

# Heurística baseada no *Simulated Annealing* aplicada ao problema de alocação de berços

Geraldo Regis Mauri (UFES/INPE) – mauri@lac.inpe.br

• Depto. de Engenharia Rural, Centro de Ciências Agrárias – Universidade Federal do Espírito Santo,  
Alto universitário s/n, Centro, CEP 29500-000, Alegre, ES

Alexandre César Muniz de Oliveira (UFMA) – acmo@deinf.ufma.br

Luiz Antonio Nogueira Lorena (INPE) – lorena@lac.inpe.br

Recebido em: 17/07 Avaliado em: 21/08

## **Resumo**

*Este trabalho apresenta uma heurística baseada no Simulated Annealing para resolver o Problema de Alocação de Berços. Esse problema aborda a programação e a alocação de navios às áreas de atracação, ao longo de um cais. O problema é modelado como um Problema de Roteamento de Veículos, com Múltiplas Garagens e Janelas de Tempo. A aplicação do Simulated Annealing considera, para a geração de novas soluções vizinhas, a utilização de três movimentos de troca, que são selecionados de forma aleatória e uniformemente distribuída. Os resultados computacionais são obtidos, através de problemas testes, utilizados em um trabalho recente a respeito do problema e comparados com o CPLEX e com outro método encontrado na literatura.*

**Palavras-chave:** Problema de Alocação de Berços; Simulated Annealing; Roteamento de Veículos.

## **Abstract**

*This work presents a Simulated Annealing based heuristic to solve the Berth Allocation Problem. This problem approaches the programming and allocation of ships to mooring areas along a quay. The problem is modeled as a Multi-Depot Vehicle Routing Problem with Time Windows. The Simulated Annealing application uses three types of neighbors' moves that are randomly selected. The computational results are obtained through tests problems used in a recent work and compared against CPLEX and other method found in literature.*

**Keywords:** Berth Allocation Problem; Simulated Annealing; Vehicle Routing.

## 1. INTRODUÇÃO

Os portos têm papel fundamental na logística nacional, voltada para as exportações, considerando que 95% do volume de carga é exportado por via marítima. Nas economias industrializadas, diferentemente do que ocorre no Brasil, os portos são também centros de serviços de valor agregado e parceiros imprescindíveis na montagem de serviços de logística de abrangência internacional, assumindo um papel de instrumentos de fomento das exportações inseridas na política macroeconômica dos governos (GOEBEL, 2004).

Para competir neste ambiente, um porto deve operar de forma eficiente (HANSEN et al. , 2007); e de acordo com Imai et al. (2003), a alocação e a programação de navios a berços têm um impacto primário na eficiência dessas operações. Vis e Koster (2003) apresentam uma discussão a respeito dos problemas de decisão que surgem em um porto. Uma classificação dos principais processos e operações em um porto, é apresentada em Steenken et al. (2004). O problema crucial no gerenciamento de um porto é a otimização do equilíbrio entre os proprietários dos navios, que exigem serviços rápidos e o uso econômico dos recursos disponíveis no porto (DRAGOVIC et al. , 2005).

A modernização dos processos administrativos que dão suporte às operações portuárias, tais como programações de cargas, navios, serviços, autorizações, liberações, etc., é de grande importância para o incremento na competitividade de um terminal portuário (GOEBEL, 2004). Neste processo de modernização, a incorporação de modelos quantitativos aos chamados sistemas de suporte, à decisão tende a favorecer o planejamento e a logística de operações em terminais portuários (MURTY, 2005).

A utilização de contêineres para movimentação de cargas, tem crescido nos portos dos países desenvolvidos e em desenvolvimento. De 1999 a 2003, a movimentação mundial de carga containerizada apresentou crescimento de 55,2%, contrastando com um aumento no total das exportações mundiais de apenas 32,2% (HIJJAR e ALEXIM, 2006). Em 2002, a carga geral movimentada em contêineres, por via marítima no mundo, já era de mais de 60% (MEDEIROS, 2002).

O processo de containerização tem influenciado a competitividade na atividade portuária, em termos de infra-estrutura, instalações e equipamentos especializados para o manuseio e alterações decorrentes do incentivo à intermodalidade (transporte de cargas por diferentes modos de transporte, sem precisar ser manuseada ou fracionada). A capacidade de uma instalação portuária movimentar contêineres, com eficiência e agilidade, passou a representar um importante fator na competitividade dos portos (MEDEIROS, 2002).

Dentre os vários efeitos da containerização sobre a competitividade portuária, estão também, as mudanças relacionadas à redução na necessidade de uso de mão-de-obra e o incremento dos sistemas informatizados de controle e gerenciamento logístico. A partir da pressão da containerização, a disponibilidade de sistemas de informação tecnológica integrada está também, assumindo uma posição de destaque entre os fatores de competitividade portuária (MEDEIROS, 2002).

No Brasil, o crescimento do volume total da movimentação de contêineres nos portos vem se mostrando expressivamente maior que o crescimento do comércio exterior do país. No período de 2001 a 2005, a movimentação portuária de carga containerizada dobrou, atingindo o patamar de 5,9 milhões de TEUs (Twenty Feet Equivalent Unit, unidade de medida que equivale a um contêiner de 20 pés) no ano de 2005 (HIJJAR e ALEXIM, 2006).

Neste mesmo período, o crescimento acumulado do comércio exterior brasileiro (exportações + importações) foi de 68,5%. Assim, mesmo sendo um país, cujo maior volume em toneladas exportadas é de grãos, a importância dos produtos acondicionados em contêineres vem crescendo de forma significativa (HIJJAR e ALEXIM, 2006).

Em portos da região sudeste (grande movimentação de cargas), os três problemas mais críticos encontrados envolvem o congestionamento, o pouco investimento do governo em acessos ferroviários e a falta de área de estacionamento (HIJJAR e ALEXIM, 2006).

Em um cenário como este, investimentos em tecnologia de informática que agilizem a tomada de decisão, permitindo a simulação de diferentes cenários, minimizando a sobrestadia e, conseqüentemente, a

fila de espera, permitindo a melhor alocação de recursos nas operações de carga e descarga, é fundamental para a competitividade de um porto.

