

Proposta de modelo de apoio ao reposicionamento e *leasing* de contêineres em navios

A suggested support model for the replacement and leasing of empty cargo containers in ships

*Líria Baptista de Resende**
*Luciano Augusto Toledo***
*Sidney Maçazzo Caigawa****

Resumo

O presente trabalho examina a logística do contêiner vazio, da perspectiva de uma companhia de navegação que, ao longo dos portos da rota, para atender a seus contratos de exportação, defronta com o desbalanceamento entre a demanda e a oferta de contêineres vazios. Assim, é proposto um modelo matemático de apoio à decisão, quanto ao reposicionamento e *leasing* de contêineres vazios, a fim de que se considerem as restrições do problema, minimizando o custo envolvido. O modelo proposto é implementado via computador, por meio do pacote Sistema Geral de Modelagem Algébrica (General Algebraic Modeling System - GAMS), sendo o modelo provido por dados de uma companhia de navegação. A análise dos resultados de uma série de testes computacionais, com variação nos principais parâmetros, mostra a consistência do modelo.

Palavras-chave: logística; transporte; navegação; contêineres.

Abstract

This paper examines the logistics of the empty container from the shipping company's point of view, which faces an imbalance in the supply and demand of empty containers when trying to meet its contractual obligations. A mathematical model is proposed that allows the company to make optimum decisions to relocate or lease empty containers, solving the problem within its boundaries, and minimizing the costs involved. The mathematical model is implemented by computer using General Algebraic Modeling System - GAMS software; and the data was provided by a shipping company. The analysis of a series of computational tests, with variations in its main parameters, show the consistency of the model.

Key words: logistics; transport; navigation; containers.

* Mestre em Engenharia Naval pela Universidade de São Paulo - USP. Professora do Mackenzie e dos cursos de MBA In Company da Fundação Instituto de Administração - FIA-SP. liria@usp.br

** Mestre em Administração pela Pontifícia Universidade Católica - PUC-SP e doutorando em Marketing da Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade da Universidade de São Paulo - FEA-USP. Professor do Mackenzie e dos cursos de MBA In Company da FIA-SP. lucianot@fia.com.br

*** Mestre em Administração pela FEA-USP. Professor do Mackenzie e dos cursos de MBA In Company da FIA-SP. sidneyc@fia.com.br

Introdução

A adoção do contêiner como acondicionador de cargas teve maior significado a partir de 1956, quando começou a ser utilizado em navios mistos na Costa Oeste dos Estados Unidos da América. Naquela época, já foram percebidas as vantagens da utilização do contêiner, tais como a rapidez de carga e descarga do navio e a facilidade da transferência de um modal de transporte para outro (BARCO, 1998).

Com o decorrer do tempo, os transportadores descobriram outras vantagens: proteção da carga transportada contra roubos, perdas e avarias, diminuindo assim o preço do seguro, simplificação das embalagens, melhor aproveitamento dos espaços dos navios e redução dos fretes em razão do aumento do tamanho médio dos navios e da propulsão, melhora da produtividade das operações portuárias e conseqüente aumento da rotatividade dos navios pela redução de tempo no porto.

O tamanho dos contêineres não era padronizado. Existiam várias dimensões, como: o Container Express Service - Conex, com 8'x 6'x 6', criado pelo exército americano para fins de logística militar; os contêineres de 24'x 8'x 8', utilizados e idealizados pela Matson para o transporte por contêineres para o Haváí; e os de 35'x 8'x 8', utilizados pela companhia de navegação Sealand Inc (SOUZA, 1998). Para facilitar o manuseio e acomodação nos navios, as dimensões dos contêineres foram padronizadas pela International Standard Organization - ISO, em 1968. Os comprimentos padronizados são os de 10, 20, 30 e 40 pés. Os mais utilizados são os de 20 e 40 pés.

O volume relativo de carga geral transportado em contêineres vem crescendo aceleradamente, saltando de 27% em 1990 para mais de 41% em 1996 e para 46% calculados para 1999 (VELASCO e TEIXEIRA, 1998). Como o contêiner é uma embalagem dispendiosa e não-descartável, deve ser considerado o seu remanejamento para sucessivas reutilizações, do que

ocorre a necessidade de um controle de estoque. Assim, pode-se prever o desbalanceamento da distribuição dos contêineres vazios, possibilitando seu envio de um porto de oferta para outro de demanda (ONO, 2001).

Conforme Mendes, Fernandes e Ono (2001), o problema dos contêineres vazios é comum nas empresas de transportes e está relacionado ao desequilíbrio (*imbalance*) entre as quantidades de contêiner que entraram e que saíram, constituindo uma tarefa relevante em virtude dos custos envolvidos, direta ou indiretamente, tais como: espaço, armazenamento, aluguel, etc. Sampaio (2001) classifica o problema de gerenciamento de contêineres vazios (PGCV) como sendo típico de logística reversa, associado à movimentação e à falta de interação entre a distribuição e o transporte dos contêineres cheios e a distribuição e o transporte dessas unidades, quando vazias, para serem reutilizadas.

Como os contêineres estão vazios, todo esse processo de reposicionamento representa custos, sem receitas adicionais da operação. Com isso, a movimentação deve ser efetuada de modo a minimizar custos. A solução é enviar contêiner de um ponto onde há excesso de oferta de contêineres vazios para outro onde há excesso de demanda de contêineres vazios. Isso pode ser conseguido sabendo-se quando e onde haverá a oferta e a demanda de contêineres vazios. No caso de uma empresa de navegação, as informações podem ser obtidas por meio dos itinerários dos navios (*schedules*) e previsões de pedidos de transporte fornecidas pela área comercial (OLIVEIRA et al. 1998).

Com o aumento das frotas de contêineres em conseqüência do rápido crescimento da "contêinerização" (método para se transportar mercadorias em contêineres), torna-se necessário o desenvolvimento de novas tecnologias, tanto para a movimentação e armazenagem quanto para um controle dos fluxos de carga. Normalmente, as quantidades de cargas exportadas e importadas não estão em equilíbrio nos portos, podendo faltar contêiner de um dado tipo em um porto e sobrar em outro (MENDES, FERNANDES e ONO, 2001).

A logística, nesse contexto, busca responder às seguintes questões:

- Como suprir a demanda de contêineres vazios nos portos?
- Quando iniciar o transporte?
- Qual o porto de origem e o de destino?
- Como fazê-lo: de navio, caminhão ou *leasing*?

Questões típicas da logística são relevantes no cenário portuário, tais como: programação, fechamento de carga, data de partida do navio, rotas, seleção do tipo de modal/transportador, contrato de frete, gerenciamento privado da frota; nível de estoques de contêineres vazios nos portos e depósitos; disponibilidade desses contêineres (pois o equipamento pode estar avariado, em reforma, ou em alguma outra condição que impeça sua utilização imediata); previsão da demanda e oferta de vazios ao longo do período planejado; e a grande quantidade de elementos que fazem parte do gerenciamento de tráfego e transporte (CRAINIC, GENDREAU e DEJAX, 1993; KOPICK et al., 1993).

Portanto, torna-se pertinente um trabalho acadêmico que objetiva a confecção de um “arcabouço” matemático de apoio à decisão quanto ao reposicionamento e *leasing* de contêineres vazios que atenda às restrições do problema, minimizando o custo envolvido.

1 Referencial teórico

1.1 Classificação dos contêineres

Lai, Lam e Cham (1995) classificam os contêineres em três tipos, de acordo com a aquisição:

- Próprio – quando não utilizado, é armazenado nos depósitos do armador ou de terceiros. Os depósitos de terceiros cobram uma taxa diária de armazenagem.

- *Leasing* em curto prazo, inferior a três anos – quando não utilizado, é devolvido para a companhia de *leasing* em operação, denominada *drop-off*. A devolução é sujeita a um limite máximo mensal que varia de porto para porto. Uma outra opção é o armazenamento em depósitos para uso posterior.
- *Leasing* em longo prazo, mais de três anos – o tratamento é semelhante ao do contêiner próprio, uma vez que não são permitidas devoluções dentro de um prazo que, dependendo do contrato, varia normalmente de três a cinco anos.

Os valores do *leasing* e do *per diem*, aluguel cobrado por dia pelas empresas locadoras de contêineres, são negociados com as agências. Não existe um valor fixo, porque ele vai depender da quantidade de contêiner e do tempo estipulado. Se o prazo pretendido e a quantidade de contêineres forem maiores, os preços serão menores.

1.2 Movimentação dos contêineres

A tarifa de movimentação portuária também não tem um valor fixo. É feito um acordo junto ao porto para lotes de contêineres movimentados.

Em virtude de os portos terem uma demanda sazonal, o estoque mínimo mantido de contêineres vazios é calculado segundo séries históricas.

O sistema de contêineres de uma empresa marítima é composto de dois tipos principais de movimentos, que devem ser controlados, descritos a seguir (SAMPAIO, 2001):

- Movimentos comerciais – contêineres carregados ou cheios, diretamente geradores de lucro e de contêineres vazios, e que correspondem a operações comerciais da empresa (importação e exportação). A princípio, todo movimento comercial de contêineres cheios gera, quase que automaticamente, um movimento vazio.

- Movimentos técnicos – reequilíbrio de unidades vazias entre os depósitos, movimentos de contêineres alugados ou avariados, etc.

1.3 Histórico dos modelos

Crainic, Dejax e Gendreau (1990) propuseram um modelo, em dois níveis de planejamento integrado de distribuição terrestre e transporte de contêineres, que observa a hierarquia nos processos de decisão e o fluxo das informações. O primeiro nível trata das questões nos planos, estratégico e tático, da seleção de depósitos, alocação de clientes aos depósitos e determinação dos principais movimentos entre os pontos de contêineres vazios. O segundo nível corresponde ao plano operacional das atividades cotidianas de uma empresa. Neste nível satisfaz-se a demanda e selecionam-se as rotas e os modos de transporte. A figura 1 ilustra o esquema de planejamento descrito.

