



SPOLM 2008

ISSN 2175-6295

Rio de Janeiro- Brasil, 05 e 06 de agosto de 2008.

PROPOSTA HEURÍSTICA DE RESOLUÇÃO DO PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE NAVIOS EM BERÇOS USANDO ALGORITMOS GENÉTICOS

Vanina Macowski Durski Silva

Universidade Federal de Santa Catarina / CNPq
Rua Apeninos n° 38 – Córrego Grande - CEP: 87301-620 - Florianópolis-SC
vaninadurski@gmail.com

Antônio Sérgio Coelho

Eng^a. de Produção e Sistemas – Trindade – CEP: 88040-970 - Florianópolis-SC
coelho@deps.ufsc.br

Sérgio Fernando Mayerle

Eng^a. de Produção e Sistemas – Trindade – CEP: 88040-970 - Florianópolis-SC
mayerle@deps.ufsc.br

RESUMO

O presente artigo caracteriza-se pela apresentação de alguns dos problemas portuários, enfatizando o Problema de Alocação de Navios em Berços, para o qual se propõe um modelo heurístico de resolução. A heurística proposta baseia-se nos Algoritmos Genéticos e tem por objetivo tornar possível o aprendizado deste assunto, além de instigar o leitor a implementar uma ferramenta computacional baseada nesta heurística para resolver o problema de maneira prática e eficiente.

Palavras-Chaves: Algoritmo genético; Problema de alocação de berços; Competitividade.

ABSTRACT

This paper presents some port problems, emphasizing the Berth Allocation Problem, where is suggested a heuristic model for resolution. The suggested tool is based on the Genetic Algorithms and aim to make possible the agreement of this subject, beyond to instigate the reader to implement a computational tool based on this heuristic to solve the problem in a practical and efficient way.

Keywords: Genetic Algorithms; Berth Allocation Problem; Competitiveness.

1. INTRODUÇÃO

A gestão de um complexo portuário implica em uma diversidade de problemas de tomada de decisão, os quais podem ocorrer nos níveis: estratégico, tático e operacional. Diversos são os problemas operacionais e métodos abordados na literatura técnica, porém voltados para o dimensionamento de berços de atracação compatível com uma demanda esperada de embarcações. Outros estudos buscam a simulação de operações considerando custos, investimentos e encargos, ou seja, voltam-se para uma sistemática de dimensionamento econômico operacional de terminais de contêineres (FERNANDES, 2001).

Segundo Silva e Coelho (2007), percebe-se uma lacuna a ser ainda explorada no que se refere à pesquisa e métodos para um dos problemas operacionais de grande relevância encontrado no sistema portuário: o problema de alocação dos navios em berços (PAB).

Sendo assim, o artigo será dividido em 4 capítulos, incluindo este introdutório. No capítulo 2 será apresentado o transporte como desenvolvedor econômico, salientando especificamente o transporte marítimo e, também, informações sobre a operação portuária, bem como o problema de estudo deste artigo.

No Capítulo 3 é apresentado o método heurístico proposto para a resolução do PAB, para o qual foram identificadas as principais variáveis envolvidas com a problemática. Este modelo desenvolvido visa determinar uma seqüência de alocação de navios em berços de modo a minimizar o tempo total de atendimento dos navios bem como o custo operacional. Por fim, no Capítulo 4, são apresentadas as considerações finais, conclusões e recomendações para estudos futuros.

2. CONTEXTUALIZAÇÃO E VISÃO SISTÊMICA DO SISTEMA DE TRANSPORTE MARÍTIMO

De acordo com Novaes (2004) a distribuição dos produtos desde as fábricas até os centros atacadistas ou varejistas pode ser realizada através de modalidades de transportes diversas: rodovia, ferrovia, transporte aquaviário, aéreo, e dutos para casos especiais (gás, gasolina, óleo diesel, álcool).

Assim, os investimentos em transportes como, de resto, em qualquer projeto, devem ser precedidos de estudos de viabilidade técnico-econômica. Para isso, torna-se necessário uma criteriosa análise comparativa dos custos e benefícios do projeto (PEIXOTO, 1977).

2.1. IMPORTÂNCIA DO TRANSPORTE MARÍTIMO E DOS PORTOS

O transporte aquaviário envolve todos os tipos de transporte efetuado sobre a água. Inclui o transporte fluvial e lacustre (aquaviário interior) e o transporte marítimo (NOVAES, 2004).

Conforme Peixoto (1977) o progresso tecnológico e o crescimento da população mundial importarão num grande aumento da demanda de alguns itens e assim, é possível se observar no

Gráfico 1 (ver apêndice) que tanto o volume exportado quanto o volume importado apresentaram crescimento significativo.

Para atender, portanto toda a demanda que irá surgir, o transporte marítimo deve concentrar esforços para reparar a deficiência nos transportes que vem se acentuando nas últimas décadas, seja na construção de novos portos ou restauração dos existentes, na construção de estaleiros, na troca da frota mercante, treinamento de mão-de-obra ou até mesmo na busca da otimização dos atuais sistemas de controle de operação dos portos, dentre outros, os quais têm sido obstáculos à expansão econômica do país.

