

MÉTODOS PARA ELABORAÇÃO DE PLANOS DE ESTIVAGEM DE NAVIOS PORTA-CONTÊINERES

Botter, R. C. e Brinati, M. A.
Departamento de Eng. Naval e
Oceânica da EPUSP

RESUMO

Neste trabalho são mostrados métodos para a elaboração de planos de estivagem de navios porta-contêineres. Inicialmente é mostrado o modelo matemático completo, onde cada variável binária define, para cada porto da rota, a sequência de carga e descarga dos contêineres. Devido ao tamanho do problema combinatório gerado, foram elaborados dois modelos matemáticos simplificados, que se diferenciam pelo nível de agregação dado aos contêineres e células do navio. Nestes modelos simplificados são utilizados procedimentos de separação e hierarquização, que dão origem a dois subproblemas: de designação e de sequenciamento. A solução do primeiro subproblema mostra a fotografia da ocupação das células do navio (no primeiro modelo simplificado) ou das "bays" do navio (no segundo modelo simplificado) ao final das fases de descarregamento e carregamento em cada porto. A solução do segundo subproblema mostra a sequência ótima de carregamento e descarregamento dos contêineres ou dos lotes correspondentes às "bays" entre duas fotografias consecutivas. As características principais do modelo matemático completo são usadas para o desenvolvimento de um procedimento baseado em enumeração implícita.

ABSTRACT

The purpose of this paper is to show methods for solving the container stowage problems. Firstly, a mathematical programming model for the problem is shown; the binary decision variables define, for each port of the route, the container unloading and loading sequence. Because of the size of the corresponding combinatorial model, two aggregated and hierarchized versions of the complete model are developed. At each version, the original problem is separated into two subproblems: assignment subproblem and sequencing subproblem. The solution of the first one gives pictures of container cell occupation (version 1) or bays occupation (version 2) at the end of unloading and loading phases at each port. The solution of the second subproblem shows the optimal loading and unloading sequence between two successive pictures. The basic features of the complete mathematical model are used for the development of an implicit enumeration procedure.

1 - INTRODUÇÃO

O plano de estivagem de um navio porta-contêineres consiste na elaboração de uma sequência de descarregamento e carregamento dos contêineres no longo dos portos da rota, levando a atender as

restrições técnicas e operacionais da embarcação e também proporcionar a redução de custos associados. Estes custos dependem basicamente do número de contêineres reestivados na rota, mas também podem ser afetados pela quantidade de lastro transportado pela embarcação e pela movimentação longitudinal do portêiner nas operações de carga e descarga nos portos.

Se durante o processo de descarregamento num dado porto, um contêiner com destino um porto futuro for removido da embarcação para permitir o descarregamento de outros contêineres, este deverá ser recolocado a bordo novamente. Isto consiste na reestivagem do contêiner.

Desde a década de 70, as companhias de navegação e diversos pesquisadores têm procurado desenvolver métodos para a elaboração de planos de estivagem navios porta-contêineres. Estes métodos podem ser agrupados em cinco classes:

- simulação (Nerling [1] e Shileds [2]);
- heurísticas (Webster [3], Beliech [4] e Thieu [5]);
- sistemas de apoio à decisão (Sha [6], Baraúna [7] e Saginaw [8]);
- programação matemática (Scott [9] e Aslidis [10 e 11]);
- inteligência artificial (Dillingham [12]).

A modelagem matemática desenvolvida parte de um modelo bastante detalhado e procura, usando procedimentos de agregação, separação e hierarquização, um modelo que pode ser empregado em navios de porte comercial, usando-se os programas e equipamentos disponíveis na Universidade de São Paulo. O produto final do trabalho é um algoritmo baseado em enumeração implícita, que prepara o plano de estivagem no navio usando uma árvore combinatória estruturada de acordo com o modelo matemático completo e mais detalhado, que é explorada de acordo com a solução do modelo matemático mais agregado.