O foco do artigo é a descrição de um sistema de suporte de tomada de decisão operacional e de seus dois principais componentes: o modelo dinâmico estocástico de distribuição de contêineres vazios e o modelo de localização de rotas para contêineres vazios. No artigo de Crainic, Gendreau e Dejax (1993), são apresentados estudos específicos para modelos especialmente adequados às questões do setor de transporte de contêineres, com ênfase nos aspectos marítimos do problema, justamente o que o difere dos outros artigos encontrados pelos autores. Outro ponto em questão está em atender à demanda e minimizar o custo, ao invés de somente maximizar lucros. Há também a possibilidade de se inserirem no sistema novos contêineres.

A motivação dos autores para o estudo do tema foi o fato de que os custos de movimentação de contêineres vazios de uma das principais companhias de navegação europeia que opera com navios de serviço regular (*liners*) por 20 portos europeus representavam,

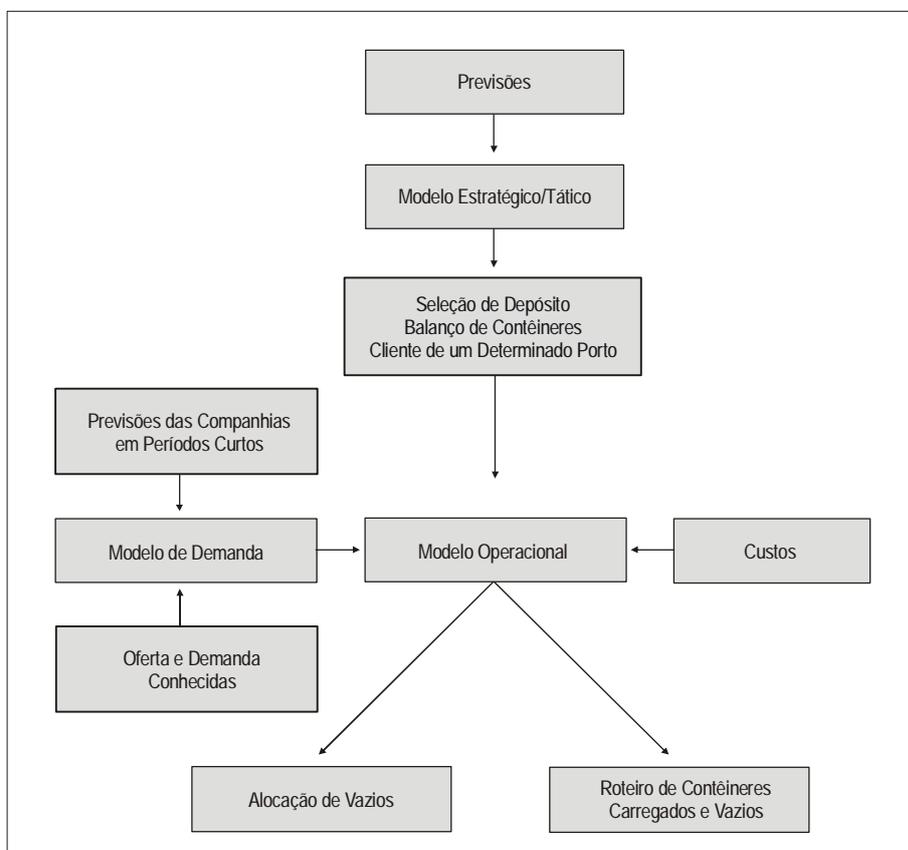


FIGURA 1 - PLANEJAMENTO TOTAL
 FONTE: Crainic, Dejax e Gendreau (1990)

em 1986, cerca de 40% dos custos totais de transporte e distribuição. No estudo são mostrados modelos matemáticos que fazem a alocação de contêineres por terra para atender a rotas marítimas de navios porta-contêineres. Os modelos são (HINO, 1999):

- modelo determinístico com único tipo de contêiner;
- formulação determinística com vários tipos de contêineres;
- modelo estocástico com único tipo de contêiner.

O modelo utilizado como base é o determinístico com único tipo de contêiner. Em função disso, somente esse modelo é explicado a seguir.

Para a construção do modelo, os níveis de planejamento foram organizados da seguinte forma:

- estratégico: selecionar terminais e determinar suas zonas logísticas de influência;
- tático: identificar o fluxo (balanço) de contêineres;
- operacional: alocação dinâmica de contêineres.

Esse planejamento foi representado por meio de três modelos: formulação da rede multimodal envolvida; modelo de alocação de vazios; e modelo de indicação de rotas.

No plano de operação estratégico/tático é formulada a rede multimodal envolvida, incluindo sua localização, o problema de distribuição e balanceamento de vazios entre depósitos. São especificados os algoritmos utilizados. O principal resultado dessa fase é o plano de transporte estratégico/tático, que especifica a configuração da rede para o atual período de planejamento: os depósitos que devem ser utilizados, a alocação de clientes (zona de clientes) aos depósitos e os principais fluxos de balanceamento entre os depósitos.

Os dois outros modelos do planejamento – modelo de alocação de vazios e modelo de indicação de rotas – correspondem ao planejamento operacional das atividades das companhias. Nesse nível, a demanda é satisfeita e as rotas e os transportes são selecionados

e usados para obter a melhor performance econômica possível no processo dinâmico e estocástico.

O modelo de alocação determina a melhor distribuição de contêineres vazios que satisfaça a demanda. Foi admitido o período de duas semanas. O modelo de roteirização empenha-se para minimizar o custo total de transporte de contêineres cheios e vazios da origem até o destino.

Para levar em conta o alto grau de incerteza que caracteriza o problema, o modelo de alocação deveria ser, de acordo com os autores, um modelo dinâmico e estocástico que cobrisse um horizonte de planejamento de uma ou duas semanas. O objetivo do trabalho de Crainic, Dejax e Gendreau (1990) é preparar formulações para esse modelo de alocação.

1.3.1 Descrição do problema

As decisões pertinentes ao processo de alocação do contêiner vazio são principalmente: *quando* iniciar a operação de transporte; *de onde* começar e onde terminar a operação; *como* configurar a movimentação, qual modal, rota. A movimentação é realizada nos planos espacial e temporal.

São considerados para a tomada de decisão: o nível de estoque nos depósitos, as substituições entre os vários tipos de contêineres e os contêineres adicionais, adquiridos por *leasing* ou empréstimo.

Essas decisões requerem grande quantidade de informações:

- os níveis de oferta e demanda;
- a política das companhias operantes;
- as circunstâncias: competição, sociedades das companhias de navegação, regras e normas legais com carregamento.

São descritas, a seguir, as principais decisões e os dados considerados para a realização do processo de alocação do contêiner vazio.

A rede física corresponde ao sistema de distribuição e transporte da companhia nos portos, depósitos e clientes, assim como à conexão entre esses elementos.

A alocação corresponde à decisão para determinar como satisfazer cada cliente de demanda: que quantidade; a partir de qual depósito; quando iniciar o movimento.

Primeiramente, é apresentado um modelo determinístico dinâmico com um único tipo de contêiner e são tratadas as complexas relações existentes entre as várias decisões que devem ser tomadas com relação ao problema de alocação ótima de contêineres sobre uma extensa rede (já descrita). Depois, é descrita a formulação determinística com vários tipos de contêineres, em que são permitidas substituições entre tipos de contêineres, e finalmente é apresentado um modelo estocástico com um único tipo de contêiner, que leva em consideração os elementos estocásticos que estão associados a demandas e suprimentos incertos de contêineres vazios por parte dos clientes na rede.

O custo no modelo de Crainic, Gendreau e Dejax (1993) é dividido em:

- Custo unitário de transporte entre os depósitos e os clientes de demanda.
- Custo unitário de transporte entre cliente de oferta e depósitos.
- Custo entre um depósito e outro.
- Custo unitário de manutenção do contêiner nos depósitos.
- Custo para trazer um contêiner de fora do sistema para o depósito.
- Custo unitário de penalidade para a demanda de contêineres vazios não atendidos.

1.3.2 A rede física de Crainic, Gendreau e Dejax

A rede física de Crainic, Gendreau e Dejax (1993) corresponde ao sistema de distribuição e transporte da companhia, formado pelos portos, depósitos e clientes e respectivos arcos de integração:

- Portos: são depósitos especiais, pois são os principais pontos de entrada e saída do sistema,

constituindo a interface do sistema de transporte terrestre com a rede marítima internacional.

- Depósitos: oferecem facilidades; são pátios de estações ferroviárias onde a companhia de navegação aluga apenas os espaços de que precisa. Junto com os portos, fazem parte da distribuição de contêineres por terra e servem para armazenamento.
- Clientes: são classificados em dois tipos – clientes de demanda e de oferta. Os de demanda requerem contêineres vazios e os de oferta têm os contêineres vazios para oferecer. Os clientes são conhecidos e o plano estratégico/tático determina quais clientes de oferta podem atender à demanda. Isso é determinado principalmente pela programação dos navios e pelo tempo estimado para a movimentação e carregamento do contêiner.

Foi definido que não se pode alterar a programação dos navios.

O modelo matemático de Crainic, Gendreau e Dejax (1993), modelo determinístico com único tipo de contêiner, tem como características a base em períodos de tempo, clientes de oferta e demanda e é considerado somente um tipo de contêiner.

A figura 2 ilustra a rede física que exemplifica o modelo para o reposicionamento de vazios. A figura está representando três períodos de tempo: $t-2$, $t-1$ e t . O triângulo α representa os contêineres introduzidos no sistema, α' é a demanda externa ao sistema que não foi atendida, h representa portos, s são clientes de oferta, k é a quantidade de contêineres enviada, j são os depósitos, i são clientes de demanda, t representa o tempo, X é demanda de contêineres e Y é a oferta de contêineres.

O ponto de partida para a elaboração do modelo de reposicionamento de contêineres vazios é o trabalho de Crainic, Gendreau e Dejax (1993). O modelo apresentado serve de auxílio à tomada de decisão para uma empresa controlar seus equipamentos. A solução do modelo indica o suprimento dos portos de demanda com posicionamento por navio, ou caminhão, ou ainda

com aluguel de equipamento, buscando minimizar o custo total de atendimento da demanda.

O modelo proposto no trabalho de Barco (1998) foi chamado de "modelo matemático particular" e teve como base o modelo de Crainic, Gendreau e Dejax (1993). Em razão disso, os modelos de Crainic, Gendreau e Dejax (1993) e Barco (1998) serão explicados de maneira mais específica por meio das mudanças efetuadas por Barco (1998).