Para adequar os portos antigos aos novos métodos de operação das cargas, são

necessários grandes investimentos, com o propósito de reduzir a permanência do navio no porto, de forma a maximizar a sua utilização pelo armador e baratear as operações através da mecanização. Onde os investimentos não ocorrem, a operação de carga e descarga dos navios é lenta, os custos são altos e as perdas são elevadas.

2.2. OPERAÇÕES PORTUÁRIAS

2.2.1. Alguns Problemas Encontrados no Porto

Diversos são os problemas enfrentados nos porto, sendo alguns deles relacionados abaixo:

- Problema de aquisição e/ou locação de equipamentos;
- Problema de alocação de equipamentos aos serviços do porto;
- Problema de dimensionamento de berços;
- Problema de *layout* do porto;
- Problema de alocação de navios em berços.

De acordo com Nishimura et al. (2001), em sua maioria, os berços nos grandes portos são arrendados, ou seja, alugados pelos operadores dos navios para o processamento de contêineres para alcançar maior produtividade.

Neste contexto, é interessante limitar o número de berços operantes. A alocação de navios neste sistema, isto é, a atribuição de berços aos navios que aportam para a manipulação de cargas, torna-se importante na minimização do tempo de realização desta tarefa; devido o tempo de manipulação para um específico navio não ser necessariamente o mesmo para cada berço.

2.2.2. Definição do Problema de Alocação

Conforme Guan et al. (2004), considera-se o problema de alocar espaço nos berços para navios em terminais portuários, como sendo o problema de alocação de berços. Na definição de Moon (2000) o problema consiste em determinar o momento da atracação e as posições de cada navio no terminal portuário. Uma definição mais completa é que o problema consiste em determinar o plano de alocação dos navios que atracam no porto aos berços, de modo que cada navio seja alocado em um berço em um período de tempo para realizar as atividades de carga e descarga de mercadorias no intuito da redução dos custos operacionais.

Devido o espaço dos berços ser muito limitado e milhares de contêineres serem manipulados diariamente, uma efetiva alocação de berços torna-se crítica para o eficiente gerenciamento do fluxo de tráfego de contêineres. Quando não existe espaço disponível no berço, o navio precisa aguardar para atracar e, este tempo deve ser o menor possível, pois o navio parado desnecessariamente gera atrasos nos prazos de entrega, além de custos extras (Pesquisa Aquaviária CNT, 2006).

Contudo, a posição de atracação é também uma variável de decisão muito importante pelas seguintes razões. Os contêineres a serem carregados em navios geralmente chegam ao porto alguns dias antes da chegada dos navios no porto. Assim, se um navio é atracado em uma localização próxima ao local de armazenagem dos contêineres a serem carregados no navio, o custo de entrega dos contêineres pelos caminhões ou outro equipamento de transporte interno no porto, pode ser minimizado tendo em vista que a distância percorrida será inferior à distância caso o local de armazenagem dos contêineres se posicionasse distante do berço de atracação.

2.2.3. Formulação Matemática do PAB

Dentre as formulações encontradas no levantamento bibliográfico, destaca-se a de Imai et al. (2001), a qual foi desenvolvida primeiramente para o modelo estático, ou seja, quando se considera que todos os navios já chegaram ao porto, para posteriormente efetuar a alocação de cada um deles em um dos berços disponíveis, sempre respeitando as restrições.

Posteriormente os autores resolveram o mesmo problema utilizando o modelo

dinâmico, no qual se considera que é sabido antecipadamente o momento de chegada de cada navio e que, os mesmos não chegam ao porto antes dos berços aos quais serão atribuídos, estarem disponíveis.

Na formulação do PAB dinâmico definem-se as variáveis binárias x_{ijk} para especificar se o navio j deve ser atendido como o k -ésimo navio no berço i como segue:

$$\text{Minimize } \sum_{i \in B} \sum_{j \in V} \sum_{k \in O} \{(T - k + 1) \cdot C_{ijk} + S_i - A_j\} \cdot x_{ijk} + \sum_{i \in B} \sum_{j \in W_i} \sum_{k \in O} (T - k + 1) \cdot y_{ijk} \quad (1)$$

Sujeito à:

$$\sum_{i \in B} \sum_{k \in O} x_{ijk} = 1 \quad \forall j \in V, \quad (2)$$

$$\sum_{j \in V} x_{ijk} \leq 1 \quad \forall i \in B, k \in O, \quad (3)$$

$$\sum_{l \in V} \sum_{m \in P_k} (C_{il} x_{ilm} + y_{ilm}) + y_{ijk} - (A_j - S_i) \cdot x_{ijk} \geq 0 \quad \forall i \in B, j \in W_i, k \in O, \quad (4)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in B, j \in V, k \in O, \quad (5)$$

$$y_{ijk} \geq 0 \quad \forall i \in B, j \in V, k \in O \quad (6)$$

Onde:

$i (= 1, \dots, I) \in B$	conjunto de berços,
$j (= 1, \dots, T) \in V$	conjunto de navios,
$k (= 1, \dots, T) \in O$	conjunto de ordens de serviço,
S_i	momento quando o berço i se torna disponível para o planejamento da alocação de berços,
A_j	momento de chegada do navio j ,
C_{ij}	tempo de manipulação gasto pelo navio j no berço i ,
x_{ijk}	1 se o navio j é atendido como o k -ésimo navio no berço i 0 em caso contrário.
P_k	subconjunto de O tal que $P_k = \{p / p < k \in O\}$,
W_i	subconjunto de navios com $A_j \geq S_i$,
y_{ijk}	momento disponível do berço i entre a partida do k -ésimo navio e a chegada do k -ésimo navio quando o navio j está sendo atendido como o k -ésimo navio.

