

## UM MÉTODO HEURÍSTICO PARA A PROGRAMAÇÃO DE ALOCAÇÃO DOS NAVIOS EM BERÇOS

**Merhy Heli Paiva Rodrigues**  
Universidade Federal Rio Grande  
Av. Itália km 8 Bairro Carreiros  
merhyheli@hotmail.com

**Elizangela Dias Pereira**  
Universidade Federal Rio Grande  
Av. Itália km 8 Bairro Carreiros  
eliz\_math@yahoo.com.br

**Catia Maria dos Santos Machado**  
Universidade Federal Rio Grande  
Av. Itália km 8 Bairro Carreiros  
catiamachado@furg.br

**Milton Luiz Paiva de Lima**  
Universidade Federal Rio Grande  
Av. Itália km 8 Bairro Carreiros  
mlplfurg@gmail.com

### RESUMO

Neste artigo apresenta-se um modelo discreto para um dos problemas presentes no setor portuário, Problema de Alocação de Berços, no qual aborda a programação e a alocação de navios às áreas de atracação ao longo de um cais, minimizando assim o tempo de espera dos navios em fila. A metodologia utilizada para solucionar o Problema de Alocação de Berços é baseada na técnica e na implementação do *Simulated Annealing*. Um software foi desenvolvido de forma a permitir uma programação de atracação dos navios aos berços, conforme os horários de chegadas previstas no porto, em um sistema informatizado que procura minimizar filas e esperas desnecessárias. Preenchendo os dados no sistema, automaticamente a embarcação é colocada na posição onde irá operar. Através da programação de alocação dos navios é possível observar a eficácia do algoritmo bem como a aplicabilidade do modelo a situações reais.

**PALAVRAS CHAVE.** Problema alocação de berços, Heurísticas, *Simulated Annealing*.

### ABSTRACT

This paper presents a discrete model for one of the problems present in the port sector, Berth Allocation Problem, which addresses the programming and allocation of ships berthing areas along a quay, thus minimizing the waiting time for ships in a row. The methodology used to solve the problem Berth Allocation is based on technical and implementation of *Simulated Annealing*. A software was developed to enable a schedule for berthing of vessels at berths, as the times of arrival at the port provided in a computerized system that seeks to minimize unnecessary queues and waits. Filling data in the system, the vessel is placed automatically in the position where they will operate. By programming the allocation of ships is possible to observe the effectiveness of the algorithm as well as the applicability of the model to real situations.

**KEYWORDS.** Berth allocation problem, heuristics, *Simulated Annealing*.

## 1. Introdução

O comércio internacional tem assumido proporções significativas, merecendo destaque os volumes transportados pelo modal marítimo. Uma grande porcentagem das operações de comércio internacional é realizada pelo transporte marítimo. Portanto, os portos desempenham um papel importante como elo entre os modais terrestres e marítimos. (VIEIRA, 2006)

Para Fleury (1998), nos portos estão às maiores oportunidades para redução dos custos de transporte, também nos portos começam a aparecer resultados em relação às reduções de preços e melhoria dos serviços.

Um problema que tem chamado à atenção de muitos pesquisadores é o problema portuário que aborda a programação e a alocação de navios às áreas de atracação ao longo de um cais, de acordo com Silva e Coelho (2007), é uma lacuna a ser explorada no que se refere à pesquisa e métodos.

Diversos estudos e técnicas são encontrados na literatura técnica relacionados ao dimensionamento de berços de atracação compatível com uma demanda esperada de embarcações e também em relação à análise operacional de sistemas portuários. Há estudos que buscam o balanceamento entre o custo operacional dos berços e o custo de espera dos navios (FERNANDES, 2001).

Nos últimos anos a inclusão de ferramentas de otimização em simuladores tem-se tornado tendência. Nessas iniciativas, observa-se a inclusão de algoritmos aproximativos ou heurísticos, bem como o acoplamento de ferramentas de simulação com ferramentas de otimização (CASSEL e VACCARO, 2007).