O modelo matemático Particular difere do outro modelo, o de Crainic, Gendreau e Dejax (1993), ao basear-se na passagem dos navios pelos portos e não no tempo. O tempo só é utilizado para o cálculo do custo de armazenagem do contêiner e verificação da possibilidade do transporte de contêineres de um porto a outro em tempo hábil. Barco (1998) considerou em sua rede física que cada porto é um ponto de oferta e demanda, não há depósitos em terra. Todos os depósitos são considerados portos, assim não há mais clientes de oferta e demanda e ainda são utilizados vários tipos de contêineres ao invés de um único tipo.

Neste modelo é possível o posicionamento por navios. O horizonte de programação de Barco (1998) é de quatro semanas, escolhido de acordo com informações junto à empresa de navegação.

A figura 3 exemplifica o fluxo de contêineres do modelo Particular baseado na passagem dos navios pelos portos.

A notação empregada na figura 3 é explicada abaixo:

- T1: contêineres vazios posicionados pelo navio (n-1) dos outros portos para o porto I.
- T2: contêineres vazios posicionados por caminhão dos outros portos para o porto I, a tempo de embarcar no navio n.
- T3: contêineres alugados no porto I, a tempo de embarcar no navio n.
- T4: contêineres vazios que retornam do reparo ou da importação no porto I, a tempo de embarcar no navio n.
- T5: contêineres vazios pré-posicionados dos outros portos para o porto I, a tempo de embarcar no navio n.

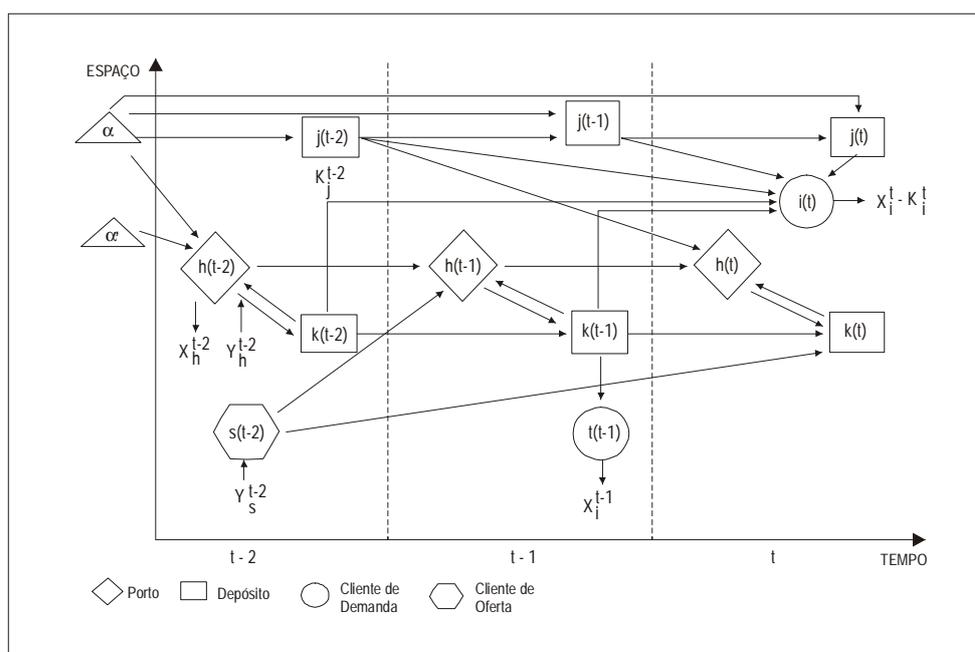


FIGURA 2 - DIAGRAMA DE ESPAÇO VERSUS TEMPO DE MOVIMENTAÇÃO DE CONTÊINERES
 FONTE: Crainic, Gendreau e Dejax (1993)

- T6: contêineres vazios que ficam armazenados no porto I, depois da passagem do navio (n-1).
- T7: contêineres vazios que ficam armazenados no porto I, depois da passagem do navio (n).
- T8: contêineres vazios que serão transportados pelo navio n do porto I para outros portos conforme planejamento prévio.
- T9: contêineres vazios que serão transportados por caminhão do porto I para os outros portos, na saída do navio n.
- T10: contêineres vazios transportados pelo navio (n) do porto I para os outros portos.
- T11: contêineres cheios embarcados no navio (n) do porto I para fora do sistema.
- P1: porto I na passagem do navio (n).
- P2: porto I na passagem do navio (n-1).
- P3: porto I na passagem do navio (n+1).
- P4: conjunto dos outros portos antes da passagem do navio (n) no porto I.
- P5: conjunto dos outros portos depois da passagem do navio (n) no porto I.
- W: contêineres movimentados por caminhão.
- X: contêineres movimentados por navio.
- Y: contêineres obtidos por *leasing*.
- EST: estoque de vazios após a passagem do navio n.
- DI: contêineres vazios que retornaram do reparo ou importação.
- K: contêineres vazios que vão embarcar no navio n.
- KS: contêineres vazios que serão transportados para outros portos na saída de n.
- E: contêineres cheios embarcados no navio n para fora do sistema.

Algumas hipóteses foram adotadas neste último modelo:

- Os contêineres vazios que chegam a um porto em um dado navio apenas estarão disponíveis para o próximo navio que passar por este porto (essa condição é válida, ainda que o próximo navio tenha passagem no mesmo dia).
- Os equipamentos provenientes de importação e que ainda estão sendo desovados pelo importador também não estão disponíveis.
- O *schedule* continua sendo considerado fixo para simplificar o problema.
- Os navios utilizam 10% (fixos) de sua capacidade em TEUs para transporte de contêineres vazios por sentido (norte-sul e sul-norte).

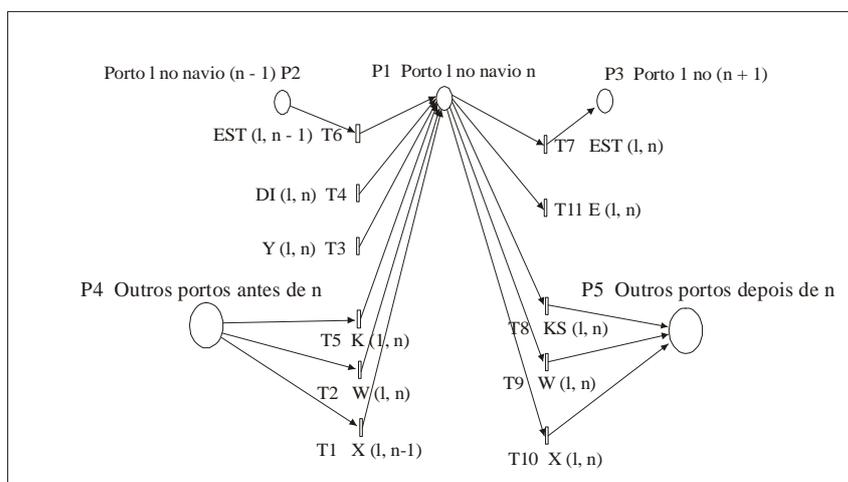


FIGURA 3 - FLUXO DE CONTÊINERES
 FONTE: Barco (1998)

- Um mesmo navio recebe nomes diferentes quanto ao sentido de sua viagem, por exemplo: o navio caroc, Cap Roca, quando passa por um porto viajando no sentido norte-sul, recebe o nome de "carocs" e, quando passa nesse mesmo porto no sentido sul-norte, recebe o de "carocn". Essa forma de tratamento facilita a programação em GAMS no caso de o navio repetir a visita em um porto.

Referente à implementação computacional de Barco (1998), um navio fictício, INICIO, marca a data inicial do período de planejamento garantindo que seja igual em todos os portos, assim como outro navio fictício, FINALL, marca o final do período. O estoque mínimo (estimado por séries históricas) é garantido colocando-se como demanda no navio fictício FINALL de cada porto de entrada do modelo Particular.

Outro assunto tratado no modelo Particular é o do estoque mínimo. Como os contêineres ficam presos com os importadores ou em reparo, é necessário manter um estoque de equipamentos vazios para que se possa atender aos fechamentos de carga (GEOFFRION, 1976). Como os fechamentos são incertos, pode haver um aumento repentino na demanda que o estoque deve suprir. Logo o estoque deve ser estimado por séries históricas. O modelo Particular garante o estoque mínimo desejado em cada porto no fim do planejamento, colocando a quantidade desejada como demanda no navio FINALL de cada porto do arquivo de entrada do modelo. Nas somatórias mostradas a seguir não são explicitados os limites de variação de cada índice.

Os custos considerados no modelo são:

- Custo unitário de embarque no porto de origem mais o custo de desembarque no porto de destino. Como o contêiner vazio não impedirá o transporte de um cheio entre os dois portos e o reposicionamento será realizado por frota própria, não será considerado o custo de transporte marítimo.

- Custo unitário de transporte por terra, estimado por dados históricos.
- Custo médio unitário de alugar-se um contêiner.
- Taxa unitária diária de armazenagem dos equipamentos nos portos.

Parâmetros de entrada

- EU: conjunto de todos os tipos de contêineres da empresa que serão controlados.
- P(eu): conjunto dos nós, representando os portos onde os contêineres do tipo eu são armazenados.
- N(i): conjunto dos navios do *schedule* que passam pelo porto i.
- $E_{n_eu}^i$: quantidade de contêineres do tipo eu que serão embarcados com carga no porto i no navio n.
- $DI_{n_eu}^i$: quantidade de contêineres do tipo eu que voltaram de importação ou reparo, tornando-se disponíveis no porto i para embarque a partir do navio n.
- $K_{n_eu}^i$: quantidade de contêineres vazios do tipo eu cujo transporte para o porto i foi previamente programado e que ficarão disponíveis para embarque a partir do navio n.
- $KS_{n_eu}^i$: quantidade de contêineres do tipo eu cujo transporte, do porto i para outro porto, foi previamente programado, saindo no navio n.
- $TEMP_n^i$: é o tempo em dias entre o navio (n-1) e o navio n, no porto i.
- CA_n : é 10% da capacidade disponível para embarque de contêineres vazios do navio n.