A função objetivo (1) minimiza o tempo total de espera e de manipulação para cada navio. O conjunto de restrições (2) garante que cada navio deve ser atendido em algum berço em uma ordem de serviço (ordem de atendimento). O conjunto de restrições (3) garante que cada berço atenda no máximo um navio por vez.

Considerando que o sistema é estático, $S_i \geq A_j$, ou seja, os navios sempre chegarão antes do momento de liberação do berço. As restrições (4) garantem que os navios devem ser atendidos depois de sua chegada.

Posteriormente foi proposta uma heurística para o problema, devido o mesmo não poder ser resolvido em tempo polinomial, empregando o método da otimização do sub-gradiente, baseado na relaxação Lagrangeana do problema original - PAB dinâmico.

2.2.3.1. Técnicas Propostas Para a Resolução do PAB

A maioria dos estudos dos portos foca a atenção nos problemas estratégicos e táticos.

Como a maioria dos berços é operada por companhias de navegação particulares, poucos estudos têm sido conduzidos na alocação de navios em berços (Imai et al., 2001). De acordo com Dai et al. (2004) o que existe é um grande volume de estudos de aplicações da pesquisa operacional sobre operações de contêineres. Na Tabela 1 é apresentada a relação de algumas pesquisas encontradas na literatura para a resolução do PAB:

Pesquisador	Ano	Trabalho
Brown et. al	1994, 1997	Problema de alocação em portos navais
Lim	1998	Problema bidimensional de empacotamento
Moon	2000	Programação linear inteira
Imai, Nishimura e Papadimitriou	2001	Relaxação lagrangeana
Nishimura, Imai e Papadimitriou	2001	Algoritmos genéticos
Park e Kim	2003	Otimização do subgradiente, programação dinâmica
Kim e Moon	2003	Simulated annealing

Tabela 1 – Bibliografia encontrada sobre o PAB

Ainda outros estudos que buscam a solução para o PAB são de Park e Kim (2003), Dai et al. (2004), Guan e Cheung (2004) e, Mulato e Oliveira (2006).

3. PROPOSTA DE RESOLUÇÃO DO PAB

3.1. VISÃO GERAL DO MÉTODO PROPOSTO

Semelhante à série de estudos de Imai, Nishimura e Papadimitriou (2001, 2003), o intuito desta pesquisa é propor uma ferramenta alternativa para a resolução do PAB, diferenciando-se dos demais estudos encontrados no que se trata da inserção de variáveis relacionadas a custos de operação, que são realizados na prática, tornando o modelo o mais próximo da atividade praticada nos portos. Tem-se como exemplo, a inclusão do custo de estadia (o custo da diária) de um navio no porto, o qual é de grande relevância na tomada de decisão.

Na prática sabe-se que um porto recebe embarcações de diversos portes, portanto, cobrando-se diferentes taxas de estadia. Em um levantamento realizado junto ao Porto de Itajaí (SC) obteve-se a informação de que a diária de um navio no porto situa-se próximo a US\$ 15.000,00. Desta maneira, provavelmente, será mais viável atender um navio de grande porte primeiramente, deixando os navios de pequeno porte para segundo plano, a fim de se evitar alto custo de permanência no porto.

Portanto, nesta pesquisa considera-se alguns parâmetros julgados como sendo de grande relevância para a resolução do PAB, propondo-se uma metodologia de resolução de fácil implementação e que pode proporcionar bons resultados.

3.2. PARÂMETROS PARA RESOLUÇÃO DO PAB

A fim de retratar o funcionamento portuário quanto ao plano de atracação é preciso determinar alguns parâmetros pertinentes ao problema, para que o mesmo se aproxime ao máximo do problema real encontrado nos portos.

3.2.1. Custos (Navio e Porto)

O sistema portuário, por suas responsabilidades e atividades, envolve diversos custos em sua operação. Primeiramente, custos da construção do terminal, em seguida, custos com aquisição de caminhões, com aquisição de equipamentos, despesas com mão de obra, com combustíveis, dentre outros. Como o foco desta pesquisa é o problema de alocação de navios em berços, apenas serão considerados os custos portuários operacionais.

Para o desenvolvimento deste artigo consideraram-se as tarifas de atracação e de

movimentação de cargas, as quais foram julgadas como sendo de maior impacto na formação do custo operacional portuário.

A tarifa de atracação é cobrada por metro linear de cais ocupado por embarcação atracada e por período ou fração de horas. Alguns portos adotam a nomenclatura 'período' para designar certa quantidade de horas corridas desde o momento de atracação do navio em um dado berço, até sua liberação do mesmo. Por exemplo: o porto de Santos (SP) utiliza como sendo 'um' período, seis horas corridas. Assim, se um navio permanecer atracado em certo berço por sete horas, estará pagando a tarifa de atracação referente a dois períodos, pois ultrapassou o limite de seis horas de um único período.

A tarifa de movimentação de cargas é cobrada em função do movimento realizado pela embarcação. Esta tarifa pode ser cobrada tanto por toneladas movimentadas, como por contêineres, porém deve-se definir o critério de cobrança no ato da negociação entre o armador e o porto.