O objetivo do trabalho é desenvolver uma ferramenta alternativa para a resolução do Problema de Alocação de berços (PAB), diferenciando-se dos demais estudos encontrados, criando um modelo mais próximo da atividade praticada nos portos. Leva em consideração as seguintes variáveis: conjunto de navios com os horários de chegada prevista ao porto, horário de funcionamento e capacidades (em relação ao comprimento) dos berços disponíveis, duração de atendimento esperado dos navios, horário de término da janela de tempo e o custo de estadia (o custo por unidade de tempo).

Este artigo está assim subdividido: Na seção 2 é abordado o problema de alocação de berços (PAB) na visão de alguns autores. Na seção 3 é apresentada a modelagem e a formulação matemática do problema de acordo com os estudos de Cordeau et al. (2005), com o intuito da investigação e compreensão. Na seção 4 é apresentada a proposta de solução, com a reformulação do modelo PAB de acordo com os estudos de Mauri et al. (2008) e o *Simulated Annealing* adaptado ao PAB. A implementação do algoritmo é apresentada na seção 5, sendo esse desenvolvido com o auxílio da linguagem de programação Delphi®, baseado em informações prévias sobre o horário de chegada do conjunto de navios que chegará ao porto em um determinado dia. O software fornece uma programação dos navios previstos para alocar. A seção 6 trata dos cenários de estudos para analisar o desempenho computacional do software desenvolvido. Por fim, na seção 7, são apresentadas as considerações finais e conclusões.

## 2. Problema de Alocação de Berços

Segundo Moon (2000) o problema de alocação de berços consiste em determinar o período de acostagem e as posições de cada navio no terminal portuário. Cada embarcação requer uma quantidade específica de espaço no cais durante um período predeterminado de tempo para carregar e descarregar contêineres.

Conforme Guan e Cheung (2004), o PAB pode ser descrito como um problema que consiste em atribuir os navios que chegam a um determinado 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 com o intuito de reduzir os custos operacionais.

O Problema de Alocação de Berços (PAB) consistem em atribuir os navios que chegam a um determinado porto para as “posições” de atracações disponíveis ao longo de um cais (berços). Mas enfrentam duas decisões inter-relacionadas: *onde* e *quando* os navios devem atracar. Os navios que chegam ao porto irão atracar no berço mais conveniente, ou em um berço livre que

possa recebê-los. Caso não haja berços livres adequados à operação do navio em questão, este navio irá para uma fila de navios aguardando atracação. Deste modo, o tempo que o navio fica aguardando um berço de atracação em fila é o parâmetro que se utiliza como principal nível de serviço na área portuária (FERNANDES, 2001; CORDEAU et al., 2005).

### 3. Modelagem e Formulação Matemática 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.

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 (ver Cordeau, 2001). Neste trabalho, PAB é representado inicialmente através do modelo matemático proposto por Cordeau et al. (2005).

Assim, no modelo PAB, os navios são tratados como clientes e os berços como garagens ou depósitos (cada um com seu veículo específico). Existem “ $m$ ” veículos (uma para cada garagem), sendo que cada um inicia e termina sua “rota” na sua própria garagem. Os navios são modelados como vértices em um multigrafo (grafos que permitem arestas paralelas e laços), onde cada garagem (berço) ainda é dividida em um vértice de origem e um de destino. Esses vértices de origem e destino são criados no modelo a fim de fazer corresponder ao período de funcionamento dos berços.

O modelo descrito por Cordeau et al. (2005), é tratado em sua forma discreta e pode ser representado por um multigrafo  $G^k = (V^k, A^k)$ ,  $\forall k \in M$ , onde  $V^k = N \cup \{o(k), d(k)\}$  e  $A^k \subseteq V^k \times V^k$ .

A representação dos conjuntos, as variáveis e constantes utilizadas no modelo são descritos abaixo.

$N$  conjunto de navios;

$M$  conjunto de berços;

$x_{ij}^k \in \{0,1\} \forall k \in M, \forall (i, j) \in A^k, x_{ij}^k = 1$  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 que o primeiro navio atracou no berço  $k$ ;

$T_{d(k)}^k \forall k \in M$ , é o horário que o último navio atracou no berço  $k$ ;

$t_i^k$  é a duração do atendimento do navio  $i$  no berço  $k$ ;

$a_i$  horário de chegada para o navio  $i$ ;

$b_i$  horário de término de janela de tempo ( horário limite do atendimento do navio) para o navio  $i$ ;

$v_i$  valor (custo) de tempo de serviço para o navio  $i$ ;

$s^k$  horário de abertura do berço  $k$ ;

$e^k$  horário de fechamento do berço  $k$ ;

$M_{ij} = \max\{b_i + t_i^k - a_j, 0\}, \forall k \in M \text{ e } \forall (i, j) \in N$ .