2 - A MODELAGEM MATEMÁTICA

No modelo matemático completo cada contêiner e cada célula do navio são tratados individualmente e o plano de estivagem do navio é elaborado por meio do exame de cada uma das operações de carregamento e descarregamento da embarcação ao longo dos portos da rota, que pode ser visto como uma sucessão de estágios individuais de carga e descarga. Todos os possíveis estágios de movimentação de contêineres são considerados, isto é, admite-se que em cada porto da rota todos os contêineres a bordo do navio possam ser descarregados.

As variáveis de decisão do modelo completo são:

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{se o contêiner } i \text{ é carregado na célula } j \text{ no estágio } k; \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$y_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{se o contêiner } i \text{ é descarregado da célula } j \text{ no estágio } k; \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

A função objetivo e as restrições são escritas em função das variáveis de decisão acima definidas. Em virtude do tamanho excessivo (cerca de 10^9 variáveis de decisão e 10^6 restrições para um navio com capacidade de 1000 contêineres), o modelo não pode ser resolvido usando os programas e equipamentos disponíveis.

Para reduzir o tamanho do modelo matemático completo, foram usados procedimentos de agregação, separação e hierarquização. Com relação ao nível de agregação, um primeiro modelo reduzido foi elaborado, onde somente os contêineres são agrupados em classes definidas por comprimento, peso, tipo de carga, origem e destino; as células do navio são consideradas individualmente. No segundo nível de agregação, os contêineres são agrupados em classes de peso e as células são agrupadas em "bays", que representam metade de um porão do navio.

Nos dois modelos reduzidos, o problema de estivagem de navios porta-contêineres é separado em dois subproblemas: o de designação e o de sequenciamento. O subproblema de designação das classes de contêineres às células, dá uma fotografia da ocupação do navio ao final de cada fase de carregamento e descarregamento nos portos da rota e o subproblema de sequenciamento determina a ordem de carga e descarga dos contêineres entre duas fotografias de ocupação sucessivas. Usando estes procedimentos de separação e hierarquização, o problema de estivagem original é substituído por um subproblema de designação e $2(n-1)$ subproblemas de sequenciamento, onde n é o número de portos da rota.

As variáveis de decisão do subproblema de designação do primeiro submodelo reduzido são:

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{se o contêiner da classe } i \text{ é carregado na célula } j \\ & \text{durante a fase de carregamento } k; \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$y_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{se o contêiner da classe } i \text{ é descarregado da célula } j \\ & \text{durante a fase de descarregamento } k; \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

As variáveis de decisão do subproblema de sequenciamento do primeiro submodelo reduzido são:

$$z_{jk} = \begin{cases} 1, & \text{se um contêiner é colocado (retirado) da célula } j \\ & \text{no estágio } k; \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

Note-se que o primeiro modelo reduzido, onde pretende-se minimizar o número de reestivagens na rota do navio, é bastante semelhante ao modelo completo. O mesmo não acontece no segundo modelo reduzido, onde a minimização do número de reestivagens de contêineres é feita de forma indireta no subproblema de designação. Neste caso, busca-se inicialmente proibir ou pelo menos reduzir a mistura de contêineres com destinos diferentes numa mesma "bay"; em seguida busca-se designar para "bays" de um mesmo porão contêineres com mesmo destino.

As variáveis de decisão do subproblema de designação do segundo modelo reduzido são:

x_{ijk} é a fração da "bay" k ocupada com contêineres cuja origem é o porto "i" e o destino é o porto "j"; e

$$z_{ijk} \begin{cases} 1, & \text{se a "bay" } k \text{ contém algum contêiner com destino ao porto } j, \\ & \text{na viagem do navio entre o porto } i \text{ para o porto } i+1; \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

Por meio de restrições que relacionam as variáveis acima definidas busca-se a minimização do número de reestivagens ao longo da rota. O subproblema de sequenciamento do primeiro e segundo modelos reduzidos são semelhantes.