Estas duas tarifas são consideradas as tarifas principais cobradas pela utilização da infra-estrutura portuária, havendo ainda as tarifas cobradas pela utilização da infra-estrutura terrestre e por serviços gerais.

3.2.2. Restrições

Dentre as diversas restrições influentes no processo decisório de atracação de certo navio, destacam-se: temporal, de calado, de comprimento de equipamentos e de agendamento de navios.

Com relação à restrição temporal é preciso considerar o momento de chegada de um navio no porto, bem como o momento de liberação dos berços. Por liberação de berço, entende-se o momento em que um navio deixa um berço, liberando-o para receber outro navio. Na prática, os portos consideram um intervalo de tempo entre o momento de liberação do berço e uma nova atracação no mesmo. Este intervalo é utilizado para se preparar o berço para a atracação seguinte, seja retirando ou reposicionando equipamentos, realocando mão de obra, etc. O porto de Itajaí considera este intervalo como sendo de duas horas.

A restrição de calado é responsável em avaliar se a profundidade do berço é superior ao calado do navio para que permita uma navegação sem problemas. Normalmente o valor do calado do navio representa 70% do valor da profundidade do berço, isto para maior segurança na atracação.

A restrição de comprimento deve verificar se o comprimento do berço é superior ao comprimento do navio para que permita o navio atracar no mesmo.

Quanto aos equipamentos, é preciso avaliar se os prováveis berços (os quais já atenderam as restrições anteriores) a receberem um dado navio possuem equipamentos apropriados para a operação de carga e descarga de mercadorias. Supondo que certo berço atendeu as restrições de comprimento e profundidade e, também está desocupado, já considerado o período de intervalo necessário entre a liberação de um navio e a atracação de outro; ainda assim, é necessário verificar se neste berço constam equipamentos aptos a atenderem as necessidades do navio candidato à atracação, pois dependendo da espécie de mercadoria, diferentes equipamentos serão exigidos. Para este estudo foi considerado que todos os berços possuem equipamentos disponíveis para qualquer tipo de navio a ser operado.

A restrição de agendamento a ser considerada neste estudo tem o intuito de garantir que o escalonamento dos navios ocorra de duas formas possíveis: por menor data de liberação dos navios ou por menor custo de alocação. Em alguns casos, e dependendo do tipo de mercadoria a ser manipulada, é conveniente efetuar a operação de carga/descarga no menor período de tempo possível; principalmente em casos de produtos perecíveis, onde o fator tempo tem papel fundamental no prazo de validade dos mesmos, mesmo que para isso a alocação tenha um custo superior.

Já em outros casos, geralmente para produtos não perecíveis, como minérios, ferro, alumínio, é mais conveniente garantir que a alocação tenha o menor custo possível para não encarecer a mercadoria. Assim, provavelmente, o navio irá permanecer em espera para

atracação por um período de tempo maior, porém com um custo de alocação provavelmente inferior ao custo que teria caso optasse por alocar pelo critério de menor data de liberação.

3.2.3. Variáveis de Decisão (Quando e Quanto Alocar Cada Navio)

A administração do porto, tendo em seu poder uma lista de navios a atracar em um dado período de tempo, uma semana, uma quinzena ou um mês, deve realizar o plano de atracação, ou seja, criar um sistema de agendamento dos navios de modo a garantir que todos os navios sejam atendidos no menor período de tempo ou menor custo possível. Para isso é necessário averiguar se todas as restrições são satisfeitas para o escalonamento se iniciar.

O plano de atracação deve ser capaz de alocar os navios aos berços da melhor maneira possível, ou seja, determinar em 'qual' berço deverá atracar cada navio, bem como 'o momento' de atracação, analisando se houve tempo de espera por parte de cada navio, contabilizando custos a fim de otimizar o sistema operacional portuário para, no final do escalonamento, determinar um conjunto de berços atendendo a um conjunto de navios atracados em diferentes momentos, com capacidades, tarifas bem como produtividade, diferenciadas.

Como a atividade portuária envolve a chegada e saída diária de diversos navios (porto de Roterdã, recebe em média 60 navios), bem como a utilização de vários berços (Roterdã atua com cinco áreas para atracação mais duas áreas para atracação de emergência), o agendamento dos navios muitas vezes pode ser moroso, necessitando utilizar-se da Tecnologia de Informação (TI).

3.3. ALGORITMO HEURÍSTICO DE ALOCAÇÃO

Buscando propor um método de fácil implementação e que pode proporcionar bons resultados para a resolução do PAB, um algoritmo heurístico é sugerido para a alocação dos berços aos navios.

Inicialmente se propõe um algoritmo simplificado que seja capaz de analisar uma lista de navios (cada qual contendo informações de momento de chegada, calado, carga, comprimento e tarifas diferenciadas), e uma lista de berços (com informações sobre o momento de liberação, intervalo considerado, profundidade, comprimento, produtividade, tarifas) para em seguida, verificar se as restrições impostas pelos mesmos são satisfeitas e, posteriormente, alocar cada navio em um dado berço.