O modelo apresentado por Cordeau et al. (2005) é formulado como:

**Minimizar:**

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

**Sujeito à:**

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

$$\sum_{j \in \text{NU}\{d(k)\}} x_{0(k)j}^k = 1 \quad \forall k \in M \quad (3)$$

$$\sum_{i \in \text{NU}\{o(k)\}} x_{id(k)}^k = 1 \quad \forall k \in M \quad (4)$$

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

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

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

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

$$T_{0(k)}^k \geq s^k \quad \forall k \in M \quad (9)$$

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

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

A equação (1) representa a função objetivo que consiste em minimizar o tempo decorrido desde o momento em que os navios chegam, atracam e são atendidos, correspondendo ao custo total da alocação. A restrição (2) garante que cada navio é alocado somente a um único berço, onde o navio de índice  $j$  é atendido após o navio de índice  $i$  no berço  $k$ . A restrição (3) garante que somente um navio será o primeiro a ser atendido no berço  $k$ , ou seja, existe somente um navio de índice  $j$  que estará unido ao vértice de origem  $o(k)$ . Analogamente a restrição (4) garante que um único navio também será o último a ser atendido no berço  $k$ , esse navio de índice  $i$  estará unido ao vértice de destino  $d(k)$ . A restrição (5) garante a conservação de fluxo para os demais navios, ou seja, o atendimento para os navios alocados ao berço  $k$ , que deverão entrar e sair do respectivo berço  $k$ . A restrição (6) faz o cálculo do horário de atracação dos navios, estes precisam respeitar a capacidade dos berços. As restrições (7) e (8) garantem, respectivamente que o horário de atracação seja após a chegada dos navios e que o horário de término de 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. Finalmente a restrição (11) garante que as variáveis de decisão sejam binárias.

#### 4. Modelo Proposto e Simulated Annealing aplicado ao PAB

##### 4.1 Reformulação do Modelo PAB para Aplicação do SA

No modelo proposto por Mauri et al. (2008) as restrições (7) e (8) são relaxadas, sendo transferidas para a função objetivo (13). Analogamente, as restrições (9) e (10) também são transferidas para a função objetivo (14). As demais restrições são mantidas, porém, na função objetivo são adicionados fatores de penalização ( $w = [w_0, w_1, w_2]$ ) para cada expressão. O novo modelo proposto é apresentado a seguir:

**Minimizar**

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

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

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

Sujeito à

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

$$\sum_{j \in \text{NU}\{d(k)\}} x_{0(k)j}^k = 1 \quad \forall k \in M \quad (16)$$

$$\sum_{i \in \text{NU}\{o(k)\}} x_{id(k)}^k = 1 \quad \forall k \in M \quad (17)$$

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

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

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

Nesse modelo, podemos 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.

Analisando as restrições do modelo acima, podemos notar que se trata de um Problema de Roteamento de Veículos com Garagens Múltiplas SEM Janelas de Tempo, ou seja, um problema cuja resolução é menos árdua em relação ao modelo descrito anteriormente (com janelas de tempo). O modelo (12 a 20) pode resultar em soluções inviáveis para o PAB, porém essas inviabilidades são eliminadas através da penalização  $w_i$  imposta.

## 4.2 Metodologia

### 4.2.1 Simulated Annealing Adaptado ao PAB

Para avaliar o desempenho do modelo foi desenvolvido um software baseado na heurística *Simulated Annealing* (Recozimento Simulado).