Custos considerados

- CI_{eu}^{ij} : custo unitário de posicionamento do contêiner eu por navio do porto i para o porto j.

- $C2_{eu}^{ij}$: custo médio unitário de transporte do equipamento eu por terra do porto i para o porto j.
- $C3_{eu}^i$: custo médio unitário para alugar-se um contêiner eu no porto i.
- $C4_{eu}^i$: taxa mínima diária de armazenagem do contêiner eu no porto i.

Variáveis de decisão

- $X_{n_eu}^{ij}$: quantidade de contêineres vazios do tipo eu alocados no navio n do porto i para o porto j.
- $W_{n_eu}^{ij}$: quantidade de contêineres vazios do tipo eu alocados em caminhões do porto i, para o navio n no porto j.
- $Y_{n_eu}^i$: quantidade de contêineres eu alugados no porto i para o navio n.

Variáveis auxiliares

- $EST_{n_eu}^i$: quantidade de contêineres eu mantida em estoque no porto i na saída do navio n.

Função objetivo

$$Z = \sum_{eu} \sum_n \sum_i \sum_j (C1_{eu}^{ij} * X_{n_eu}^{ij} + C2_{eu}^{ij} * W_{n_eu}^{ij}) + \sum_{eu} \sum_n \sum_i (C3_{eu}^i * Y_{n_eu}^i + C4_{eu}^i * EST_{n_eu}^i * TEMP_{n_eu}^i)$$

Onde Z é a variável a minimizar.

Restrição de continuidade do estoque

$$EST_{n_eu}^i = EST_{(n-1)_eu}^i - E_{n_eu}^i + DI_{n_eu}^i + K_{n_eu}^i - KS_{n_eu}^i + Y_{n_eu}^i + \sum_{jj < i} (X_{(n-1)_eu}^{ji} + W_{n_eu}^{ji}) - \sum_{jj < j} (X_{n_eu}^{ij} + \sum_{n'} W_{n'_eu}^{ij})$$

Onde $i < j$ significa que o porto i fica antes do porto j no *schedule* de um determinado navio.

Restrição de capacidade de reposicionamento por navio

$$\sum_{jj > i} \sum_{eu} (X_{n_eu}^{ij}) + \sum_{k | k < i} \sum_{jj > i} \sum_{eu} X_{n_eu}^{kj} \leq CA_n$$

No trabalho de Oliveira et al. (1998), são realizadas melhorias no modelo Particular, tais como:

- possibilidade de troca de contêineres vazios;
- capacidade dos navios flexibilizada;
- introdução de estoque mínimo de segurança nos portos.

Primeiramente, procurou-se determinar o fluxo de contêineres em um determinado porto. Nessa fase, considerou-se um único tipo de contêiner, sendo posteriormente inseridos três tipos.

A figura 4 exemplifica o fluxo de contêineres do modelo proposto por Oliveira et al. (1998). Logo após está o modelo matemático referente à figura, onde:

- $X_{j,i,n-1,t}$: quantidade de contêineres vazios do tipo t trazidos pelo navio (n-1) do porto j e que estará disponível quando o navio n passar no porto i.
- $W_{j,i,n,t}$: quantidade de contêineres vazios do tipo t reposicionada por terra vinda do porto j para o porto i quando da passagem do navio n.
- $O_{i,n,t}$: balanço de contêineres do tipo t entre a passagem do navio n.
- $Y_{i,n,t}$: quantidade de contêineres do tipo t alugados no porto i na passagem do navio n.
- $Est_{i,n,t}$: estoque no porto i, na passagem do navio n, no tempo t.

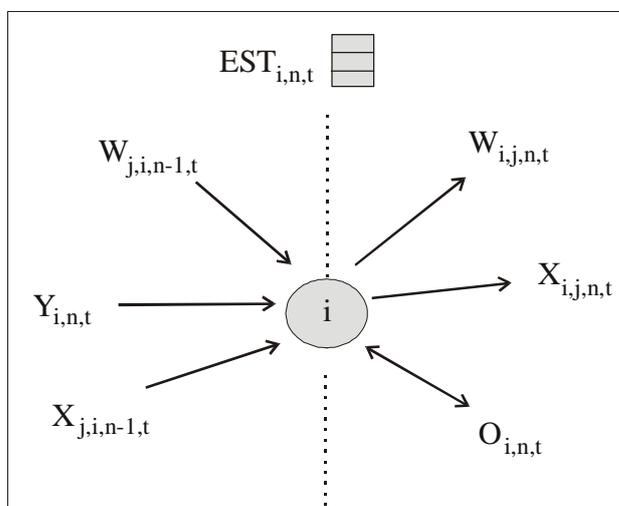


FIGURA 4 - FLUXO DE CONTÊINER

FONTE: Oliveira et al. (1998)

A partir da determinação do fluxo de contêiner no porto i , foi feita a inclusão da possibilidade de trocas de contêineres. A troca é realizada entre contêineres de 20" e 40" somente do tipo DC, devido à especificidade dos outros tipos (HK e IN). As possibilidades de troca são um contêiner DC-40 por dois DC-20 e vice-versa.

Com isso, foram introduzidas algumas variáveis para representar esses contêineres trocados:

- $XT_{i,j,n-1,t}$: contêineres trocados transportados por navio.
- $G_{i,j,n,t}$: contêineres trocados transportados por terra.
- $U12_{i,n}$: contêineres trocados internamente nos portos (dois de 20" por um de 40").
- $U21_{i,n}$: contêineres trocados internamente nos portos (um de 40" por dois de 20").

É ilustrado na figura 5 o fluxo de contêineres com as possibilidades de trocas, sendo que as variáveis $U12$ e $U21$ explicam as trocas ocorridas em i .

Para a elaboração da equação da capacidade, foi necessário conhecer a quantidade de contêineres cheios que embarcam em cada navio, bem como a origem e o destino desses contêineres. Para isso, incluíram-se outros parâmetros: Z_1 , Z_2 , Z_3 e Z_4 ,

significando contêineres de 20" simples (DC), 20" insulado (IN), 40" simples (DC) e 40" refrigerados (HK), respectivamente. Para cada um desses parâmetros, foi confeccionada uma tabela com a origem, o destino e o navio que vai levar os contêineres cheios. Desse modo o fluxo continua o mesmo, porém mais três equações são adicionadas ao modelo: equação de capacidade dos navios; equação de limite de troca de contêineres de 40' em cada porto; equação de limite de troca de contêineres de 20' em cada porto.

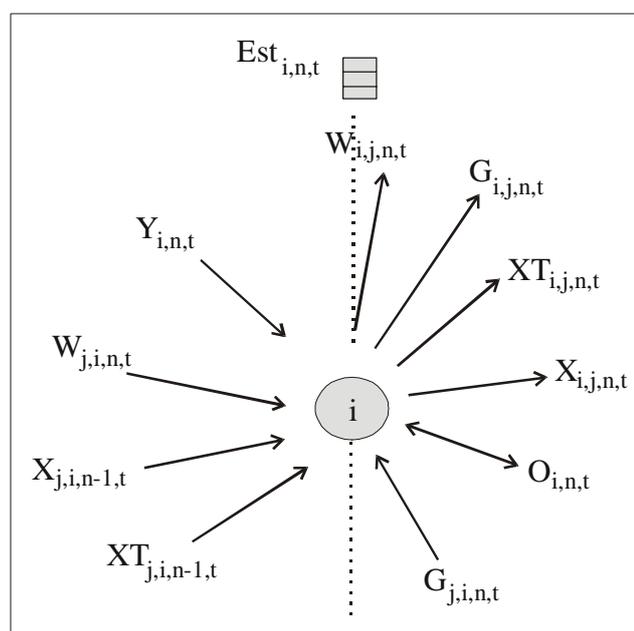


FIGURA 5 - FLUXO DE CONTÊINERES COM TROCAS ENTRE DC-20 E DC-40

FONTE: Oliveira et al. (1998)

O modelo foi rodado em várias condições para a verificação dos resultados e sua validação. Os dados de entrada do modelo em relação ao modelo de Barco (1998) aumentaram quantitativa e qualitativamente, bem como o tempo de processamento. Pode-se, porém, exercer muito mais controle sobre as operações de movimentação de contêineres vazios.

De acordo com os autores, as companhias de navegação, bem como os armadores de contêineres, possuirão, utilizando-se dessa ferramenta, mais alternativas, de modo que os seus objetivos possam ser atendidos satisfatoriamente.

O trabalho de Ono (2001) deu suporte a este nas questões de: tratamento de navios com dupla passagem pelos portos e capacidade do navio variando de acordo com o trecho da viagem.

No trabalho de Ono (2001), é abordado o transporte por cabotagem numa viagem cíclica, desenvolvendo uma nova metodologia para a resolução de um problema de *scheduling* com características de rotas cíclicas, envolvendo multiorigens e multidestinos.

Primeiramente, foram geradas todas as rotas viáveis, juntamente com os parâmetros relativos a cada uma delas para cada classe de embarcação. Posteriormente, foi desenvolvido um modelo de programação linear com o objetivo de minimizar o custo total da operação de cabotagem. Essas duas etapas foram amparadas por dois modelos matemáticos, sendo um para cada etapa. Na primeira fase, o modelo foi chamado de modelo 1 e gerou as rotas viáveis.

A figura 6 mostra o esquema para a formulação do modelo 1.

Na segunda etapa, o modelo (chamado de modelo 2) gerou rotas otimizadas, tendo como base os resultados obtidos do modelo 1. No caso do presente trabalho, é fornecido o *schedule* do navio, portanto a rota de cada navio já é conhecida. Para cada par origem-destino de uma viagem, Ono (2001) considera todas as cargas que podem estar presentes:

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

Em uma viagem cíclica, os portos se repetem, e um mesmo porto pode ser antecessor e sucessor de outro porto. Para lidar com essa questão, após definir os grupos de portos, Ono (2001) adotou o índice *l* para representar o porto de saída da viagem que será estudada.