3 - O ALGORÍTMO DE ENUMERAÇÃO IMPLÍCITA

Neste algoritmo, a árvore combinatória é estruturada de acordo com o modelo matemático completo, onde um dado caminho corresponde a designar valores "1" a um sub-conjunto de variáveis de decisão x_{ijk} e y_{ijk} . Em cada vértice da árvore, as restrições do problema de estivagem são checadas e se violadas, o vértice é abandonado, o que ocorre também se o vértice for viável, mas o limite inferior projetado para a função objetivo dele for maior que a melhor solução completa até o momento obtida no processo exploratório. Visto que o exame de todos os caminhos pode requerer um tempo de processamento muito grande, foram introduzidas heurísticas para examinar em primeiro lugar os caminhos que podem conduzir a boas soluções. As primeiras ramificações da árvore a serem examinadas são baseadas nos resultados do segundo modelo reduzido, referenciado na seção anterior.

Maiores detalhes sobre os modelos matemáticos e sobre o algoritmo enumeração implícita podem ser encontrados em Botter (13 e 14).

BIBLIOGRAFIA

- 1) NEHRLING, B. C. Computer ship loading and unloading simulation. Ann Arbor, Department of Naval Architecture and Marine Engineers, College of Engineering, University of Michigan, 1970.
- 2) SHIELDS, J. J. Containership stowage: a computer-aided preplanning system. *Marine Technology*, Vol. 21, nº 4, p.370-83, Oct. 1984..14)
- 3) WEBSTER, W. C.; VAN DYKE. P. Automated procedures for the allocation of containers on shipboard. Presented at Computer Aided Ship Design Engineering Summer Conference, Ann Arbor, 1970
- 4) BELIECH, D. E. A proposed method for efficient pre-load planning for containerized cargo ships. Monterey, 1974. 85p. Thesis (Master of Science) - U. S. Naval Postgraduate School.
- 5) THIEU, T. Q. A programmed loading procedure for containerized cargo ships. Monterey, 1975. 98p. Thesis (Master of Science) - U. S. Naval Postgraduate School.
- 6) SHA, O. P. Computer Aided on board container management. In: BANDA, P.; KUO, C.; I FILIPPO, G., ed. Computer applications in the automation of Shipyard operation and ship design V, Amsterdam, North Holland, p. 177-87, 1985.
- 7) BARAÚNA VIEIRA, C. L. B.; PIRES, F. C. M.; CONCEIÇÃO, C.A.L. Planejamento e controle de movimentação de contêineres. 12º Congresso Nacional de Transportes Marítimos e Construção Naval, Rio de Janeiro, out., 1988. Volume 1, pag. 149.
- 8) SAGINAW II, L. and PERARKIS, A. N. A decision support system for containership stowage planning. *Marine Technology*, Vol 26, No. 1, p. 47-61, Jan. 1989.
- 9) SCOTT, D. K. and CHEN, D. S. A loading model for a container ship. Los Angeles, s. ed., 1978.
- 10) ASLIDIS, A. H. Optimal container loading. Cambridge, Mass., 1984. Thesis (Master of Science). Massachusetts Institute of Technology.
- 11) ASLIDIS, A. H. Combinatorial algorithms for stacking problems. Cambridge, Mass., 1989. Thesis (Doctor of Philosophy). Massachusetts Institute of Technology.
- 12) DILLINGHAM, J.; DUMBLETON, J. An Expert System for Container Stowage Planning. In: *Ship Technology and Research (STAR) Symposium/SNAME Spring Meeting*, New Orleans, 1989. Proceedings. Jersey City, Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1989. p.S2-2-1/S2-2-13.
- 13) BOTTER, R. C. Métodos para elaboração de planos de estivagem de navios porta-contêineres. Tese de Doutoramento, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1992.
- 14) BOTTER, R. C. E BRINATI, M. A. Stowage Container Planning: A Model for Getting an Optimal Solution. Computer Applications In the Automation of Shipyard Operation and Ship Design VII, september, 1991, Rio de Janeiro, pp. 193-206.