O Problema de Alocação de Berços (PAB), que normalmente abrange o transporte de cargas contêinerizadas, reflete as principais decisões referentes aos recursos de custo mais importante, no gerenciamento de portos de cargas. Assim, uma boa distribuição dos navios aos berços aumentará a satisfação dos proprietários dos navios e aumentará a produtividade do porto, conduzindo a rendas mais altas para ambas as partes (IMAI et al., 2003).

Assim como apresentado em Imai et al. (1997, 2001, 2003) e Cordeau et al. (2005), neste trabalho, o problema é tratado em sua forma discreta, considerando como objetivo principal, a minimização do tempo total gasto pelos navios dentro do porto, que segundo Hansen et al. (2007), é uma função-objetivo apropriada para o PAB.

Diversas abordagens utilizam heurísticas e meta-heurísticas para solucionar o PAB, pois tais métodos, apesar de não garantirem a obtenção de soluções ótimas, permitem a inserção das inúmeras restrições de uma forma mais amena (CORDEAU et al., 2005 e HANSEN et al., 2007).

Este trabalho apresenta uma alternativa eficaz para resolver o problema em questão. É proposto um modelo matemático, baseado em um problema de roteamento de veículos para representar o problema; e uma heurística baseada no Simulated Annealing é utilizada para tratá-lo, ou seja, alocar e programar as atracções dos navios aos berços, de forma a reduzir o tempo de permanência dos navios no porto.

A escolha do Simulated Annealing para solucionar o PAB, foi baseada no trabalho proposto por Mauri e Lorena (2006), que apresenta excelentes resultados para outro problema de roteamento de veículos, cujo modelo matemático apresenta pontos em comum com o proposto neste artigo.

O artigo está organizado como segue. A Seção 2 apresenta uma breve descrição do problema. A modelagem do problema é apresentada na Seção 3. Já a Seção 4, descrevem-se o modelo proposto e os métodos utilizados para resolver o PAB. Os resultados computacionais obtidos são apresentados na Seção 5 e as conclusões são resumidas na Seção 6.

## 2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O Problema de Alocação de Berços (PAB) consiste em atribuir os navios que chegam a um determinado porto, para as “posições” de atracção disponíveis ao longo de um cais (berços). As principais decisões a serem tomadas neste processo envolvem a escolha de onde e quando os navios deverão atracar (CORDEAU et al., 2005).

Em relação ao local de atracção, existem restrições relativas à profundidade da água, à distância máxima, em relação ao local mais favorável, ao longo do cais e, também, ao tamanho dos navios. Já em relação ao horário de atracção dos navios, as restrições são expressas como janelas de tempo para conclusão de seu atendimento (CORDEAU et al., 2005). O tempo de atendimento de um navio depende de seu ponto de atracção (berço) e é uma função da distância do berço até a área de carga e descarga de contêineres no pátio do porto. Como mencionado em Cordeau et al. (2005), esta dependência afeta fortemente o desempenho das operações no porto.

Os dados referentes ao tempo de atendimento dependem de outra decisão, que é o número de guindastes no cais, que estão disponíveis aos navios que chegam. Essa “decisão” é conhecida como Problema de Atribuição de Guindastes – PAG (LEE et al., 2006). Esta decisão afeta o tempo de atendimento dos navios e, conseqüentemente, tem um impacto no PAB. Em um sistema complexo, como um porto de transferência de cargas, o processo de tomada de decisão é freqüentemente hierárquico e o PAG é resolvido antes do PAB.

O objetivo então é minimizar os custos referentes ao porto e ao navio, que é relacionado ao tempo de serviço dos navios. O objetivo do PAB, normalmente, é minimizar o tempo de serviço total de todos os na-

vios. Desde que os navios não tenham a mesma importância, uma soma dos tempos de serviços dos navios, considerando uma penalização para indicar a sua devida importância, pode refletir melhor a prática de gerenciamento de alguns portos. Os pesos nesta soma podem representar um esquema do valor estimando da carga ou do número de contêineres movimentados. Em algumas variantes do problema, como em Imai et al. (2006), por exemplo, também podem ser incluídas outras condições de penalidade na função objetivo.

O PAB pode ser modelado como um problema discreto, se o cais for visto como um conjunto finito de berços. Neste caso, os berços podem ser descritos como segmentos de comprimento fixos ou se a dimensão de espaço for ignorada, como pontos. Já os modelos contínuos consideram que os navios possam atracar em qualquer lugar, ao longo do cais.

### 3. MODELAGEM DO PROBLEMA

Neste trabalho, o Problema de Alocação de Berços (PAB) é tratado em sua forma discreta, onde o cais é dividido em um conjunto finito de berços e a dimensão espacial é ignorada. Assim, deve-se observar para cada navio, os tempos descritos na Figura 1.

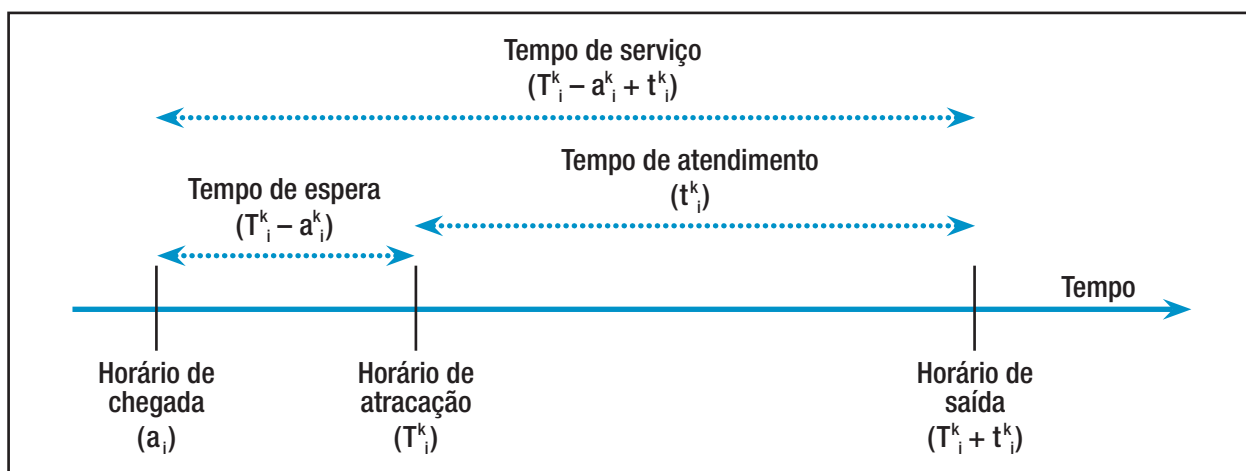


FIGURA 1 – Variáveis referentes ao tempo.