As possibilidades de carregamento entre os grupos foram enumeradas da seguinte forma:

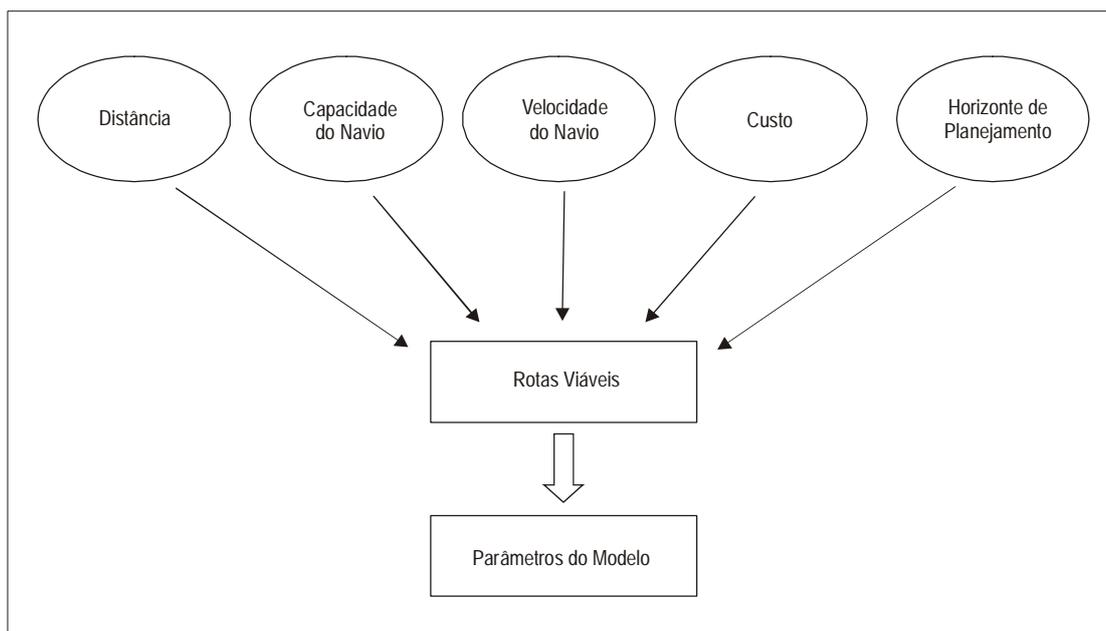


FIGURA 6 - ESQUEMA DO MODELO 1
 FONTE: Ono (2001)

- Cargas com origens em todos os portos antecessores a l e destinos em portos visitados e antecessores aos portos de origem.
- Cargas com origem em portos antecessores a l e destinos em portos visitados sucessores aos portos de origem e antecessores a l .
- Cargas com origem em todos os portos visitados e antecessores a l e destinos em todos os portos visitados sucessores a l .
- Cargas com origem em l e destinos em todos os portos visitados antecessores a l .
- Cargas com origem no porto de índice l e destinos em todos os portos visitados sucessores a l .
- Cargas com origem em todos os portos sucessores a l e destinos em portos visitados sucessores aos portos de origem.
- Cargas com origem em portos sucessores a l e destinos em portos visitados sucessores a l e antecessores à origem.

Cada trecho entre o porto de índice i e o porto de índice j pode ser formulado matematicamente. A somatória de todas as parcelas resulta na expressão da restrição de capacidade do navio. Essa restrição teve uma metodologia complexa devido às características da viagem cíclica com a inclusão de sete regras, descritas anteriormente. Com isso é possível observar a capacidade do navio nos trechos da viagem. O modelo ainda permite algumas variações, como quantidade de portos, número de rotas, velocidade, capacidade, quantidade e custos das embarcações e demanda de cargas. A validação do modelo foi feita por meio de um estudo de caso baseado em dados reais da empresa HSAC. A solução gerada pelo modelo apresenta características tanto estratégicas quanto operacionais. Estratégicas no sentido de apresentar um dimensionamento da frota dedicada a esse serviço, bem como de estabelecer as rotas necessárias para o atendimento da demanda. Operacionais no sentido de apresentar as condições de carregamento, inclusive de ocupação da embarcação por trecho.

Choong, Cole e Kutanoglu (2002) analisam o efeito do tamanho de um horizonte de planejamento no gerenciamento de contêineres vazios numa rede de transporte intermodal. São feitas comparações de custos entre períodos de horizonte de planejamento adotados (15 e 30 dias). O custo apresentado no período de 15 dias é comparado com o custo dos primeiros 15 dias do período de 30 dias. A estrutura base do modelo é uma adaptação do modelo determinístico com único tipo de contêiner, descrito por Crainic, Gendreau e Dejax (1993). O objetivo do modelo é minimizar o custo total de movimentação de contêineres vazios, sendo esse custo composto por custo de movimentação de contêineres vazios entre terminais; custo de armazenagem; custo de aquisição de contêineres fora do sistema (*leasing*, compra, empréstimo).

Algumas hipóteses foram adotadas:

- Quantidade de contêineres vazios disponíveis conhecida.
- Quantidade de contêineres vazios necessária conhecida.
- Quando um contêiner é desovado, torna-se imediatamente disponível.
- Para simplificar o modelo, não é permitido estocar contêineres vazios em clientes de oferta, sendo o contêiner transportado, depois de descarregado, para cliente de demanda ou terminais.
- Os contêineres vazios não irão para clientes de demanda com grande antecedência ou para períodos de uso futuro.
- Uso de um único tipo de contêiner.
- Não são permitidas mudanças de planos.
- O número de contêineres vazios é previsto no horizonte de planejamento e são determinados os terminais.
- Os contêineres podem ser alugados, comprados ou emprestados.

- São considerados três tipos de transporte: caminhão, trem e barcas.
- O modal é decidido na zona portuária.

Foi feito um estudo de caso com base nas atividades do rio Mississippi. Esse estudo foi realizado utilizando 3, 5 e 7 terminais de contêineres, capacidade diária de transporte de contêineres vazios por navio (BL): 0.5%, 10% e 20% do total de contêineres desovados. As mudanças quanto à capacidade diária por navio relativamente não surtiram impacto no horizonte de planejamento. Comparando os resultados entre 15 e 30 dias de planejamento, percebe-se que os custos são menores para o horizonte de planejamento mais curto.

A metodologia de resolução por meio de modelagem matemática linear proposta neste trabalho baseia-se na dissertação de Barco (1998), que é específica para o problema do contêiner vazio e tem como objetivo a minimização dos custos. O modelo proposto difere do modelo Particular de Barco (1998) na questão do tratamento da capacidade do navio, nos navios com dupla passagem pelos portos e no estabelecimento de estoque mínimo nos portos, que Barco (1998) garante colocando a quantidade de contêineres vazios necessários para o estoque mínimo como demanda em um navio fictício. Outra implementação no modelo proposto é a inserção de uma janela de tempo entre a chegada do contêiner vazio nos portos e a sua utilização, o que torna o modelo mais adequado à realidade. O tratamento da capacidade do navio foi inspirado no trabalho de Ono (2001).

2 Metodologia

O modelo matemático proposto foi eletronicamente elaborado por meio do pacote General Algebraic Modeling System - GAMS (Sistema Geral de Modelagem Algébrica), e os dados usados foram providos por uma companhia de navegação. A aplicabilidade do modelo

pode ser verificada mediante um cenário hipotético. Como material de apoio utilizou-se principalmente o manual do GAMS (BROOKE et al., 1998).

A resolução do modelo supracitado foi efetuada em um servidor remoto (NEOS Server for Optimization), devido ao tamanho excessivo do modelo para o poder computacional disponível localmente. Manteve-se, ainda, o default do programa de OPTCR = 0.1. Optou-se pelo *solver* XPRESS, pois a entrada no formato do GAMS para problemas de programação linear inteira mista só era plausível por esse *solver* neste servidor.

3 Resultado do modelo proposto

No cenário estudado, tem-se uma empresa de navegação cuja frota de navios porta-contêineres opera, por exemplo, em uma rota Europa (América do Norte) – América do Sul (Costa Leste), com *schedules* definidos. A situação mais provável é que, num dado porto da rota, exista desbalanceamento entre a quantidade de contêineres cheios, de um dado tipo e tamanho, que os navios trazem ao porto, daqui para frente chamados de contêineres de importação, e a quantidade de contêineres cheios, do mesmo tipo e tamanho, que os navios retiram do porto, doravante denominados contêineres de exportação.

O reposicionamento dos contêineres vazios pode ser realizado por meio dos próprios navios da frota, utilizando espaço ocioso nos navios ou por meio de caminhões. Outra alternativa a ser considerada é o aluguel de contêineres vazios para atender à demanda da exportação. Convém observar que a própria viabilidade do aluguel de contêineres está condicionada à existência da oferta de contêineres vazios na região. No caso de haver um desbalanceamento generalizado no transporte marítimo entre a exportação e a importação de um dado tipo de contêiner, num porto, e que não haja desbalanceamento em sentido contrário no transporte

terrestre desses contêineres, é pouco provável que haja oferta de contêineres vazios desse tipo de contêiner.

Sem o reposicionamento ou o aluguel de contêineres vazios, a oferta de um tipo k num porto i , num dia t , associado ao carregamento de um navio n , depende:

- do estoque de contêineres vazios após a saída do navio anterior;
- da quantidade de contêineres vazios que retornaram vazios dos clientes de importação após a passagem do último navio;
- da quantidade de contêineres que vieram do reparo após o último navio.

Por sua vez, a demanda de contêineres vazios do tipo k , no porto i , no dia t em que passa o navio n é igual à demanda de exportação de contêineres cheios do tipo k , no navio n , a partir do porto i .

O problema do reposicionamento dos contêineres vazios pode, então, ser definido. Dado um horizonte de planejamento, com os correspondentes *schedules* dos navios, e conhecidas as ofertas e demandas de contêineres vazios, de cada tipo, em cada porto da rota, pretende-se determinar a configuração, envolvendo o transporte marítimo (utilizando os navios da frota) e o terrestre, para reposicionamento dos contêineres vazios da empresa, e o aluguel de contêineres novos, que minimize o custo da empresa (ROBINSON, 1986).