O algoritmo *Simulated Annealing* descrito a seguir, tem como ideia principal permitir que a movimentação dentro do espaço de busca possa ir para um ponto de custo superior, ou seja, possibilita a deteriorização da solução atual para que seja possível evitar mínimos locais. O procedimento é inspirado no fenômeno físico de resfriamento de metais. Inicialmente, com o metal quente, as partículas possuem muita energia e podem se locomover aleatoriamente sem restrições. A partir do momento que a temperatura vai esfriando, as moléculas tendem a se acomodar na estrutura cristalina natural do material em uso. Esta acomodação é baseada no princípio de minimização da energia total do metal.

Enquanto a temperatura é alta, mesmo atingindo uma região mais estável (melhor valor da função objetivo) ainda é possível um salto aleatório para qualquer outra posição. Estudos mostram que se a temperatura é resfriada lentamente, a estrutura final tende a ser a de menor energia, definida pelo tipo de material, que é o ótimo global da função. Se a temperatura não for reduzida suficientemente lenta, um mínimo local poderá ser atingido.

O SA é uma estratégia de busca, podendo ser aplicada a diferentes problemas de otimização, que incorpora mecanismos que possibilitam sair de ótimos locais, permitindo a busca de soluções em regiões mais promissoras. O grande desafio e importância na sua aplicabilidade consistem em encontrar o equilíbrio entre a diversificação (exploração diversificada ou busca em largura) e intensificação (exploração focada ou busca em profundidade), veja (BECCENERI, 2008).

A meta-heurística SA é uma ferramenta algorítmica geral, que com modificações relativamente pequenas torna-se adaptável a diferentes problemas de otimização. Mauri et al. (2008), apresenta o modelo relaxado para o modelo de Cordeau et al. (2005) e propõe a meta-heurística SA adaptada para a resolução do problema específico PAB.

A seguir apresenta-se o algoritmo SA implementado, de acordo com Mauri et al. (2008):