Como observado por Legato et al. (2001), o PAB pode ser modelado como um Problema de Roteamento de Veículos com Garagens Múltiplas e Janelas de Tempo (CORDEAU et al. , 2001). Neste trabalho, o PAB é representado, inicialmente, através do modelo matemático proposto por Cordeau et al. (2005).

Neste modelo, os navios são tratados como clientes e os berços como garagens (cada uma com seu veículo específico). Existem então  $m$  veículos “fictícios” (um para cada garagem), sendo que cada um inicia e termina sua “rota” na sua própria garagem. Os navios são modelados como vértices em um multi-grafo, onde cada garagem (berço) ainda é dividida em um vértice de origem e um de destino. Nos vértices de origem e destino, as janelas de tempo correspondem ao período de funcionamento dos berços.

O modelo então é dado por um multi-grafo  $G^k = (V^k, A^k), \forall k \in M$ , onde  $V^k = N \cup \{o(k), d(k)\}$  e  $A^k \subseteq V^k \times V^k$ . As variáveis e constantes usadas para representar o problema são:

- $N$ : conjunto de navios,  $n = |N|$ ;
- $M$ : conjunto de berços,  $m = |M|$ ;
- $t_i^k$ : duração do atendimento do navio  $i$  no berço  $k$ ;

- $a_i$ : horário de chegada do navio  $i$ ;
- $s^k$ : horário de abertura do berço  $k$ ;
- $e^k$ : horário de fechamento do berço  $k$ ;
- $b_i$ : horário de término da janela de tempo para o navio  $i$ ;
- $v_i$ : valor (custo) do tempo de serviço do navio  $i$ ;
- $x_{ij}^k \in \{0,1\} \forall k \in M, \forall (i,j) \in A^k, x_{ij}^k = 1$  se o navio  $j$  é atendido pelo berço  $k$ , após o navio  $i$ ;
- $T_i^k \forall k \in M, i \in N$  é o horário que o navio  $i$  atracou no berço  $k$ ;
- $T_{o(k)}^k \forall k \in M$  é o horário em que o primeiro navio atracou no berço  $k$ ;
- $T_{d(k)}^k \forall k \in M$  é o horário em que o último navio saiu do berço  $k$ ;
- $M_{ij}^k = \max\{b_i + t_i^k - a_j, 0\}, \forall k \in M, \forall (i,j) \in N$ .

O modelo do PAB proposto por Cordeau et al. (2005) é descrito a seguir. A função objetivo minimiza o tempo decorrido, desde o momento em que os navios chegam, atracam e são atendidos, considerando um custo de serviço para esse tempo. A restrição (2) garante que cada navio é atendido por apenas um berço. As restrições (3) e (4) garantem, respectivamente, que um navio será o primeiro a ser atendido em cada berço e outro será o último. A restrição (5) garante a conservação do fluxo (atendimento) para os demais navios. A restrição (6) faz o cálculo do horário de atracação dos navios. Nesta restrição, são considerados apenas os arcos  $A^k$ , válidos para cada berço  $k$ , ou seja, alguns navios não podem ser atendidos em determinados berços, pois, por exemplo, o tipo de equipamento disponível no berço pode não ser apropriado para o atendimento de determinados tipos de carga. A possibilidade de atendimento ou não dos navios pelos berços é determinada, através dos dados encontrados nos problemas-testes utilizados (o tempo de atendimento é zero). As restrições (7) e (8) garantem, respectivamente, que o horário de atracação seja após a chegada do navio e que o horário do término do atendimento do navio seja anterior ao horário-limite do navio (janela de tempo). As restrições (9) e (10) garantem a não violação das janelas de tempo nos berços. E por fim, a restrição (11) garante que as variáveis de decisão sejam binárias. Maiores detalhes sobre esse modelo são apresentados em Cordeau et al. (2005).

Minimizar:

$$Z = \sum_{i \in N} \sum_{k \in M} v_i \left[ T_i^k - a_i + t_i^k \sum_{i \in N \cup \{d(k)\}} x_{ij}^k \right] \quad (1)$$

Sujeito à:

$$\sum_{k \in M} \sum_{j \in N \cup \{d(k)\}} x_{ij}^k = 1 \quad \forall i \in N \quad (2)$$

$$\sum_{j \in N \cup \{d(k)\}} x_{o(k)j}^k = 1 \quad \forall k \in M \quad (3)$$

$$\sum_{i \in N \cup \{o(k)\}} x_{i,d(k)}^k = 1 \quad \forall k \in M \quad (4)$$

$$\sum_{j \in N \cup \{d(k)\}} x_{i,j}^k - \sum_{j \in N \cup \{o(k)\}} x_{j,i}^k = 0 \quad \forall k \in M, \forall i \in N \quad (5)$$

$$T_{i,j}^k + t_i^k - T_i^k \leq (1 - T_{i,j}^k)M_{i,j}^k \quad \forall k \in M, \forall (i,j) \in A^k \quad (6)$$

$$T_i^k \geq a_i \quad \forall k \in M, \forall i \in N \quad (7)$$

$$T_i^k + t_i^k \sum_{j \in N \cup \{d(k)\}} x_{j,i}^k \leq b_i \quad \forall k \in M, \forall i \in N \quad (8)$$

$$T_{o(k)}^k \geq s^\lambda \quad \forall k \in M \quad (9)$$

$$T_{d(k)}^k \leq e^k \quad \forall k \in M \quad (10)$$

$$x_{i,j}^k \in \{0,1\} \quad \forall k \in M, \forall (i,j) \in A^k \quad (11)$$

## 4. PROPOSTA DE SOLUÇÃO

Para resolver o PAB, foi desenvolvida uma heurística, baseada no *Simulated Annealing* – SA (KIRKPATRICK et al., 1983). Para utilização dessa heurística, é proposto um modelo matemático, baseado na formulação descrita na seção anterior. O modelo proposto é uma relaxação do apresentado por Cordeau et al. (2005).