3.1 O modelo matemático

3.1.1 Índices e conjuntos

Como base para a elaboração do modelo, definem-se os seguintes índices e conjuntos a serem utilizados nas variáveis e parâmetros:

- n : para indicar os navios pertencentes à companhia que participam do processo e N o conjunto de navios no horizonte de planejamento.
- i, j, l : para indicar portos e I o conjunto de portos no horizonte de planejamento.

- k : para indicar o tipo de contêiner e K o conjunto de tipos de contêineres.
- t : para indicar a unidade de tempo (nos exemplos apresentados, a unidade é medida em dias) e T o conjunto dos dias.

3.1.2 Parâmetros

Os parâmetros do modelo são:

- $C1_{i,k,j}$: custo unitário de movimentação de contêineres vazios, do tipo k do porto i para o porto j por meio de navios.
- $C2_{i,k,j}$: custo unitário de movimentação de contêineres vazios, do tipo k do porto i para o porto j , por meio de transporte rodoviário.
- $C3_{i,k}$: custo unitário de *leasing* para contêineres vazios, do tipo k no porto i .
- $C4_{i,k}$: custo unitário de estocagem, por uma unidade de tempo, para contêineres vazios do tipo k no porto i .
- $TEMP_{t,n,i}$: intervalo de tempo entre a passagem do navio n , que passa na data t no porto i , e a do navio antecessor a esse. Caso não exista um antecessor a esse navio, esse tempo é calculado a partir do primeiro dia do período de análise.
- $SUC_{i,n,t}$: conjunto de portos sucessores ao porto i na passagem do navio n na data de índice t .
- $EST_{t,n,i,k}$: estoque de contêineres vazios do tipo k , na data t , no porto i , na passagem do navio n .

3.1.3 Variáveis de decisão

Para elaborar o modelo matemático correspondente ao problema enunciado, o primeiro passo é identificar corretamente as variáveis de decisão do problema. À primeira vista, parece ser uma tarefa simples. As variáveis de decisão seriam:

- A quantidade de contêineres vazios, de cada tipo k , transportada para cada navio n entre os portos i e j .

- A quantidade de contêineres vazios, de cada tipo k , transportada por caminhão do porto i ao porto j para atender à demanda de exportação no navio n .
- A quantidade de contêineres vazios de cada tipo k , alugada no porto i para atender à demanda de exportação no navio n .

Assim, as variáveis serão designadas por:

- $X_{t,n,i,j,k}$: variável inteira não negativa que indica a quantidade de contêineres do tipo k embarcadas no porto i , no dia t , no navio n , com destino ao porto j .
- $W_{t,n,i,j,k}$: variável inteira não negativa que indica a quantidade de contêineres do tipo k despachadas por caminhão, na data t , do porto i , com destino ao porto j , para atender à demanda de exportação do navio n .
- $Y_{t,n,i,k}$: variável inteira não negativa que indica a quantidade de contêineres do tipo k alugados no porto i para atender à demanda de exportação do navio n no dia t .

Convém observar que, por analogia com a variável X , também para a variável W , o índice t especifica o dia em que o contêiner vazio é retirado do porto i , mas o seu valor está diretamente ligado à data da passagem do navio n no porto j . A data representada pelo índice t é formada pelo tempo de viagem mais o prazo de antecedência. Isto é, se o navio n vai fazer escala no porto j no dia t' , o dia t em que o caminhão deve sair do porto i levando contêiner vazio para o porto j é obtido por meio da expressão: $t=t'-(tvc_{ij} + \text{prazo})$, em que tvc_{ij} é o tempo de viagem por caminhão entre os portos i e j , e prazo é o intervalo de tempo necessário para que um contêiner vazio entregue no porto i possa ser ovado (carregado) para exportação.

Além das variáveis de decisão X , W e Y , que caracterizam as decisões a serem tomadas, introduzem-se ainda as variáveis:

- $EST_{t,n,i,k}$: é o estoque de contêineres do tipo k , no porto i , depois da passagem do navio n no dia t .
- $EST_{i,k}^{MIN}$: é o estoque mínimo de contêineres do tipo k que deve ser mantido no porto i .

Considerando que, numa viagem de um navio porta-contêiner, os portos da costa brasileira sejam visitados tanto no sentido sul, quando o navio vem da Europa (ou Estados Unidos), quanto no sentido norte, quando o navio retorna para a Europa, e que alguns portos brasileiros são visitados duas vezes, na modelagem matemática do problema de reposicionamento de contêineres vazios, é relevante definir para um dado navio n e um dado porto p quais são os portos anteriores e quais os portos sucessores. Isto é, de que portos o navio n pode levar contêineres vazios para o porto p e para que portos o navio n pode levar contêineres vazios disponíveis no porto p . Se o navio n visita o porto p duas vezes, é necessário especificar os anteriores e sucessores, em cada uma das visitas, e é preciso definir o dia T de cada visita e, então, definir para o navio N , quando de sua passagem pelo porto P no dia T , quais são os portos anteriores e quais os portos sucessores.

Para que um contêiner vazio não ocupe o espaço de um contêiner cheio, é necessário conhecer a capacidade ociosa do navio entre um porto e outro. Para tanto, é preciso ter: uma matriz de carregamento do navio quando este chega ao primeiro porto; uma matriz para cada porto brasileiro de carga e descarga do contêiner cheio. Com isso, sabe-se a quantidade de espaços vagos no navio que poderão ser ocupados por contêineres vazios.

3.1.4 Função objetivo

O modelo tem como função objetivo a minimização dos custos de realocação de contêineres vazios, com o comprometimento de total atendimento das demandas. A função objetivo é assim calculada:

$$z = \sum_{t \in T} \sum_{n \in N} \sum_{j \in \text{SUC}(i,n,t)} \sum_{k \in K} C1_{i,j,k} \times X_{t,n,i,j,k} +$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{n \in N} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} C2_{i,j,k} \times W_{t,n,i,j,k} +$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{n \in N} \sum_{k \in K} C3_{i,k} \times Y_{t,n,i,k} +$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{n \in N} \sum_{k \in K} C4_{i,k} \times \text{EST}_{t,n,i,k} \times \text{TEMP}_{t,n,i}$$

$$+ \sum_{n' \in \text{NCON}(t,n,i)} \sum_{j \in \text{JCON}(n',t,n,i)} X_{t'=TVIS(n',j),n',j,i,k} -$$

$$- \sum_{t'=\text{ATT}(t,n,i)} \sum_{j \in J} \sum_{n' \in \text{NSC}(t',i,j)} W_{t',n',i,j,k} +$$

$$+ \sum_{j \in J} \sum_{t'=\text{prazo}-\text{TVC}(j,i),n,i,j,k} W_{t',n',i,j,k}$$

$t \in T, n \in N, i \in I, k \in K$

Onde têm-se os seguintes parâmetros:

- $C1_{i,k,j}$: custo unitário de movimentação de contêineres vazios, do tipo k do porto i para o porto j por meio de navios.
- $C2_{i,k,j}$: custo unitário de movimentação de contêineres vazios, do tipo k do porto i para o porto j por meio de transporte rodoviário.
- $C3_{i,k}$: custo unitário de *leasing* para contêineres vazios, do tipo k no porto i.
- $C4_{i,k}$: custo unitário de estocagem, por uma unidade de tempo para contêineres vazios do tipo k no porto i.
- $\text{TEMP}_{t,n,i}$: intervalo de tempo entre a passagem do navio n, que passa na data t no porto i, e o navio antecessor a este. Caso não exista um antecessor a este navio, este tempo é calculado a partir do primeiro dia do período de análise.
- $\text{SUC}_{i,n,t}$: conjunto de portos sucessores ao porto i na passagem do navio n na data de índice t.
- $\text{EST}_{t,n,i,k}$: estoque de contêineres vazios do tipo k, na data t, no porto i, na passagem do navio n.

Onde:

- $X_{t,n,i,j,k}$: é o estoque de contêineres vazios do tipo k, do porto i, após a passagem do navio n na data t.
- $\text{ATT}_{t,n,i}$: é o índice do dia da passagem no porto i do navio que precede imediatamente o navio n em sua passagem por este no dia t.
- $\text{ANN}_{t,n,i}$: é o índice do navio que precede imediatamente o navio n em sua passagem pelo porto i no dia t.
- $O_{t,n,i,k}$: representa a diferença entre a oferta e a demanda de contêineres vazios para atender à demanda de exportação de contêineres cheios do tipo k no porto i, pelo navio n no dia t. Esse parâmetro representa essencialmente um balanço entre os contêineres que voltaram ao porto de clientes de importação ou do reparo, tornando-se disponíveis para os clientes de exportação, e os contêineres necessários para atender à demanda de exportação neste porto. (No caso de aplicação sucessiva do modelo, o parâmetro $O_{t,n,i,k}$ deve levar em conta reposicionamentos de contêineres vazios previamente programados). O parâmetro pode ser positivo, significando que há um excesso de oferta de contêineres vazios, ou negativo, significando que há um excesso de demanda.
- $Y_{t,n,i,k}$: é a quantidade de contêineres vazios do tipo k alugados, no porto i para atender à demanda do navio n, no dia t.