A lista de navios a serem atracados, não necessariamente é informada conforme o horário de chegada e assim, o algoritmo tem como critério para alocação verificar o último momento de liberação de um dado berço, somar o período de intervalo a ser considerado (de duas horas, no caso do porto de Itajaí), para em seguida alocar um navio neste dado berço.

Supondo uma lista com dois navios a serem atracados, conforme a Tabela 2:

Identificação do Navio	Comprimento	Calado	Carga	Momento de Chegada	Custo de ficar Parado
n1	220	14	150	18/8/2007 17:00	2.000,00
n2	210	14	125	18/8/2007 12:30	1.700,00

Tabela 2 – Exemplo de lista de navios a serem atracados

Fonte: do autor

E uma lista de dois berços existentes, conforme a Tabela 3:

Identificação do Berço	Comprimento	Profundidade	Produtividade (contêiner/hora)	Momento de Liberação	Tarifa de Atracação	Tarifa de Movimentação (por contêiner)
b1	260	16	50		2,50	45
b2	250	13	45		2,30	45

Tabela 3 – Exemplo de lista de berços a serem ocupados

Fonte: do autor

Ao se efetuar o agendamento dos navios, percebe-se que o berço b2 não atende a restrição de calado, pois ambos os navios necessitam de 14 metros para atracação e o berço b2 possui apenas 13 metros de profundidade. Deste modo, ambos terão de ser atendidos pelo berço b1, o qual atende as restrições de comprimento e profundidade.

Como a lista de navios inicia-se pelo navio n1 cujo momento de chegada é às 17:00 h, este deverá ser o primeiro navio a ser alocado. É válido citar que este é o critério considerado nesta pesquisa, podendo ser alterado de autor para autor, ou seja, poderia inicialmente ser ordenada a lista de navios conforme o momento de chegada, para posteriormente realizar-se o escalonamento.

Neste exemplo também é considerado o momento de liberação de ambos os berços como sendo livre para efetuar o escalonamento a qualquer momento, ou seja, um navio pode ser atracado em qualquer um dos berços a partir do momento de sua chegada (isso se as restrições forem satisfeitas).

Parte-se então do navio n1 que tem seu momento de chegada às 17:00 h. Como já foi citado, será atendido pelo berço b1, no exato momento de sua chegada. Como possui 150 toneladas de mercadoria a ser descarregada e o berço b1 possui uma produtividade de 50 toneladas por hora, este navio b1 levará 3 horas para ser atendido, portanto, encerrando suas atividades no porto às 20:00 h. A partir deste momento é acrescido o período de intervalo de duas horas (neste exemplo) para que o berço receba o tratamento necessário a estar apto a receber o próximo navio, por volta das 22:00 h.

Neste horário, o navio n2 atraca no b1 para ser atendido e, possuindo 125 toneladas para serem manipuladas, encerrará seu atendimento às 00:30 h, liberando o berço neste momento. Assim, pode-se concluir que o navio n1 não teve tempo de espera e o navio n2 teve um tempo de espera de 9:30 h, conforme a Figura 1 (a), (ver apêndice).

Para calcular o custo total da alocação (CA), considera-se:

$$MinCA = \sum_{i \in N} \sum_{j \in B} \left\{ \left[(E_i + A_{ij}) \cdot CP_i \right] + (C_i \cdot TMov_j) + \left[(L_i \cdot TAtrac_j) \cdot P \right] \right\} \cdot x_{ij} \quad (7)$$

Sujeito à:

$$\sum_{i \in N} (L_j - L_i) \cdot x_{ij} \geq 0 \quad \forall j \in B \quad (8)$$

$$\sum_{i \in N} (D_j - D_i) \cdot x_{ij} \geq 0 \quad \forall j \in B \quad (9)$$

$$Mcheg_i + \sum_{i \in N} A_{ij} \cdot x_{ij} - Mlib_j \geq 0 \quad (10)$$

Onde:

CA: é a função objetivo do custo de alocação;

E_i : tempo de espera do navio i ;

A_{ij} : tempo de atendimento do navio i no berço j ;

CP_i : Custo do navio i parado;

$Mcheg_i$: momento de chegada do navio i ;

$Mlib_j$: momento de liberação do berço j ;

L_i : comprimento do navio i ;

L_j : comprimento do berço j ;

D_i : calado do navio i ;

D_j : profundidade do berço j ;

$TAtrac_j$: tarifa de atracação cobrada pelo berço j ao navio i ;

C_i : carga do navio i ;

$TMov_j$: tarifa de movimentação cobrada pelo berço j ao navio i ;

P : número de períodos executados;

x_{ij} : variável binária do tipo 0-1, onde assume o valor 1 caso o navio i tenha sido atendido no berço j e assume o valor 0 em caso contrário;

$N = \{n_1, n_2, \dots, n_k\}$, representa o conjunto de navios;

$B = \{b_1, b_2, \dots, b_m\}$, representa o conjunto de berços.

A equação (8) representa a restrição de que o comprimento do berço j deve ser maior que o comprimento do navio i ; a restrição (9) indica que o calado do navio i deve ser inferior à profundidade do berço j e, a restrição (10) indica que o momento de atracação e atendimento do navio i deve ser superior ao momento de liberação do berço j , ou seja, um navio não pode ser atracado e atendido por um dado berço antes deste ser liberado do atendimento ao navio anterior.