1. DADO ( $\alpha, SA_{max}, T_0$  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.  $IterT \leftarrow 0$ ; {Número de iterações na temperatura  $T$ }
6.  $T \leftarrow T_0$ ; {Temperatura corrente}
7. ENQUANTO ( $T > T_c$ ) FAÇA
8.   ENQUANTO ( $IterT < SA_{max}$ ) 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 ( $S$ ).

```

É interessante discorrermos sobre algumas linhas do algoritmo acima.

A linha 1, apresenta os dados de entrada,  $\alpha$  é a taxa de resfriamento,  $SA_{max}$  número máximo de iterações,  $T_0$  temperatura inicial e  $T_c$  temperatura corrente.

Na linha 2, obtém-se uma solução inicial através da heurística de distribuição (são criados inicialmente  $m$  berços vazios. Os  $n$  navios são organizados por ordem de chegada ao porto, e são distribuídos sequencialmente aos berços de forma aleatória, porém sempre verificando se o berço selecionado poderá atender o navio em questão).

Na linha 3, a solução inicial é avaliada através da heurística de programação (são efetuados os cálculos do horário de atracação de cada navio e da função objetivo. Nessa heurística, a sobreposição de horários é eliminada através do cálculo do horário de atracação dos navios).

Na linha 4, atribui-se a  $S^*$  o valor da solução inicial  $S$ , por ser a melhor solução conhecida até este passo. Na linha 5, inicia-se o contador das iterações.

Na linha 6, atribui-se a  $T$  o valor da temperatura inicial ( $T_0$ ). O parâmetro  $T_0$  deve ser suficientemente grande para que todas as transições sejam inicialmente aceitas.

Nas linhas 7 e 8, é estabelecido o critério de parada. Enquanto a temperatura for maior que a temperatura corrente e enquanto o número de iterações for menor que o número máximo de iterações faça o passo da linha 10.

A linha nova representa o incremento das iterações. Na linha 10, gera uma solução vizinha qualquer  $S'$  através de um dos movimentos de troca. Os movimentos de troca são reordenar (seleciona-se um berço e nesse berço é selecionado um navio para trocar de posição com outro navio), realocar (seleciona-se um navio de um berço, atribui esse a outro berço, obrigatoriamente esse navio deverá atender as restrições do berço), trocar navios (seleciona um navio de cada berço e troque-os de lugar, sendo que os navios devem respeitar as restrições impostas pelo berço).

Na linha 11, a solução vizinha  $S'$  é avaliada através da heurística de programação.

Na linha 12, é testada a variação do valor da função objetivo (custo), isto é  $\Delta = f(S') - f(S)$ .

Na linha 13, se  $\Delta < 0$  o método aceita a solução e  $S'$  passa a ser a nova solução corrente. Na linha 14, verifica-se se o valor corrente é menor que o valor armazenado em  $S^*$ .

Em caso afirmativo,  $S^*$  recebe o valor de  $S'$ .

Da linha 15 a linha 19, se  $\Delta \geq 0$  a solução vizinha candidata também poderá ser aceita, mas neste caso, com uma probabilidade  $e^{-\Delta/T}$  onde,  $T$  é o parâmetro que regula a probabilidade de aceitação de soluções de pior custo.

Na linha 20, determina-se que a temperatura seja atualizada após um número fixo de iterações (o número de iterações necessárias para o sistema atingir o equilíbrio térmico em uma dada temperatura), a temperatura é gradativamente diminuída por uma razão de resfriamento  $\alpha$ . Com esse procedimento, no início, dá-se uma chance maior para escapar de mínimos locais e, à medida que  $T$  aproxima-se de zero, o algoritmo comporta-se como um método de descida, uma vez que diminui a probabilidade de se aceitar movimentos de piora.

O procedimento para quando a temperatura chega a um valor próximo de zero ( $T_c$ ) e nenhuma solução que piore o valor da melhor solução é mais aceita, isto é, quando o sistema está estável. A solução obtida quando o sistema encontra-se nesta situação evidencia o encontro de um mínimo local, o que em alguns casos também pode representar um mínimo global.

Maiores detalhes de como gerar uma solução inicial através das heurísticas de distribuição e programação, e os movimentos de troca (reordenar, realocar e trocar navios) bem como toda a técnica heurística *Simulated Annealing* são apresentadas com detalhes em Mauri et al. (2008) e Mauri (2008).