3.1.5 Restrições

Restrição de equilíbrio

$$\text{EST}_{t,n,i,k} = \text{EST}_{t'=\text{ATT}(t,n,i),n'=\text{ANN}(t,n,i),i,k} + O_{t,n,i,k} +$$

$$+ Y_{t,n,i,k} - \sum_{j \in \text{SUC}(i,n,t)} X_{t,n,i,j,k} +$$

- $SUC_{i,n,t}$: é o conjunto de portos sucessores do porto i na rota do navio n após sua passagem no dia t .
- $X_{t,n,i,j,k}$: é a quantidade de contêineres vazios do tipo k embarcados no navio n no porto i para o porto j na data t .
- prazo: é o prazo de antecedência com que um contêiner vazio deve chegar a um porto, tendo em vista o seu carregamento num dado navio.
- $TVIS_{n,i}$: é o dia em que o navio n visita o porto i (no caso de dupla passagem, haverá dois valores para $TVIS_{n,i}$).
- $NCON_{t,n,i} = \{n' \in N: ATT_{t,n,i} - \text{prazo} < TVIS_{n',i} \leq t - \text{prazo}\}$: representa o conjunto de navios que podem trazer contêineres vazios para atender especificamente à demanda do navio n no porto i no dia t .
- $ANT_{i,n,t}$: é o conjunto de portos antecessores do porto i na rota do navio n , por ocasião de sua visita no dia t . (Convém enfatizar que a definição de conjunto de portos antecessores leva em conta os comentários mencionados na seção 3.1.1).
- $JCON_{n',t,n,i} = \{j \in I: j \in ANT_{i,n',t} = TVIS_{n',i}\}$: convém observar que, para um navio n' , o dia t' deve pertencer ao intervalo $[ATT_{t,n,i} - \text{prazo}, t - \text{prazo}]$, conforme explicitado na definição do conjunto $NCON_{t,n,i}$.
- $TVC_{i,j}$: é a duração da viagem de caminhão do porto i ao porto j .
- $NSC_{t',i,j} = \{n' \in N: TVIS_{n',j} = t' + TVC_{i,j} + \text{prazo}\}$.
- $W_{t,n,i,j,k}$: é a quantidade de contêineres do tipo k despachados por caminhão, na data t , do porto i , com destino ao porto j , para atender à demanda de exportação do navio n .

Restrição do espaço ocupado pelos contêineres vazios

Para cada navio n , no trecho a partir de cada porto, em que ele passa no instante $tvis(n,l)$, eventualmente

passando duas vezes, impõe-se que os contêineres vazios somente possam ocupar o espaço não utilizado pelos contêineres cheios, medido em TEUs.

Essa restrição tem a finalidade de evitar uma perda de receita excessiva causada pela substituição de contêineres cheios (geram frete) por contêineres vazios.

A restrição pode ser assim formulada:

$$\sum_{j \in SUC(l,n,t=tvis(n,l))} \sum_{k \in K} C(k) X_{t=tvis(n,l),n,l,j,k} + \sum_{i \in ANT(n,l,t=tvis(n,l))} \sum_{j \in SUC(l,n,t=tvis(n,l))} \sum_{k \in K} C(k) X_{t=tvis(n,l),n,i,j,k} \leq CA_{n,l}$$

$n \in N, l \in I$, todo $TVIS_{n,l}$

- C_k : espaço em TEUs ocupado por um contêiner do tipo k (para contêineres de 20 pés, este parâmetro assume valor 1 e, para contêineres de 40 pés, valor 2).
- $CA_{n,l}$: espaço disponível, em TEUs, no navio n destinado ao transporte de contêineres vazios quando ele sai do porto l .

Restrição de estoque mínimo

Essa restrição tem a finalidade de garantir que o estoque mínimo do porto i para o contêiner do tipo k seja atendido.

Conhecendo-se as características básicas do problema, será desenvolvido um modelo de programação linear, que alocará os contêineres com base nas informações obtidas. O modelo foi compilado de acordo com as normas de uma empresa de navegação. Para a tomada de decisão, são considerados os custos logísticos envolvidos, como armazenagem, transporte e aluguel. Novamente, deve-se enfatizar que não se consegue atribuir todos esses custos com facilidade, pois alguns deles não são diretos e outros podem variar com o período e com a quantidade transportada, mas o modelo deve ser ajustado para que ele aponte a melhor opção.

4 Resultados computacionais

A consistência do modelo proposto é comprovada empiricamente por meio de cenários com os dados de entrada junto à empresa HSAC (Hamburg Süd). Os dados, por serem confidenciais, não são fidedignos, porém a ordem de grandeza fornece uma representação adequada da realidade.

4.1 Cenário HSAC

Nesse cenário, os dados de entrada para o modelo matemático foram atualizados junto à HSAC. O período de tempo adotado permanece de um mês, o experimento é de 31 dias, iniciado no dia com índice T1 e terminado no dia com índice T31 (com atualizações semanais de dados de entrada dentro do horizonte de planejamento).

No quadro 1, é mostrada a programação das chegadas dos navios nos portos, onde constam no enunciado de cada coluna o porto, o dia de passagem do navio e o nome do navio. E o quadro 2 apresenta o *schedule* do navio, onde constam, primeiramente, o nome do navio, o dia de passagem pelos portos (na linha superior), e o porto correspondente (na linha abaixo).

O quadro 3 mostra o balanço de contêineres vazios nos portos, correspondente ao parâmetro $O_{t,n,i,k}$.

A tabela 1 mostra os valores adotados para o aluguel de contêineres vazios $C3(I,K)$.

A tabela 2 mostra os valores adotados para o custo de estocagem dos contêineres vazios nos portos $C4(I,K)$.

O tempo computacional de processamento foi inferior a dez minutos, o que o torna compatível com o seu escopo básico de modelo de operação. Cabe observar como deve ser feita a interpretação desse resultado: quando se trata de uma variável (Var) X, está designando-se o número de contêineres vazios do tipo indicado, carregados no dia (Tempo) no porto (Port1) com destino ao porto (Port2) no navio (Navio); quando se trata de uma variável (Var) W, está designando-se o número de contêineres vazios do tipo indicado, transportados de caminhão no dia (Tempo) no porto (Port1) com destino ao porto (Port2); quando se trata de uma variável (Var) Y, planeja-se um *leasing* de contêineres vazios no porto (Port1) para ser embarcado no navio (Navio). Por exemplo, na segunda linha da tabela 2, abaixo do índice, é mostrado que três contêineres do tipo DC-40 serão movimentados por navio (X) do porto de Salvador (SSA) para atender à demanda do navio HEICO em Fortaleza (FOT).

TABELA 1 - CUSTO UNITÁRIO DO LEASING PARA CONTÊINERES VAZIOS

(Em US\$)

CONTÊINER VAZIO	FOT	ITJ	MAO	MCZ	PEC	PNG	RIG	RIO	SEP	SFS	SLZ	SSA	SSZ	SUP	VIX
DC20	600	650	700	700	700	700	630	750	700	600	700	650	500	800	700
IN20	500	550	600	600	600	600	530	600	600	500	600	600	600	800	500
RF20	750	813	875	875	875	875	788	938	875	750	875	813	625	1000	875
DC40	760	800	900	900	900	900	800	900	900	770	900	800	900	1000	760
HC40	768	808	909	909	909	909	808	909	909	778	909	808	909	1010	768
RH40	950	1000	1125	1125	1125	1125	1000	1125	1125	963	1125	1000	1125	1250	950

TABELA 2 - CUSTO UNITÁRIO DE ESTOCAGEM DE CONTÊINERES VAZIOS

(Em US\$)

CONTÊINER VAZIO	FOT	ITJ	MAO	MCZ	PEC	PNG	RIG	RIO	SEP	SFS	SLZ	SSA	SSZ	SUP	VIX
DC20	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
IN20	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
RF20	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
DC40	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
HC40	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
RH40	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

QUADRO 1 - PROGRAMAÇÃO DE CHEGADA DOS NAVIOS AOS PORTOS

SSZ		SUP		RIO		PNG		SFS		RIG	
DIA	NAVIO										
04	CASNI	05	CAFIN	02	CASNI	10	MAVAL	09	LEBL	07	LEBL
09	MAVAL	08	CASMA	11	CASMA	15	SEEXP	11	MAVAL	09	CASNI
09	CAFIN	12	ALBRA	11	SEEXP	16	SEV	14	FMAN	14	FMAC
11	FSAN	14	LEBL	14	SEV	20	PEARG	15	CAFIN	18	FMAN
12	FMAN	16	FSAN	14	CASNI	21	MAVAN	16	FMAC	18	CASMA
12	CASNI	17	CASNI	19	MAVAN	23	LBB	22	ALBRA	25	CASRA
12	CASMA	17	CASRA	21	LBB	27	ALHAM	23	SEV	29	LBB
13	SEEXP	19	ALEUR	22	CASMA	28	CSHAM	23	PEARG	31	CASAN
14	FLAM	20	FLAM	24	CASAN	30	PRN	25	CSHAM		
14	MAVAL	21	FMAC	25	ALHAM	31	MANEW	29	ALEUR		
15	SEV	21	CASAN	28	PRN						
15	ALBRA	24	FMAN	29	CASRA						
16	CAFIN	25	CAROC	31	CASAU						
17	SEEXP	28	CASAU								
18	PEARG	29	SEV								
20	FMAN	31	FBEL								
20	CASRA										
20	MAVAN										
21	CASMA										
21	CSHAM										
22	LBB										
		SSA		SEP		FOR		PEC		ITJ	
		DIA	NAVIO								
22	ALEUR	17	MAVAL	12	FMAN	06	FMAN	23	SEEXP	16	SEEXP
23	ALBRA	19	FLAM	13	FSAN	16	LEBL	25	CASMA	24	MAVAN
24	FBEL	20	SEEXP	16	FLAM	22	FLAM	31	MAVAN	29	ALHAM
24	SEV	21	LEBL	24	LEBL	24	FMAC				
25	LEBL	28	SEV	25	FBEL	26	FMAN				
25	CASAN	28	MAVAN	31	INTRE						
25	MAVAN	28	MAVAN								
26	ALHAM	29	FMAC								
27	PEARG	30	PEARG								
28	CASRA										
29	PRN										
29	CSHAM										
29	CAROC										
30	MANEW										
		MCZ		MAO		SLZ		VIX			
		DIA	NAVIO	DIA	NAVIO	DIA	NAVIO	DIA	NAVIO		
31	LBB	08	FMAN	24	FSAN	29	FMAN	30	INTRE		
31	ALEUR	27	FMAC	28	FLAM						
31	ALHAM										