Portanto, o custo total desta alocação é de \$ 29.500,00 obtido pela equação (7). Se a lista de atendimento iniciasse pelo navio n_2 , o qual seria atendido primeiramente, o custo total de alocação seria de \$ 23.700,00, pois os navios permaneceriam menos tempo no porto, não havendo tempo de espera por nenhum navio, conforme a Figura 1 (b).

Como consequência resulta em um custo de tempo navio parado inferior ao da primeira alocação, ou seja, neste caso a redução de custo seria de aproximadamente 20%.

Devido o custo variar muito de uma seqüência de alocação à outra, faz-se necessário avaliar as diversas possibilidades de seqüências que podem existir e, para que esta busca não seja exaustiva propõe-se um algoritmo de busca genética para realizar a análise das possíveis seqüências de alocação.

3.4. ALGORITMO DE BUSCA GENÉTICA

Conforme Soares (1997), um procedimento para a escolha do método é realizar um amplo estudo sobre os algoritmos de otimização, verificando-se a característica de atingir mais vezes a solução global por número de execuções. Esse é um fator de medida da potencialidade dos algoritmos e, dentre os métodos mais eficazes, encontram-se os Algoritmos Genéticos - AG. Os AG são aplicados como uma técnica de procura randômica que vêm sendo usados por um grande número de adeptos (DÁVALOS & STANGE, 1994).

De acordo com Tcholakian e Stange (1994), nos AG cada ponto do espaço solução é considerado como um cromossomo ou um indivíduo. O conjunto de cromossomos forma o que é chamado de população. Os indivíduos da população evoluem de geração em geração por meio de operações entre os cromossomos, como as operações de seleção, *crossover* e mutação.

3.4.1. Caracterização do Cromossomo

Para Mayerle (1996) é no cromossomo que se encontram armazenadas as características das soluções pesquisadas na busca. Segundo Goldberg e Luna (2000), um cromossomo é definido normalmente como um vetor de componentes.

Assim, para o PAB, um cromossomo pode ser representado por uma seqüência de navios, os quais carregam consigo os valores das variáveis:

$$\text{Cromossomo} = \{N_{3_1}, N_{2_2}, N_{1_3}, \dots, N_{n_k}\}$$

onde N_{nk} representa o k -ésimo navio da lista, sendo que cada navio ocupa uma posição nesta lista (por exemplo: o navio n_3 ocupa a posição 1 na lista).

3.4.2. Geração de uma População Inicial

Uma população inicial é formada, em princípio, através de algum mecanismo de avaliação de performance (GOLDBARG & LUNA, 2000). Os indivíduos são codificados numa seqüência finita de navios e assim, cada componente da seqüência é dito um gene, o qual está associado a uma variável do problema.

Esta avaliação de performance, mais conhecida como *fitness*, representa a capacidade do indivíduo em adaptar-se ao meio ambiente. No caso dos AG, quando aplicado a problemas de otimização combinatorial, sua medida relaciona-se com o valor da função objetivo, o qual pode ser calculado conforme a expressão apresentada em (7).

Considerando que para o PAB deseja-se encontrar o menor valor para a função objetivo, a medida do *fitness* deve ser considerada de modo que quanto menor o seu valor,

maior é sua capacidade de adaptação.

3.4.3. Técnica de Seleção

Para ordenar os indivíduos da população durante o processo de busca é utilizada a medida de *fitness* (e representada por f_n), calculada por (7), conforme já citado. A ordem é dada pela seguinte maneira: $f_1 \leq f_2 \leq \dots \leq f_n$. E, deste modo, o primeiro indivíduo da população apresenta o melhor desempenho, enquanto que o último indivíduo apresenta o pior desempenho de toda população. Desta maneira o método escolhe sempre os indivíduos com melhores desempenhos fazendo com que se reproduzam.

3.4.4. Operação de Reprodução ou *Crossover*

O operador de *crossover*, ou cruzamento, é considerado a característica fundamental dos AG. Pares de genitores são escolhidos aleatoriamente da população e, baseado na aptidão, são formados novos indivíduos a partir da troca de material genético. Deste modo, os descendentes serão diferentes de seus pais, mas com características genéticas de ambos os genitores (PACHECO, ano desconhecido).

São várias as regras existentes para se efetuar o cruzamento de indivíduos e assim, para o problema desta pesquisa opta-se por inovar e diferenciar-se das demais regras, considerando a média das posições ocupadas pelos indivíduos nos cromossomos.

Considerando dois cromossomos:

$$C1 - \{N3_1, N2_2, N4_3, N1_4\}$$

$$C2 - \{N2_1, N4_2, N1_3, N3_4\}$$

Faz-se as médias das posições ocupadas por cada indivíduo nos dois cromossomos:

N1: ocupa as posições 4 e 3, portanto a média é 3,5;

N2: ocupa as posições 2 e 1, portanto a média é 1,5;

N3: ocupa as posições 1 e 4, portanto a média é 2,5;

N4: ocupa as posições 3 e 2, portanto a média é 2,5;

Em seguida, ordena-os em uma lista em ordem crescente e, quando haver empate, escolhe-se aleatoriamente qualquer um deles para ocupar a posição:

$$1,5 \leq 2,5 \leq 2,5 \leq 3,5$$

$$\downarrow \quad \downarrow \quad \downarrow \quad \downarrow$$

$$N2_1 - N3_2 - N4_3 - N1_4$$

Como houve empate entre as médias dos indivíduos N3 e N4, optou-se por inserir na lista, na segunda posição o navio N3 e, na seqüência o navio N4.