As restrições (7) e (8) foram relaxadas, sendo transferidas para a função objetivo (eq. 13). De forma análoga, as restrições (9) e (10), também foram transferidas para a função objetivo (eq. 14). As demais restrições foram mantidas, porém, na função-objetivo foram adicionados fatores de penalização (vetor  $w = [w_0, w_1, w_2]$ ) para cada termo. O modelo proposto é apresentado a seguir.

Neste modelo, pode-se notar que o tempo de serviço (com seu valor de custo associado) é representado na expressão (12). A expressão (13) minimiza as violações nas janelas de tempo dos navios. Já a expressão (14) minimiza as violações nas janelas de tempo dos berços.

Minimizar:

$$Z^* = w_0 \sum_{i \in N} \sum_{k \in M} v_i \left( T_i^k - a_i + t_i^k \sum_{j \in N \cup \{d(k)\}} x_{ij}^k \right) + \quad (12)$$

$$w_1 \sum_{i \in N} \sum_{k \in M} \sum_{j \in N \cup \{d(k)\}} x_{ij}^k (\max(0, a_i - T_i^k) + \max(0, T_i^k + t_i^k - b_i)) + \quad (13)$$

$$w_2 \sum_{k \in M} (\max(0, s^k - T_{o(k)}^k) + \max(0, T_{d(k)}^k - e^k)) \quad (14)$$

Sujeito à:

$$\sum_{k \in M} \sum_{j \in N \cup \{d(k)\}} x_{ij}^k = 1 \quad \forall i \in N \quad (15)$$

$$\sum_{j \in N \cup \{d(k)\}} x_{o(k)j}^k = 1 \quad \forall k \in M \quad (16)$$

$$\sum_{i \in N \cup \{o(k)\}} x_{i,d(k)}^k = 1 \quad \forall k \in M \quad (17)$$

$$\sum_{j \in N \cup \{d(k)\}} x_{i,j}^k - \sum_{j \in N \cup \{o(k)\}} x_{j,i}^k = 0 \quad \forall k \in M, \forall i \in N \quad (18)$$

$$T_i^k + t_i^k - T_j^k \leq (1 - x_{i,j}^k) M_{i,j}^k \quad \forall k \in M, \forall (i,j) \in A^k \quad (19)$$

$$x_{i,j}^k \in \{0,1\} \quad \forall k \in M, \forall (i,j) \in A^k \quad (20)$$

Analisando as restrições do modelo acima, pode-se notar que se trata de um Problema de Roteamento de Veículos com Garagens Múltiplas, SEM Janelas de Tempos, ou seja, um problema cuja resolução é menos árdua em relação ao modelo descrito na seção anterior (com janelas de tempo). Deve-se destacar que esse modelo (eq. 12-20) pode resultar em soluções inviáveis para o problema, porém essas inviabilidades são eliminadas durante a execução do SA, através da penalização imposta.

## 4.1. Solução inicial

A solução inicial é gerada através de duas heurísticas: heurística de distribuição e heurística de programação. A heurística de distribuição é responsável pela atribuição dos navios aos berços. Esta heurística é baseada na heurística de distribuição, apresentada em Mauri e Lorena (2006) e na heurística FCFS-G, apresentada em Cordeau et al. (2005). Já a heurística de programação determina o horário de atendimento dos navios nos berços.

1. CRIAR (m berços vazios);
2. CRIAR (uma lista L com todos os navios);
3. ORDENAR (a lista L pelo horário de chegada dos navios ao porto);
4. PARA (cada navio j em L, j = 1,2,...,n) FAÇA
5. SELECIONAR (um berço i, i = 1,2,...,m);
6. SE (o berço i não puder atender ao navio j)
7. VOLTAR (para o passo 5);
8. SENÃO
9. ATRIBUIR (o navio j ao berço i);
10. FIM-PARA.

FIGURA 2 – Heurística de distribuição.

Na heurística de distribuição, são criados, inicialmente, m berços vazios. Os n navios são organizados por ordem de chegada ao porto e são distribuídos, seqüencialmente, aos berços, de forma aleatória; porém, sempre verificando se o berço selecionado poderá atender o navio em questão. Após essa distribuição, fica garantido que cada navio foi atribuído a um berço que poderá atendê-lo. O horário em que o navio será atendido, ainda poderá ser incoerente, podendo apresentar sobreposição e/ou violações nas janelas de tempo, tanto dos navios quanto do berço. A FIGURA 2 apresenta a heurística de distribuição.

1. PARA (cada berço  $k$ ,  $k = 1, 2, \dots, m$ ) FAÇA
2. PARA (cada navio  $i$  atribuído a  $k$ ) FAÇA
3. 
$$T_i^k = \begin{cases} \max(a_i, s^k), & i = 1 \\ \max(a_i, T_{i-1}^k + t_{i-1}^k), & i > 1 \end{cases}$$
4. FIM-PARA;
5. FIM-PARA;
6. CALCULAR (a função objetivo (eq. 12, 13 e 14) para a solução atual).

FIGURA 3 – Heurística de programação.

Na heurística de programação, são efetuados os cálculos do horário de atracação de cada navio e da função-objetivo da solução. Nesta heurística, a sobreposição de horários é eliminada, através do cálculo do horário de atracação dos navios. A FIGURA 3 apresenta a heurística de programação.

### 4.1. Estrutura de vizinhança

Como estrutura de vizinhança, foram utilizados três diferentes movimentos de troca: Re-ordenar navios, Re-alocar navio e Trocar navios. Assim como na geração da solução inicial, esses movimentos garantem que cada navio seja atribuído apenas a berços que possam atendê-los. Estes movimentos são baseados em outros, apresentados em Mauri e Lorena (2006). Após a execução de cada um desses movimentos, a heurística de programação é aplicada para eliminar as sobreposições e recalcular o valor da função-objetivo da nova solução.

O movimento Re-ordenar navios consiste basicamente em selecionar um berço qualquer, pertencente à solução, selecionar um navio qualquer, atendido por esse berço (a), selecionar uma nova posição na seqüência de atendimento desse berço (b) e trocar a posição de atendimento do navio selecionado (c). Esse movimento é ilustrado na FIGURA 4.

