANSEN, M. A combined ship scheduling and allocation problem. *Journal of the Operational Research Society*, n.51, p.834-842, 2000a.
- FAGERHOLT, K.; CHRISTIANSEN, M. A traveling salesman problem with allocation, time window and precedence constraints – an application to ship scheduling. *International Transactions in Operational Research*, v.7, p.231-244, 2000b.
- FISHER, M. L.; ROSENWEIN, M. B. An Interactive Optimization System for Bulk-Cargo Ship Scheduling. *Naval Research Logistics*, v.36, p.27-42, 1989.

GENERIC ALGEBRIC MODELLING SYSTEM (GAMS), version 2.0.13.0. [S.I]: GAMS Development Corporation, 2001.

GEOFFRION, A. M. Forces, trends and opportunities in MS/OR. *Operations Research*, v.40, p.423-445, 1992.

GOLDEN, B. et al. The fleet size and mix vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, v.11, n.1, p.49-66, 1984.

IAKOVOU, E. et al. A maritime global route planning model for hazardous materials transportation. *Transportation Science*, v.33, p.34-48, 1999.

MALANDRAKI, C.; DASKIN, M. S. Time Dependent Vehicle Routing Problems: Formulations, Properties and Heuristic Algorithms. *Transportation Science*, v.26, n.3, p.185-200, 1992.

MICROSOFT EXCEL 2000. [S.I.]: Microsoft Corporation, 1999.

NIRO, V. N. **Programação da Cabotagem de Produtos Claros na Costa Brasileira**. São Paulo: Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2002. (Trabalho de Iniciação Científica, Bolsa da ANP – Agência Nacional de Petróleo).

NISHIDA, D.; SCHWARZ, M.; YOSHIOKA, R. J. **Planejamento do Transporte de Produtos Derivados do Petróleo por Cabotagem**. São Paulo: Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2002. (Trabalho de Formatura, PNV-537).

ONO, R. T. **Estudo de Viabilidade do Transporte Marítimo de Contêineres por Cabotagem na Costa Brasileira**. 2001. 132p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001.

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.

PERAKIS, A. N.; BREMER, W. M. An operational tanker scheduling optimization system: background, current practice and model formulation. *Maritime Policy and Management*, v.19, p.177-187, 1992.

PERAKIS, A. N.; JARAMILLO, D. I. Fleet deployment optimization for liner shipping Part 1. Background, problem formulation and solution approaches. *Maritime Policy and Management*, v.18, n.3, p.183-200, 1991.

RONEN, D. Ship scheduling: the last decade. *European Journal of Operational Research*, v.71, p.325-333, 1993.

RONEN, D. Short term scheduling of vessels for shipping bulk or semi-bulk commodities originating in a single area. *Operations Research*, v.34, n.1, p.164-173, 1986.

SALHI, S.; RAND, G. K. Incorporating vehicle routing into the vehicle fleet composition problem. *European Journal of Operational Research*, v.66, p.313-330, 1993.

SHERALI, H. D.; AL-YAKOUB, S. M.; HASSAN, M. M. Fleet management models and algorithms for an oil-tanker routing and scheduling problem. *IIE Transactions*, v.31, p.395-406, 1999.

STRINGHER, F. G. **Designação de rotas para frota dedicada em uma rede de distribuição de linha branca.** 2004. 90p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.

TACLA, D. **Estudo de transporte colaborativo de cargas de grande volume, com aplicação em caso de soja e fertilizantes.** 2003. 338p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.

TACLA, D. **Estudo para otimização de rotas no transporte rodoviário de cargas granelizadas na indústria química.** 1999. 129p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.

TAILLARD, É. D. A heuristic column generation method for the heterogeneous fleet VRP". *Recherche opérationnelle*, v.33, n.1, p.1-14, 1999.

TAILLARD, É. et al. A Tabu Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows. *Transportation Science*, v.31, n.2, p.170-186, 1997.

TRANSPETRO. Rio de Janeiro. Dados de terminais marítimos. Disponível em: <<http://www.transpetro.com.br>>. Acesso em: 2004.

TRUDEAU, P.; DROR, M. Stochastic Inventory Routing: Route Design with Stockouts and Route Failures. *Transportation Science*, v.26, p.171-184, 1992.

## GLOSSÁRIO

EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
<i>Demurrage</i>	montante pago, aos proprietários de navios afretados, por atrasos nas operações.
HFO	<i>Heavy Fuel Oil</i> – óleo combustível pesado.
<i>Inventory cost</i>	custo associado à manutenção de estoque em terminais
<i>Liner</i>	serviço de transporte marítimo regular
MDO	<i>Middle Diesel Oil</i> – óleo diesel médio.
OBO	<i>Oil-Bulk-Ore</i> – navios combinados que podem transportar simultaneamente graneis líquidos e graneis sólidos.
<i>Set partitioning problem</i>	problema de partição de conjuntos
<i>Ship scheduling</i>	programação de uma frota de navios a horizontes de tempo mais curtos.
<i>Solver</i>	ferramenta computacional destinada resolver problemas em programação linear.
Tancagem	capacidade de armazenagem de um produto em tanques localizados em terminal marítimo.
<i>What-if</i>	Uso de cenários alternativos para fins de comparação de resultados.