QUADRO 2 - SCHEDULE DO NAVIO

FMAN	6	8	12	12	14	18	20	24	26	ALHAM	25	26	27	29	31
	FOR	MCZ	SEP	SSZ	SFS	RIG	SSZ	SUP	FOR		RIO	SSZ	PNG	ITJ	SSZ
LEBL	7	9	14	16	21	24	25			FSAN	11	13	16	24	
	RIG	SFS	SUP	FOR	SSA	SEP	SSZ				SSZ	SEP	SUP	MAO	
SEV	14	15	16	23	24	28	29			CASAN	21	24	25	31	
	RIO	SSZ	PNG	SFS	SSZ	SSA	SUP				SUP	RIO	SSZ	RIG	
CASMA	8	11	12	18	21	22	25			CSHAM	21	25	28	29	
	SUP	RIO	SSZ	RIG	SSZ	RIO	PEC				SSZ	SFS	PNG	SSZ	
SEEXP	11	13	15	16	17	20	23			CAFIN	5	9	15	16	
	RIO	SSZ	PNG	ITJ	SSZ	SSA	PEC				SUP	SSZ	SFS	SSZ	
MAVAN	19	20	21	24	25	28	31			ALBRA	12	15	22	23	
	RIO	SSZ	PNG	ITJ	SSZ	SSA	PEC				SUP	SSZ	SFS	SSZ	
FMAC	14	16	21	24	27	29				ALEUR	19	22	29	31	
	RDG	SFS	SUP	FOR	MCZ	SSA					SUP	SSZ	SFS	SSZ	
FLAM	14	16	19	20	22	28				FBEL	24	25	31		
	SSZ	SEP	SSA	SUP	FOR	MAO					SSZ	SEP	SUP		
CASNI	2	4	9	12	14	17				PRN	28	29	30		
	RIO	SSZ	RIG	SSZ	RIO	SUP					RIO	SSZ	PNG		
LBB	21	22	23	29	31					CASAU	28	31			
	RIO	SSZ	PNG	RIG	SSZ						SUP	RIO			
CASRA	17	20	25	28	29					MANEW	30	31			
	SUP	SSZ	RIG	SSZ	RIO						SSZ	PNG			
MAVAL	9	10	11	14	17					CAROC	25	29			
	SSZ	PNG	SFS	SSZ	SSA						SUP	SSZ			
PEARG	18	20	23	27	30					INTRE	30	31			
	SSZ	PNG	SFS	SSZ	SSA						SSZ	SEP			

QUADRO 3 - BALANÇO DE CONTÊINERES VAZIOS

DIA	NAVIO	PORTO	DC - 20	IN - 20	RF - 20	DC - 40	HC - 40	RH - 40
	Início	FOT	0	86	0	58	46	0
T6	FMAN	FOT	0	6	0	124	94	1
T16	LEBL	FOT	0	-202	0	234	212	6
T22	FLAM	FOT	0	-183	0	329	297	10
	Início	ITJ	91	21	3	156	115	6
T16	SEAXP	ITJ	361	-144	4	447	872	-285
T24	MAVAN	ITJ	451	-248	4	505	1164	-417
	Início	MAO	0	413	0	213	168	2
	Início	MCZ	0	0	0	0	0	0
T8	FMAN	MCZ	0	0	0	0	19	0
T27	FMAC	MCZ	0	2	0	2	68	0
	Início	PEC	0	34	3	24	25	95
T23	SEAXP	PEC	0	106	-8	-19	-1	233
	Início	PNG	0	33	1	9	66	5
T10	MAVAL	PNG	0	59	5	14	172	-7
T15	SEAXP	PNG	0	116	7	-43	293	-19
T23	LBB	PNG	0	194	9	-108	432	-35
	Início	RIG	0	191	26	348	225	24
T7	LEBL	RIG	0	72	24	565	462	40
T9	CASNI	RIG	0	-87	13	805	623	56
T18	FMAN	RIG	0	-184	13	1098	797	75
T25	CASRA	RIG	0	-324	13	1321	949	85
	Início	RIO	0	186	6	72	11	37
T2	CASNI	RIO	0	-2	14	60	-13	82
T11	CASMA	RIO	0	-275	25	51	-38	140
T19	MAVAN	RIO	0	-604	41	78	-61	216
T22	CASMA	RIO	0	-1061	60	98	-81	304
	Início	SEP	0	12	0	25	4	0
T12	FMAN	SEP	0	-1	0	-5	-47	0
T16	FLAM	SEP	0	-10	0	-25	-84	0
T24	LEBL	SEP	0	-26	0	-46	-96	0
	Início	SFS	571	234	1	157	82	355
T9	LEBL	SFS	1666	640	-4	417	-84	667
T15	CAFIN	SFS	2154	857	-7	700	-43	723
T22	ALBRA	SFS	2526	976	-13	922	-80	714
	Início	SLZ	0	34	0	4	2	0
	Início	SSA	0	138	18	175	82	122
T17	MAVAL	SSA	0	177	-33	129	111	90
T28	SEV	SSA	0	180	-70	-44	104	-16
	Início	SSZ	564	236	53	202	308	250
T4	CASNI	SSZ	1000	-506	103	69	353	432
T9	MAVAL	SSZ	1553	-1264	196	40	457	615
T15	SEV	SSZ	2005	-2065	288	-25	601	769
T22	LBB	SSZ	2401	-3012	372	-82	794	896
	Início	SUP	0	65	8	207	126	71
T5	CAFIN	SUP	0	49	7	374	89	98
T8	CASMA	SUP	0	56	1	488	57	120
T16	FSAN	SUP	0	160	-9	646	49	133
T24	FMAN	SUP	0	354	-16	838	-13	147
	Início	VIX	0	9	0	1	0	0
T30	INTRE	VIX	0	47	0	5	24	4

Considerações finais

O modelo proposto neste trabalho atingiu a meta desejada ao refazer os modelos apresentados por Barco (1998) e Oliveira et. al. (2001), a fim de que se tornassem mais adequados à realidade. O impacto dessas mudanças foi de uma complexidade além da demonstrada em outros modelos, principalmente na questão que se refere ao tratamento de duas passagens de um mesmo navio em um mesmo porto em dias diferentes e sobre a passagem de mais de um navio em um mesmo dia em um mesmo porto.

A avaliação das Variações do Modelo também foi bastante útil para a compreensão do modelo e do problema real, uma vez que a necessidade de refazer o

modelo matemático para ser mais adequado à realidade trouxe questões que não foram exploradas pelos trabalhos anteriores, como, por exemplo, o tempo de espera de contêineres até a sua disponibilidade de uso e a questão da disponibilidade da capacidade do navio, isso relacionado à continuidade da rota.

O modelo proposto neste trabalho mostrou ser mais adequado para a aplicação em casos reais do que os de trabalhos anteriores. Outra questão de relevância é o tamanho do modelo: apesar do baixo tempo de processamento, o número de parâmetros e variáveis envolvidos é extremamente grande. É possível, então, que o aumento excessivo do número de elementos dos índices levem a um modelo de porte não suportável em microcomputadores, dado o requerimento de armazenagem do modelo.

- Recebido em: 10.03.2005
- Aprovado em: 07.10.2005

Referências

- BARCO, B. L. **A logística do contêiner vazio**. 1998. 106f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Naval)-Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.
- BROOKE, A. et al. **GAMS user's guide**. GAMS Development Corporation, New York, 1998.
- CHOONG, S. T.; COLE, M. H.; KUTANOGLU, E. Empty container management for intermodal transportation networks. **Transportation Research**, Fayetteville, Arkansas, Part E 38, v.38, n.6, p.423-438, Feb. 2002.
- CRAINIC, T. G.; DEJAX, P.; GENDREAU, M. Modelling the container fleet management problem using a stochastic dynamic approach. Centre de Recherche sur les transports – **Publication #685**, Fayetteville, Arkansas, Feb. 1990.
- CRAINIC, T. G.; DEJAX, P. J.; GENDREAU, M. Dynamic and stochastic models for the allocation of empty containers. **Operational Research**, Fayetteville, Arkansas, v.41, n.1, p.102-126, Jan./Feb. 1993.
- DEJAX, P. J.; CRAINIC, T. G. **Models for empty freight vehicle transportation logistics**. In: EURO VIII. Lisbon, Portugal, Sept. 1986.
- DEJAX, P. J.; CRAINIC, T. G. A review of flows and fleet management models in freight transportation. **Operations Research Society of America**, v.21, n.4, p.227-247, 1997.
- GEOFFRION, A. M. The purpose of mathematical programming is insight, not numbers. **Interfaces**, Minnesota, v.7, n.1, p.81-93, Jan./Feb. 1976.
- HINO, C. M. **Métodos heurísticos para elaboração de planos de estivagem de navios porta-contêineres**. 1999. 221f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Naval)-Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.
- KOPICKY, R. J. et al. **Reuse and recycling: reverse logistics opportunities**. Council of Logistics Management, 2803, 1993. Butterfield Road Oak Brook, IL 60521.

- LAI, K. K.; LAM, K.; CHAM, W. K. Shipping container logistics and allocation. **Journal of the Operational Research Society**, Florida, v.46, n.6, p.687-697, 1995.
- MENDES, A. B.; FERNANDES, M.; ONO, R. T. **Transporte marítimo internacional de contêineres**. 2001. Trabalho final apresentado à disciplina Pro-5810, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.
- OLIVEIRA, R. C. F. et al. **A logística do contêiner vazio**: adaptação e melhoria. 1998. 41f. Trabalho de formatura para obtenção do título de Engenheiro Naval, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.
- OLIVEIRA, M. C. et al. Sistema de injeção em fluxo espectrofotométrico para monitorar peróxido de hidrogênio residual em processo de fotodegradação por reação foto-Fenton. **Química Nova**, v.24, n.2, p.188-190, 2001.
- ONO, R. T. **Estudo de viabilidade do transporte marítimo de contêineres por cabotagem na costa brasileira**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Naval)-Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.
- ROBINSON, G. L. **Sistema de controle e gerenciamento de contêineres em terminais marítimos**. 1986. 134f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Naval)-IME, Rio de Janeiro, 1986.
- SAMPAIO, L. M. D. **Alocação de contêineres vazios para a logística reversa do transporte de carga**. 2001. 175f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Naval)-Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.
- SOUZA, A. A. R. **Terminais de contêineres/unitização**. Relatórios Internos. Rio de Janeiro: Câmara Brasileira de Contêineres, 1998.
- VELASCO, L. O. M.; TEIXEIRA, L. E. Logística e contêineres no Brasil. **Informe Infra-Estrutura BNDES**, Rio de Janeiro, n.26, maio 1998.
- WHITE, W. W. Dynamic transshipment network: an algorithm and its application to the distribution of empty containers. **Networks**, n.2, p.211-236, 1972.