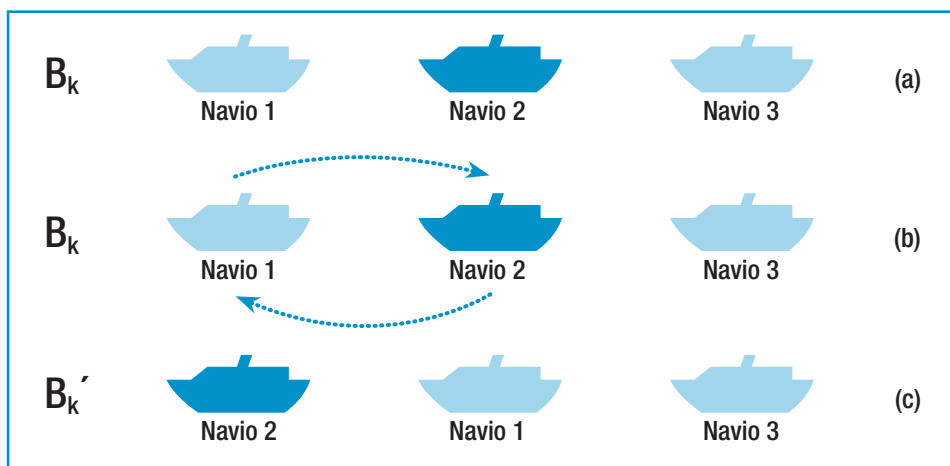


FIGURA 4 – Movimento re-ordenar navios.

Já o movimento Re-alocar navio consiste basicamente em selecionar dois berços quaisquer, pertencentes à solução, selecionar um navio qualquer em apenas um dos dois berços (a), extraí-lo de seu berço atual e atribuí-lo ao outro berço (b). O novo berço onde o navio será atribuído, deverá obrigatoriamente



poder atender ao navio selecionado, pois caso contrário, outro berço deverá ser selecionado. Após a atribuição, a seqüência de atendimento do novo berço deverá ser reorganizada através da ordenação pelo horário de chegada dos navios (c). Esse movimento é ilustrado na FIGURA 5.

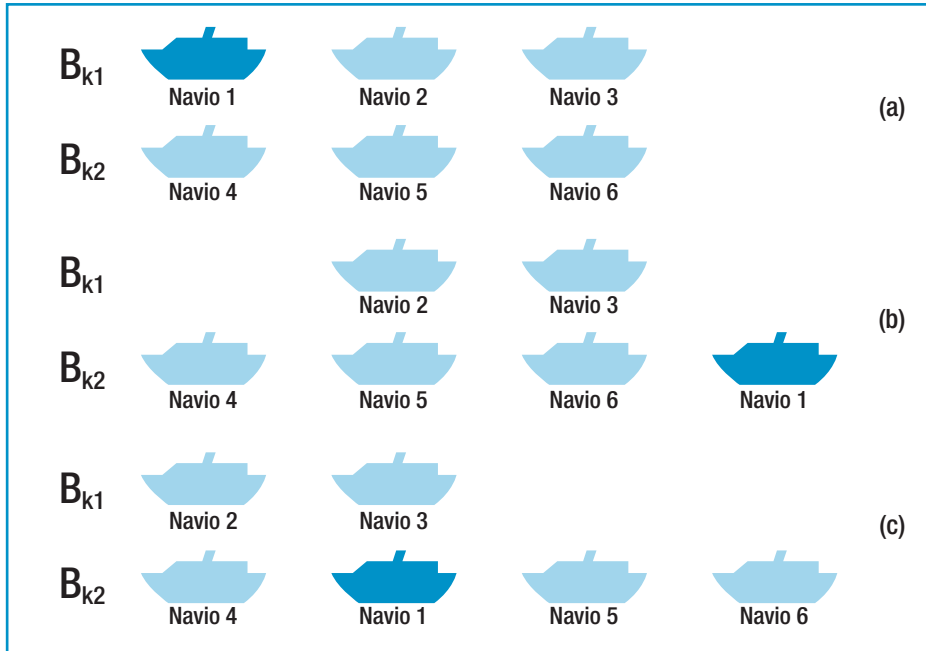


FIGURA 5 – Movimento re-alocar navio.

O movimento Trocar navios consiste basicamente em selecionar dois berços quaisquer, pertencentes à solução, selecionar um navio qualquer em cada um dos dois berços (a), e trocá-los (b). Caso os navios não possam ser atendidos pelos “novos” berços, onde serão alocados, deverão ser selecionados novos navios e/ou berços. Após a troca, a seqüência de atendimento dos dois berços deverá ser ordenada pelo horário de chegada dos navios (c). Esse movimento é ilustrado na FIGURA 6.

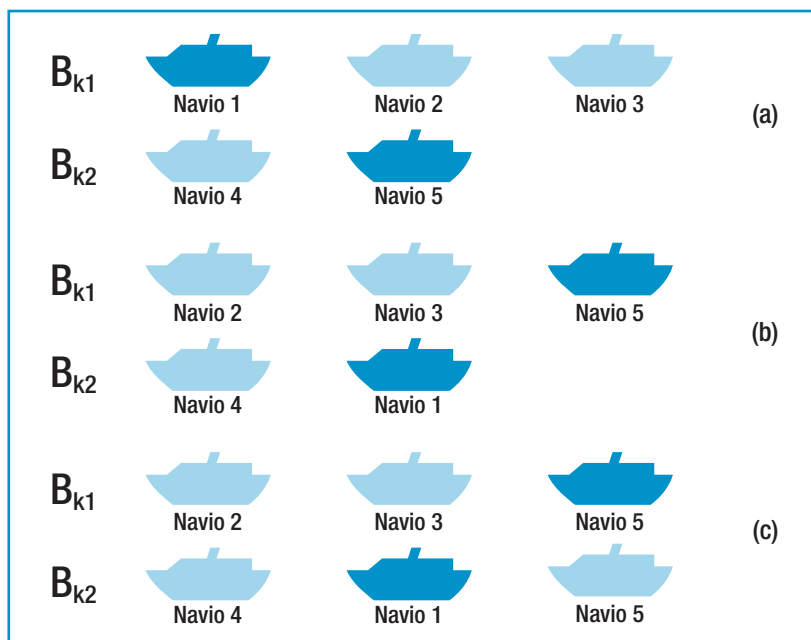


FIGURA 6 – Movimento trocar navios.