3.4.5. Operação de Mutação

Após a realização do *crossover*, a mutação toma espaço. Este é um operador genético que tem a função de introduzir características novas ao indivíduo ou mesmo restaurar características que se perderam em operações, como por exemplo, no cruzamento (*crossover*).

Desta forma, a mutação assegura que a probabilidade de se chegar a qualquer ponto do espaço de busca nunca é zero, além de contornar o problema de máximos (ou mínimos) locais, pois com este mecanismo, altera-se levemente a direção da busca. No sistema de um AG a mutação é um evento que possui uma probabilidade pm para cada bit da cadeia de caracteres de todos os indivíduos da população, podendo se tornar um operador caro.

No PAB, a mutação deve ser realizada aleatoriamente após o *crossover*, sendo utilizada uma taxa de mutação, ou seja, uma probabilidade de que este procedimento ocorra.

O operador mutação tem um importante papel na evolução da população (introdução e restauração de características), porém é considerado um operador genético secundário, devendo ocorrer com probabilidade baixa, atendo-se ao elevado custo computacional.

3.5. IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO PROPOSTO

Para a implementação do método sugerido sugere-se que o mesmo seja baseado nos estudos de Imai et. al (1994, 2001, 2003, 2005) e Nishimura et. al (2001).

Sendo assim propõe-se para a resolução do PAB a construção de um programa, o qual pode ser desenvolvido em Delphi®, no qual deverá ser implementado o método proposto, testando e analisado o comportamento das variáveis. A sugestão para o uso do Delphi® dá-se em função deste incluir diversas facilidades de simulação e possibilitar a representação de aspectos dinâmicos, onde se procura implementar algumas variáveis – como a produtividade dos berços – com o objetivo de tornar o modelo mais aderente à realidade que se deseja representar.

A sugestão do método heurístico de resolução do PAB é idealizada para uso genérico, de modo que possa se adaptar a qualquer terminal portuário modificando-se alguns parâmetros.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao final deste artigo espera-se ter repassado de maneira concisa, algumas implicações existentes na gestão portuária, mais especificamente o problema de alocação de navios em berços com suas implicações.

Espera-se que tenha havido algum aprendizado no que se diz respeito a algoritmos genéticos, ferramenta de fácil compreensão e aplicação, a qual é proposta para a resolução do PAB.

Para um avanço nesta pesquisa, propõe-se a implementação de um programa que utilize as sugestões dadas neste artigo, de uso do algoritmo genético e inclusão de variáveis pertinentes ao problema real, permitindo testar a metodologia sugerida e avaliar seus resultados, validando-os no intuito de contribuir para a gestão do sistema portuário.

Apêndices

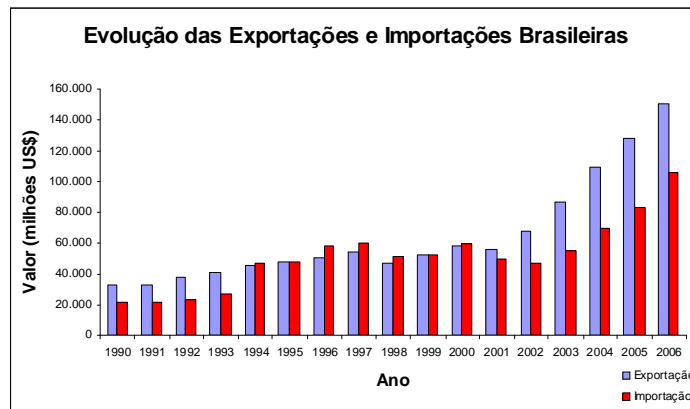
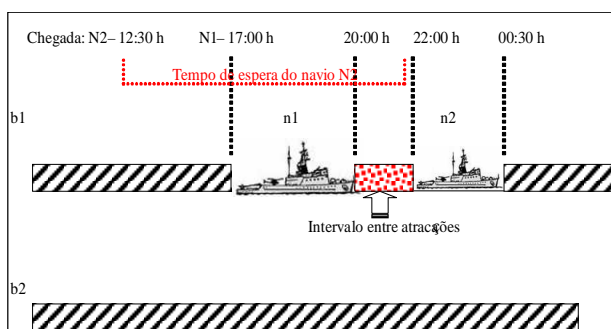
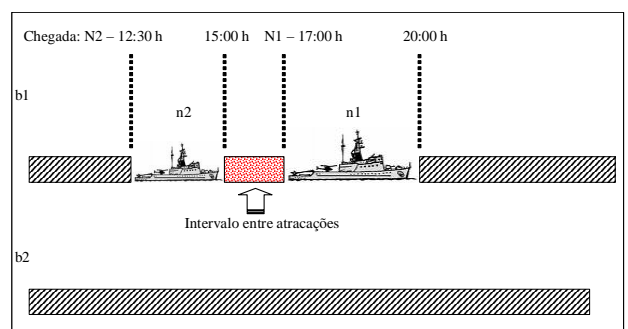