## 5. Implementação do Algoritmo Proposto

O software desenvolvido (ver Rodrigues, 2012) utiliza a técnica *Simulated Annealing* para resolver o problema e permitirá ao usuário à simulação de diferentes cenários com o intuito de encontrar a melhor alocação dos navios aos berços, com isso reduzir (minimizar) a fila de espera dos navios bem como calcular a melhor janela de tempo a ser oferecida ao armador pelo terminal.

O software é baseado em informações prévias sobre data e horário de chegada dos navios, duração da janela de tempo (período de tempo em minutos oferecido pelo terminal ao armador, para que o navio num determinado dia possua a garantia de um berço reservado para atracação ou o pagamento de penalidades pelo terminal caso esse chegue na janela determinada e não possa atracar em virtude de não haver disponibilidade de berço). A partir da informação sobre os horários e datas, o software distribui e programa os navios aos berços ao longo do período previamente estabelecido (aproximadamente a programação é de 2 meses de antecedência disponibilizada por um Terminal de Contêineres no Porto de Rio Grande).

A programação de alocação dos navios é realizada com o menor custo possível que o Terminal terá que pagar caso algum berço não esteja disponível quando o navio chegar dentro da sua janela de tempo.

O programa foi desenvolvido com o auxílio da linguagem de programação Delphi®, pois este permite incluir diversas facilidades de simulação e possibilita a representação de aspectos dinâmicos, dessa forma tornando o modelo mais aderente à realidade que se deseja representar.

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

Para uma melhor compreensão sobre a programação de alocação que o software proporciona, será abordado um exemplo, com 10 navios que necessitam ser alocados em 2 berços disponíveis no Terminal num determinado período de tempo.

Primeiramente o usuário insere os dados dos navios no software conforme Figura 1, através de uma planilha Excel.

----- LISTA PREVISTA DA CHEGADA DOS NAVIOS -----

NOME	TAMANHO	TEMPO	R\$/min	CHEGADA	JANELA DE TEMPO (bi)
Navio 01	104 m	11:40:00	1,00	sex - 17/02/2012 - 08:15:00	sáb - 18/02/2012 - 06:15:00
Navio 02	90 m	10:50:00	1,00	sáb - 18/02/2012 - 03:00:00	sáb - 18/02/2012 - 17:40:00
Navio 03	130 m	09:35:00	1,00	sáb - 18/02/2012 - 05:16:00	sáb - 18/02/2012 - 21:16:00
Navio 04	260 m	07:20:00	1,00	sáb - 18/02/2012 - 16:00:00	dom - 19/02/2012 - 15:50:00
Navio 05	120 m	05:00:00	1,00	dom - 19/02/2012 - 16:00:00	seg - 20/02/2012 - 15:00:00
Navio 06	310 m	10:19:00	1,00	dom - 19/02/2012 - 09:00:00	seg - 20/02/2012 - 08:50:00
Navio 07	315 m	04:00:00	1,00	dom - 19/02/2012 - 07:00:00	dom - 19/02/2012 - 20:00:00
Navio 08	240 m	08:40:00	1,00	seg - 20/02/2012 - 12:00:00	ter - 21/02/2012 - 10:00:00
Navio 09	210 m	06:50:00	1,00	ter - 21/02/2012 - 14:23:00	qua - 22/02/2012 - 11:23:00
Navio 10	85 m	03:50:00	1,00	ter - 21/02/2012 - 13:00:00	qua - 22/02/2012 - 04:00:00

**Figura 1 - Lista dos navios**

O próximo passo é cadastrar os berços disponíveis no Terminal, na Figura 2 são apresentados os dados necessários para cadastrar os berços.

----- LISTA DE BERÇOS -----

NOME	CAPACIDADE	DIAS DE OPERAÇÃO
01 - Berço 1	320 m	SEG, TER, QUA, QUI, SEX, SÁB, DOM
02 - Berço 2	205 m	SEG, TER, QUA, QUI, SEX, SÁB, DOM

  

----- INTERVALO DE ABERTURA -----

BERÇO	SEGUNDA	TERÇA	QUARTA	QUINTA	SEXTA	SÁBADO	DOMINGO
01	00:00:00 - 23:50:00	00:00:00 - 23:50:00	00:00:00 - 23:50:00	00:00:00 - 23:50:00	00:00:00 - 23:50:00	00:00:00 - 23:50:00	00:00:00 - 23:50:00
02	00:00:00 - 23:50:00	00:00:00 - 23:50:00	00:00:00 - 23:50:00	00:00:00 - 23:50:00	00:00:00 - 23:50:00	00:00:00 - 23:50:00	00:00:00 - 23:50:00

**Figura 2 - Lista dos berços**

O último passo é aplicar a técnica *Simulated Annealing*, o software admite que o usuário fixe navios aos berços, caso um determinado navio só possa ser atendido por este berço.

Na Figura 3 é apresentada a programação dos navios no período de tempo determinado. Nota-se que os 10 navios são atracados nos berços, respeitando o comprimento do berço e o horário reservado para a operação de atividades. Os navios são alocados com um custo menor possível.