A partir dessa estrutura de vizinhança, o SA foi implementado de uma forma em que cada solução vizinha é gerada por apenas um desses movimentos, sendo a sua escolha feita de forma aleatória, porém uniformemente distribuída, possibilitando, assim, uma boa diversidade entre as soluções intermediárias geradas e, conseqüentemente, uma boa exploração do espaço de soluções.

A função-objetivo  $f(S)$ , utilizada para avaliar as soluções, é aquela descrita pelas equações (12),(13) e (14) e as restrições do modelo (15 a 20) são atendidas implicitamente nas heurísticas de distribuição e programação e nos movimentos de troca, aqui descritos. Um pseudocódigo do SA implementado é apresentado na FIGURA 7. Os parâmetros de controle do procedimento são a razão de resfriamento  $\alpha$ , o número de iterações para cada temperatura  $S_{max}$ , a temperatura inicial  $T_0$  e a temperatura de congelamento  $T_c$ .

```

1. DADO ( $\alpha$ ,  $S_{max}$ ,  $T_0$  e  $T_c$ ) FAÇA
2. GERAR (uma solução S através da heurística de distribuição);
3. AVALIAR (a solução S através da heurística de programação);
4.  $S^* \leftarrow S$ ;           {Melhor solução obtida até então}
5. IterT < 0;           {Número de iterações na temperatura T}
6.  $T \leftarrow T_0$ ;       {Temperatura corrente}
7. ENQUANTO ( $T > T_c$ ) FAÇA
8.   ENQUANTO (IterT <  $S_{max}$ ) FAÇA
9.     IterT  $\leftarrow$  IterT + 1;
10.    GERAR (um vizinho qualquer S' através de um dos mov. de troca);
11.    AVALIAR (a solução S' através da heurística de programação);
12.     $\Delta \leftarrow f(S') - f(S)$ ;
13.    SE ( $\Delta < 0$ )  $S \leftarrow S'$ ;
14.      SE ( $f(S') < f(S^*)$ )  $S^* \leftarrow S'$ ; FIM-SE
15.    SENÃO
16.      TOMAR ( $x \in [0,1]$ );
17.      SE ( $x < e^{-\Delta/T}$ )  $S \leftarrow S'$ ; FIM-SE
18.    FIM-SE
19.  FIM-ENQUANTO
20.   $T \leftarrow \alpha * T$ ; IterT  $\leftarrow$  0;
21. FIM-ENQUANTO
22.  $S \leftarrow S^*$ ;
23. RETORNAR (S).
    
```

FIGURA 7 – Algoritmo *Simulated Annealing*.

## 4.2. Re-aquecimento

Com o intuito de melhorar ainda mais as soluções obtidas pelo SA, foi aplicado um “re-aquecimento”. Essa técnica consiste em, após executar o SA, aplicá-lo novamente à melhor solução obtida até então como solução inicial. No re-aquecimento, foram utilizados diferentes valores de parâmetros. A temperatura ini-

cial foi reduzida, em relação ao SA “normal” e o número máximo de iterações foi aumentado. Dessa forma, a busca por melhores soluções é intensificada na região do espaço de busca próxima à solução inicial, ou seja, o re-aquecimento faz um refinamento na solução obtida pelo SA.

## 5. EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

Para avaliar o desempenho dos métodos e modelos descritos neste trabalho, foram utilizados 30 problemas-testes distintos, cada um com 60 navios e 13 berços. Esses problemas-testes foram gerados aleatoriamente por Cordeau et al. (2005). Todos os testes foram realizados em um PC, com processador AMD Athlon™ 64 3500 de 2.2 GHz e 1GB de memória RAM. Toda a implementação foi desenvolvida na linguagem C++.

O Simulated Annealing proposto foi aplicado ao modelo relaxado do PAB, apresentado na Seção 4. Os parâmetros utilizados foram:  $\alpha = 0,975$ ,  $T_i = 40000$ ,  $T_c = 0,01$  e  $SA_{max} = 1000$ . Já no re-aquecimento, foram utilizados os seguintes valores:  $\alpha = 0,975$ ,  $T_i = 10000$ ,  $T_c = 0,01$  e  $SA_{max} = 2000$ . As penalizações utilizadas, em ambos os casos, foram  $w = [1,10,10]$ .

Com o intuito de verificar a “qualidade” dos resultados obtidos, as soluções encontradas pelo SA, com o re-aquecimento, foram inseridas no CPLEX (ILOG, 2006), como soluções iniciais para o modelo descrito na Seção 3. A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos pelas três abordagens adotadas, descritas como SA, (SA+RA) e (SA+RA+CPLEX), respectivamente.

A Tabela 1 ainda apresenta uma comparação entre os métodos desenvolvidos. A coluna “A” apresenta a melhoria obtida pelo reaquecimento, ou seja, a melhoria nas soluções obtidas pelo (SA+RA), em relação ao SA. Já a coluna “B” apresenta a melhoria do CPLEX, em relação ao SA, com reaquecimento, ou seja, (SA+RA+CPLEX) em relação ao (SA+RA).

TABELA 1 – Resultados computacionais obtidos pelos métodos propostos.