Gráfico 1 - Volumes de exportação e importação do Brasil
Fonte: Site do MDIC



(a) Sequência N1-N2



(b) Sequência N2-N1

Referências

- [1] Anuário Estatístico dos Transportes. Disponível em:
< <http://www.geipot.gov.br/anuario2001/complementar/tabelas/722.xls>>
- [2] BROWN, G. G., LAWPHONGPANICH, S., THURMAN, K. P. (1994): Optimizing ship berthing. **Naval Research Logistics**, v. 41, 1-15.
- [3] BROWN, G. G., CORMICAN, K. J., LAWPHONGPANICH, S., WIDDIS, D. B. (1997). Optimizing submarine berthing with a persistence incentive. **Naval Research Logistics**, v. 44.
- [4] DAI, J., LIN, W., MOORTHY, R., TEO, C.-P. **Berth allocation planning optimization in container terminal**. Disponível em:
<<http://www.bschool.nus.edu.sg/staff/bizteocp/berthplanningjuly2004>>
DÁVALOS, R. V., STANGE, P. (1994). **Uma comparação entre otimização global via algoritmos genéticos e via Gams**. Anais do congresso XXVI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, p. 696-701. Florianópolis.
- [5] FERNANDES, M. G. (2001). **Modelo econômico-operacional para análise e dimensionamento de terminais de contêineres e veículos**. Dissertação de Mestrado. São Paulo: Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- [6] GOLDBARG, M. C. LUNA, H. P. L. (2000). Otimização combinatório e programação linear: modelos e algoritmos. Rio de Janeiro: Campus.
- [7] GUAN, Y.; CHEUNG, R. K. (2004). The berth allocation problem: models and solutions methods. **OR Spectrum**. v. 26, 75-92.
- [8] IMAI, A., NAGAIWA, K., TAT, C. W. (1994). Efficient planning of berth allocation for container terminals in Asia. **Journal of Advanced Transportation**. v. 31, n. 1, 75-94.
- [9] IMAI, A., NISHIMURA, E., PAPADIMITRIOU, S. (2001). The dynamic berth allocation problem for a container port. **Transportation Research Part B**. v. 37, 401-417.
- [10] IMAI, A., NISHIMURA, E., PAPADIMITRIOU, S. (2003). Berth allocation with service priority. **Transportation Research Part B**. v. 37, 437-457.
- [11] IMAI, A., SUN, X., NISHIMURA, E., PAPADIMITRIOU, S. (2005). Berth allocation in a container port: using a continuous location space approach. **Transportation Research Part B**. v. 39, 199-221.
- [12] KIM, K. H., MOON, K. C. (2003). Berth scheduling by simulated annealing. **Transportation Research Part B**. v. 37, 541-560.
- [13] LIM, A. The berth planning problem. (1998). **Operations Research Letters**. v. 22, 105-110.
- [14] MAYERLE, S. F. (1996). Um sistema de apoio à decisão para o planejamento operacional de empresas de transporte rodoviário urbano de passageiros. Tese de Doutorado-UFSC. Florianópolis.
- [15] MOON, K. C. (2000) A mathematical model and a heuristic algorithm for berth planning. Brain Korea 21 Logistics Team, July.

- [16] MULATO, F. M., OLIVEIRA, M. M. B. de. (2006). O impacto de um sistema de agendamento antecipado de docas para carga e descarga na gestão da cadeia de suprimentos. **Revista Produção Online**. v. 6, n. 3, p. 96, set./dez.
- [17] NISHIMURA, E., IMAI, A., PAPADIMITRIOU, S. (2001). Berth allocation planning in the public berth system by genetic algorithms. **European Journal of Operational Research**. v. 131, 282-292.
- [18] NOVAES, A. G. (2004). **Logística e gerenciamento da cadeia de distribuição**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Campus.
- [19] OBITKO, M. Website tutorial. (1998). **Genetic algorithms with Java examples**.
- [20] PACHECO, M. A. C. **Algoritmos genéticos: princípios e aplicações**. ICA: Laboratório de Inteligência Computacional Aplicada. Departamento de Engenharia Elétrica. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Fonte desconhecida.
- [21] PARK, K. T., KIM, K. H. (2002). Berth scheduling for container terminals by using a sub-gradient optimization technique. **Journal of the Operational Research Society**. V. 53, 1054-1062.
- [22] PARK, Y.-M., KIM, K. H. (2003). A scheduling method for berth and quay cranes. **OR Spectrum**. v. 25, 1-23.
- [23] PEIXOTO, J. B. (1977). **Os transportes no atual desenvolvimento do Brasil**. Rio de Janeiro: Biblioteca do Exército.
- [24] Pesquisa Aquaviária CNT: Portos Marítimos: Longo curso e cabotagem. Brasília: Confederação Nacional do Transporte: 2006.
- [25] SILVA, V. M. D., COELHO, A. S. (2007) Uma visão sobre o problema de alocação de berços. **Revista Produção Online**, v.7, n. 2. ISSN 1676-1901.
- [26] SOARES, G. L. (1997). **Algoritmos genéticos: estudo, novas técnicas e aplicações**. Dissertação de Mestrado. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.
- [27] TCHOLAKIAN, A. B., STANGE, P. (1994). **Um algoritmo para a construção de funções de pertinência via algoritmos genéticos**. Anais do congresso XXVI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, p. 111-116. Florianópolis.

Site:

- [28] Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior:
<http://www.aprendendoaexportar.gov.br>