----- RESULTADO POR DATA -----  
SOLUÇÃO FINAL (Simulated Annealing)

Data	Berço n°	Alocado	Navio	Comprimento	Custo	Chegada	Atracou	Tempo	Saiu	bi	Berço Nor
17/02/2012											
sexta											
	02										Berço 2
		SIM	Navio 01	104	01,00	sex 17/02/2012 08:15:00	08:15:00	11:40:00	19:55:00	sáb 18/02/2012 08:15:00	↑ABERTO
18/02/2012											
sábado											
	01										Berço 1
		SIM	Navio 02	090	01,00	sáb 18/02/2012 03:00:00	03:00:00	10:50:00	13:50:00	sáb 18/02/2012 17:40:00	↑ABERTO
		SIM	Navio 05	260	01,00	sáb 18/02/2012 16:00:00	16:00:00	07:20:00	23:20:00	dom 19/02/2012 15:50:00	
	02										Berço 2
		SIM	Navio 03	130	01,00	sáb 18/02/2012 05:16:00	05:16:00	09:35:00	14:51:00	sáb 18/02/2012 21:16:00	↑ABERTO
19/02/2012											
domingo											
	01										Berço 1
		SIM	Navio 08	315	01,00	dom 19/02/2012 07:00:00	07:00:00	04:00:00	11:00:00	dom 19/02/2012 20:00:00	↑ABERTO
		SIM	Navio 07	310	01,00	dom 19/02/2012 09:00:00	11:00:00	10:19:00	21:19:00	seg 20/02/2012 08:50:00	
	02										Berço 2
		SIM	Navio 04	120	01,00	dom 19/02/2012 16:00:00	16:00:00	05:00:00	21:00:00	seg 20/02/2012 15:00:00	↑ABERTO
20/02/2012											
segunda											
	01										Berço 1
		SIM	Navio 09	240	01,00	seg 20/02/2012 12:00:00	12:00:00	08:40:00	20:40:00	ter 21/02/2012 10:00:00	↑ABERTO
21/02/2012											
terça											
	01										Berço 1
		SIM	Navio 06	210	01,00	ter 21/02/2012 14:23:00	14:23:00	08:50:00	21:13:00	qua 22/02/2012 11:23:00	↑ABERTO
	02										Berço 2
		SIM	Navio 10	085	01,00	ter 21/02/2012 13:00:00	13:00:00	03:50:00	16:50:00	qua 22/02/2012 04:00:00	↑ABERTO

**Figura 3 - Programação dos Navios**

O software gera um relatório dos resultados obtidos durante o processo, apresenta as melhores soluções obtidas bem como os parâmetros na aplicação da técnica SA. São também registrados o total de movimentos de realocações, reordenações e trocas dos navios permitindo uma avaliação maior sobre essa estrutura de vizinhança que utiliza os três movimentos, que possibilita a análise do custo no período da alocação.

## 6. Experimentos Computacionais

Para a simulação dos cenários foram coletados dados dos navios, no site (<http://www.teconline.com.br/Terminais/Forms/NavioProgramacaoConsultar.aspx>) do Terminal de Contêineres Tecon, no período de 01/01/2012 a 31/01/2012. Os dados obtidos foram: horário e data de chegada prevista, comprimento do navio (m), tempo de atendimento (duração prevista da operação), duração da janela de tempo (período que o navio tem o berço reservado desde a chegada ao porto até a sua saída). Em relação ao valor do custo (R\$) esse dado não foi disponibilizado, então foi atribuído o valor 1. Para avaliar o desempenho do método foram utilizados 6 problemas testes conforme Tabela 1.

Tabela 1: Cenários de estudos obtidos com o método proposto utilizando 3 berços

Quantidade navios	Tempo de Processamento (min::s)	Custo Final (R\$)	Total Reordenações	Total Realocações	Total Trocas
10 navios	00:01:45:770	16.070,80	34.265	313.989	109.614
15 navios	00:02:40:978	19.626,20	19.706	476.031	165.871
25 navios	00:03:43:929	42.041,80	72.062	858.887	318.709
40 navios	00:05:40:106	83.017,80	136.007	1.157.149	475.933
55 navios	00:07:32:555	174.688,30	241.621	1.611.695	679.609
62 navios	00:13:26:321	215.320,50	356.852	2.008.226	882.256

Os testes foram realizados em um PC com processador Intel® Pentium® Dual CPU T3400 2.17 GHz e 2 GB de memória RAM. A implementação foi desenvolvida com o auxílio da linguagem de programação Delphi® baseada em *Object Pascal (Pascal com extensões orientadas a objetos)*. Os parâmetros utilizados foram:  $\alpha = 0,975$ ,  $T_0 = 40000$ ,  $T_c = 0,01$  e  $SA_{max} = 1000$  e as penalizações utilizadas foram  $w = [1,10,10]$ . Esses parâmetros foram obtidos de Mauri et al. (2008).

Os movimentos de reordenações, realocações e trocas mostrou ser adequado e eficiente para exploração do espaço de soluções.