Problema teste	SA		(SA+RA)		(SA+RA+CPLEX)			Melhoras (%)	
	Z*	Tempo (seg.)	Z*	Tempo (seg.)	Z	GAP (%)	Tempo (seg.)	A	B
i01	1409	19,44	1409	53,12	1409	0,14	3653,12	0,00	0,00
i02	1261	20,17	1261	58,94	1261	0,01	101,85	0,00	0,00
i03	1129	19,77	1129	54,03	1129	0,09	3654,03	0,00	0,00
i04	1302	21,03	1302	67,33	1302	0,23	3667,33	0,00	0,00
i05	1207	20,00	1207	55,38	1207	0,11	3655,38	0,00	0,00
i06	1261	19,77	1261	53,88	1261	0,17	3653,88	0,00	0,00
i07	1279	20,69	1279	60,52	1279	0,17	3660,52	0,00	0,00
i08	1299	25,95	1299	61,45	1299	0,12	3661,45	0,00	0,00
i09	1444	22,2	1444	57,91	1444	0,54	3657,91	0,00	0,00
i10	1213	25,33	1213	68,95	1213	0,21	3668,95	0,00	0,00
i11	1368	27,88	1368	76,77	1368	0,36	3676,77	0,00	0,00
i12	1325	22,61	1325	62,84	1325	0,14	3662,84	0,00	0,00
i13	1360	24,94	1360	68,19	1360	0,16	3668,19	0,00	0,00
i14	1233	25,94	1233	75,06	1233	0,10	3675,06	0,00	0,00
i15	1295	20,69	1295	54,55	1295	0,07	3654,55	0,00	0,00
i16	1366	20,77	1364	63,91	1364	0,19	3663,91	0,15	0,00

Problema teste	SA		(SA+RA)		(SA+RA+CPLEX)			Melhoras (%)	
	Z*	Tempo (seg.)	Z*	Tempo (seg.)	Z	GAP (%)	Tempo (seg.)	A	B
i17	1283	20,08	1283	56,28	1283	0,28	3656,28	0,00	0,00
i18	1345	19,70	1345	53,98	1345	0,24	3653,98	0,00	0,00
i19	1370	19,22	1370	52,83	1370	0,04	3652,83	0,00	0,00
i20	1329	19,52	1328	53,38	1328	0,20	3653,38	0,08	0,00
i21	1344	19,56	1341	53,52	1341	0,14	3653,52	0,22	0,00
i22	1326	21,23	1326	57,97	1326	0,26	3657,97	0,00	0,00
i23	1266	19,66	1266	53,75	1266	0,03	3653,75	0,00	0,00
i24	1260	19,75	1260	54,09	1260	0,15	3654,09	0,00	0,00
i25	1377	19,52	1377	53,56	1377	0,44	3653,56	0,00	0,00
i26	1319	20,78	1318	57,34	1318	0,14	3657,34	0,08	0,00
i27	1261	23,64	1261	69,98	1261	0,01	1997,07	0,00	0,00
i28	1360	21,42	1360	58,47	1360	0,25	3658,47	0,00	0,00
i29	1280	25,61	1280	69,09	1280	0,03	3669,09	0,00	0,00
i30	1349	26,86	1344	70,67	1344	0,15	3670,67	0,37	0,00
Média	1307,33	21,79	1306,93	60,26	1306,93	0,17	3485,92	0,03	0,00

Na Tabela 1, pode-se observar que as soluções obtidas com o reaquecimento foram, em média, 0,03% melhores, em relação às obtidas pelo SA, ou seja, o reaquecimento proporcionou apenas uma pequena melhora nas soluções. Já analisando o desempenho do CPLEX, pode-se observar que este não conseguiu melhorar as soluções obtidas pelo SA com reaquecimento. Porém, é interessante destacar que, com o uso do CPLEX, pôde-se notar a “qualidade” das soluções obtidas, pois o gap médio obtido foi de 0,17%, o que indica que as soluções estão muito próximas do ótimo global. Para os problemas testes i02 e i27, as soluções ótimas foram obtidas tanto pelo SA quanto pelo (SA+RA).

As melhores soluções obtidas (SA+RA) ainda foram comparadas com as melhores soluções conhecidas para os problemas-testes utilizados. Essas melhores soluções foram obtidas através de uma heurística baseada na Busca Tabu, apresentada em Cordeau et al. (2005). Além disso, o CPLEX 10.0.1 (ILOG, 2006), também foi utilizado, de forma isolada, para resolver o modelo descrito na Seção 3. Foi utilizado um limite máximo de processamento de 1 hora para cada problema-teste. A Tabela 2 apresenta essas comparações.

Como pode ser observado na Tabela 2, as soluções obtidas pelo (SA+RA) foram 0,21% melhores em relação às obtidas pela Busca Tabu proposta por Cordeau et al. (2005). A Busca Tabu obteve apenas uma solução melhor do que o (SA+RA), para o problema teste i10. Já em relação ao CPLEX, pode-se notar que este não foi capaz de obter soluções para vários problemas-testes (em 1 hora), e nos casos em que foram encontradas soluções, os resultados foram expressivamente piores do que os apresentados pelo (SA+RA), em média 170,05% piores.

Em relação ao tempo para obtenção das soluções, o CPLEX utilizou 1 hora para cada problema-teste (3600 seg.). A Busca Tabu utilizou aproximadamente 120 segundos para cada problema-teste, segundo descrito em Cordeau et al. (2005). Já o (SA+RA), utilizou um tempo médio de 60,26 segundos para cada problema-teste, o que mostra a competitividade do método, em relação à Busca Tabu e a superioridade em relação ao CPLEX.

TABELA 2 – Comparações com outros métodos.

Problema teste	BT	CPLEX		(SA+RA)		Melhorias (%)	
	Z	Z	Gap	Z*	Tempo	C	D
i01	1415	-	-	1409	53,12	0,43	-
i02	1263	2606	3,82	1261	58,94	0,16	106,66
i03	1139	2565	4,00	1129	54,03	0,89	127,19
i04	1303	4353	8,62	1302	67,33	0,08	234,33
i05	1208	2672	4,89	1207	55,38	0,08	121,38
i06	1262	-	-	1261	53,88	0,08	-
i07	1279	2887	4,73	1279	60,52	0,00	125,72
i08	1299	5177	11,69	1299	61,45	0,00	298,54
i09	1444	-	-	1444	57,91	0,00	-
i10	1212	-	-	1213	68,95	-0,08	-
i11	1378	-	-	1368	76,77	0,73	-
i12	1325	3206	5,48	1325	62,84	0,00	141,96
i13	1360	-	-	1360	68,19	0,00	-
i14	1233	-	-	1233	75,06	0,00	-
i15	1295	4672	9,77	1295	54,55	0,00	260,77
i16	1375	4320	8,97	1364	63,91	0,81	216,72
i17	1283	-	-	1283	56,28	0,00	-
i18	1346	3681	6,94	1345	53,98	0,07	173,68
i19	1370	2400	3,04	1370	52,83	0,00	75,18
i20	1328	-	-	1328	53,38	0,00	-
i21	1346	-	-	1341	53,52	0,37	-
i22	1332	3489	7,31	1326	57,97	0,45	163,12
i23	1266	-	-	1266	53,75	0,00	-
i24	1261	4867	10,13	1260	54,09	0,08	286,27
i25	1379	1993	2,67	1377	53,56	0,15	44,73
i26	1330	2520	3,62	1318	57,34	0,91	91,20
i27	1261	3209	5,70	1261	69,98	0,00	154,48
i28	1365	-	-	1360	58,47	0,37	-
i29	1282	4809	9,43	1280	69,09	0,16	275,70
i30	1351	-	-	1344	70,67	0,52	-
<b>Média</b>	<b>1309,67</b>	<b>3495,65</b>	<b>6,52</b>	<b>1306,93</b>	<b>60,26</b>	<b>0,21</b>	<b>170,45</b>