Os resultados mostram a viabilidade do método proposto, onde testes baseados em dados reais proporcionam soluções de alta qualidade, para problemas relativamente grandes e em tempos de processamento expressivamente baixos.

O software proposto possibilita desenvolver cenários que se aproximam da realidade, mostrando que é possível facilitar o trabalho dos operadores logísticos, pois, muitos portos, até pouco tempo, realizavam manualmente a elaboração do plano de atracação.

## 7. Conclusão

A estratégia de solução adotada por Mauri et al. (2008) para o Problema de alocação de Berços é apropriada para a programação aqui realizada, que foram construídos a partir de situações reais encontradas na programação de navios de um Terminal de Contêineres.

Como o Problema de Alocação de Berços (PAB) é um dos problemas presentes no sistema portuário, o estudo em tecnologia para aperfeiçoar o problema é crescente, pois a logística é fundamental no desempenho portuário, dessa maneira contribuem para acelerar o desenvolvimento econômico que por sua vez é condição indispensável à continuidade do processo, a expansão e o aperfeiçoamento do sistema de transportes.

Finalmente, espera-se que esse trabalho tenha contribuído para evidenciar a importância do uso do algoritmo *Simulated Annealing* na resolução do problema de alocação de berços no sistema portuário e venha incentivar o leitor na implementação de ferramentas computacionais.

## Referências

- BECCENERI, J. C.(2008) Computação e Matemática Aplicada às Ciências e Tecnologias Espaciais. *Meta-heurísticas e Otimização Combinatória: Aplicações em Problemas Ambientais*. INPE, São José dos Campos, p.65-81.
- CASSEL, G. L. e VACCARO, G. L. R.(2007) A Aplicação de simulação-otimização para a definição do mix ótimo de produção de uma indústria metal-mecânica. *Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, Foz do Iguaçu.
- CORDEAU, J. F.; LAPORTE, G. e MERCIER, A.(2001) A unified tabu search heuristic for vehicle routing problems with time windows, *Journal of the Operational Research Society*, vol. 52, pp. 928-936.
- CORDEAU, J.F.; LAPORTE, G. ; LEGATO, P e Moccia, L. (2005) Models and tabu search heuristics for the berth allocation problem. *Transportation Science*, vol. 39, pp. 526-538.
- FERNANDES, M. G. (2001) Modelo econômico-operacional para análise e dimensionamento de terminais de contêineres e veículos. *Dissertação (Mestrado em Engenharia Naval e Oceânica)*, Universidade de São Paulo. São Paulo.
- FLEURY, P. F. (1998) Perspectivas para a logística brasileira. *Revista Tecnológica*, vol. maio, n. 30, pp. 26.
- GUAN, Yongpei e CHEUNG, Raymond K. (2004) The berth allocation problem: models and solutions methods. *OR Spectrum*, vol. 26, p. 75-92.
- LEGATO, P.; MONACO, F. e TIGANI, N. (2001) Berth planning at Gioia Tauro's maritime terminal by logistic distribution models. *Annual Conference Of Italian Operational Research Society*, 32, 2001, Cagliari. Proceedings Cagliari: AIRO.
- MAURI, G.R.; OLIVEIRA, A.C.M.e LORENA L.A.N. (2008) Heurística baseada no Simulated Annealing aplicada ao problema de alocação de berços. *GEPROS - Gestão da Produção, Operações e Sistemas*, Ano 3, vol.1, n.1, pp. 113-127.
- MAURI, G. R.(2008) Novas abordagens para representação e obtenção de limitantes e soluções para alguns problemas de otimização combinatória. *Tese (Doutorado em Computação Aplicada)*, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. São José dos Campos.
- MOON, K. C. (2000) A mathematical model and a heuristic algorithm for berth planning. Brain Korea 21 Logistics Team, July, 2000.
- RODRIGUES, M.H.P. (2012) Simulated Annealing: Uma proposta de resolução para o Problema de alocação de berços em Terminais de Contêineres. *Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica)*, Universidade Federal do Rio Grande – FURG. Rio Grande, RS
- SILVA, V.M.D.e COELHO A.S. (2007) Uma Visão sobre o problema de alocação de berços. *Revista Produção Online*, vol.7, n.2. ISSN 1676-190.
- VIEIRA, G. B. B.; PASA, G. S.; SANTOS, C. H. S.; BASSANESI, M. M. R. e MACHADO, J. K. (2006) O nível de serviço do Tecon Rio Grande a partir da ótica dos usuários. *III SINAP - Simpósio Internacional de Gestão de Negócios em Ambiente Portuário*.