## 6. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma heurística baseada no Simulated Annealing, para resolver o Problema de Alocação de Berços. Foi proposto um modelo capaz de representar o problema de uma forma relaxada, facilitando, assim, sua resolução. A alocação dos navios aos berços e a programação do atendimento dos navios foram realizadas separadamente, através das heurísticas e da estrutura de vizinhança propostas.

O Simulated Annealing, integrado com a técnica de reaquecimento e as demais heurísticas apresentadas na Seção 4, foi capaz de obter, em todos os casos e com pouco tempo de processamento, soluções válidas para o problema. Além disso, o método proposto se mostrou extremamente eficiente, pois como pôde ser observado, na Tabela 1, os gaps apresentados foram expressivamente baixos, indicando uma grande proximidade com as soluções ótimas para o problema. A estrutura de vizinhança, através dos movimentos de troca, mostrou ser adequada e eficiente para exploração do espaço de soluções.

Os resultados mostram claramente o potencial da abordagem apresentada, onde soluções de alta qualidade são obtidas, para problemas relativamente grandes e em tempos de processamento expressivamente baixos. A continuação deste trabalho será voltada para o tratamento do problema, em sua forma contínua e para a aplicação do método proposto a problemas reais encontrados em portos brasileiros.

### Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP (processo 04/11053-9) e ao Conselho Nacional de Pesquisas – CNPq (processos 304598/2003-8 e 479762/2006-6) pelo apoio financeiro parcial dado ao desenvolvimento deste trabalho.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CORDEAU, J. F.; LAPORTE, G.; MERCIER, A. A unified tabu search heuristic for vehicle routing problems with time windows, *Journal of the Operational Research Society*, 52, pp. 928-936, 2001.
- CORDEAU, J. F.; LAPORTE, G.; LEGATO, P.; MOCCIA, L. Models and Tabu Search Heuristics for the Berth Allocation Problem. *Transportation Science*, 39, pp. 526-538, 2005.
- DRAGOVIC, B; PARK, N. K.; RADMILOVIC, Z. Simulation Modelling of Ship-Berth Link With Priority Service. *Maritime Economics & Logistics*, 7, pp. 316-335, 2005.
- GOEBEL, D. *A Competitividade Externa e a Logística Doméstica*. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico – BNDES, 2004. Disponível em: <<http://www.bndes.gov.br>>. Acesso em: 27 ago. 2007.
- HANSEN, P.; OĞUZ, C.; MLADENOVIC, N. Variable Neighborhood Search for Minimum Cost Berth Allocation, *European Journal of Operational Research*, 2007.
- HIJJAR, M. F.; ALEXIM, F. M. B. Avaliação do acesso aos terminais portuários e ferroviários de contêineres no Brasil. *Instituto COPPEAD de Administração – UFRJ*, 2006.
- Ilog. *ILOG CPLEX 10.0: user's manual*. France: [s.n.], 478 p., 2006.
- IMAI, A.; NAGAIWA, K.; CHAN, W. T. Efficient planning of berth allocation for container terminals in Asia. *Journal of Advanced Transportation*, 31, pp. 75-94, 1997.
- IMAI, A.; NISHIMURA, E.; PAPADIMITRIOU, S. The dynamic berth allocation problem for a container port. *Transportation Research*, 35B, pp. 401-417, 2001.
- IMAI, A.; NISHIMURA, E.; PAPADIMITRIOU, S. Berth allocation with service priority. *Transportation Research*, 37B, pp. 437-457, 2003.

- IMAI, A.; NISHIMURA, E.; PAPADIMITRIOU, S. Berthing ships at a multi-user container terminal with a limited quay capacity. **Transportation Research Part E**, 2006.
- KIRKPATRICK, S.; GELLAT, D. C.; VECCHI, M. P. Optimization by simulated annealing. **Science**, 220, pp. 671-680, 1983.
- LEE, D.; WANG, H. Q.; MIAO, L. Quay crane scheduling with non-interference constraints in port container terminals. **Transportation Research Part E**, 2006.
- LEGATO, P.; MONACO, F.; TIGANI, N. Berth planning at Gioia Tauro's maritime terminal by logistic distribution models, **Annual Conference**, Cagliari, Italy, AIRO, 2001.
- MAURI, G. R.; LORENA, L. A. N. Simulated Annealing Aplicado a um Modelo Geral do Problema de Roteirização e Programação de Veículos. **XXXVIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, 2006.
- MEDEIROS, A. D. Fatores Intervenientes na Competitividade dos Portos Brasileiros: um estudo de caso no Nordeste. **Dissertação de mestrado**, Universidade Federal do Rio Grande do Norte – Brasil, 2002.
- MURTY, K. G.; LIU, J.; WAN, Y.; LINN, R. A decision support system for operations in a container terminal. **Decision Support Systems**, Elsevier Science Publishers, 39(3), pp. 309-332, 2005.
- STEENKEN, D.; VOSS, S.; STAHLBOCK, R. Container terminal operation and operations research – a classification and literature review. **OR Spectrum**, 26, 3-49, 2004.
- VIS, I. F. A.; KOSTER, R. D. Transshipment of containers at a container terminal: An overview, **European Journal of Operational Research**, 147, pp. 1-16, 2003.