

Simulated annealing aplicado ao problema de alocação de berços

[Simulated annealing applied to the berth allocation problem]

Merhy Heli Paiva Rodrigues*, Catia Maria dos Santos Machado,
Milton Luiz Paiva de Lima

Universidade Federal do Rio Grande - FURG - Brazil

Submitted 31 May 2012; received in revised form 3 Oct 2012; accepted 16 Nov 2012

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. Para aplicação do Simulated Annealing foi desenvolvido um software, possibilitando realizar cenários mais próximos das atividades praticadas nos portos. Os resultados computacionais são obtidos através de problemas testes com dados reais do Terminal de Contêineres Tecon Rio Grande.

Palavras-Chave: roteamento, alocação, simulated annealing, portos.

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. For application of Simulated Annealing, software was developed, enabling scenarios closest to perform activities practiced in ports. The computational results are obtained through test problems with real data from the Container Terminal Tecon Rio Grande.

Key words: routing, allocation, simulated annealing, ports.

* Email: merhyheli@hotmail.com.

Recommended Citation

Rodrigues, M. H. P., Machado, C. M. S. and Lima, M. L. P. (2013) Simulated annealing aplicado ao problema de alocação de berços. Journal of Transport Literature, vol. 7, n. 3, pp. 117-136.

Introdução

O comércio internacional tem assumido proporções significativas, merecendo destaque os volumes transportados pelo modal marítimo, uma vez que uma significativa porcentagem das operações de comércio internacional é realizada com o uso desta modalidade de transporte. Portanto, os portos desempenham um papel muito importante sendo como um elo entre os modais terrestre e marítimo. (Vieira, 2006)

Segundo Arruda e Bastos (2000) um porto eficiente, e operacionalmente eficaz, cuida não só de estabelecer tarifas justas e competitivas, mas responde também a ótica dos clientes, para os quais o que realmente interessa é o custo total e a eficiência da operação portuária.

Para Fleury (1998), nos portos estão as 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. Dessa forma, buscam-se ferramentas que auxiliem na tomada de decisão de maneira a atender o crescimento da demanda de navios sem que haja aumento de custos, seja por demora no atendimento ou ineficiência da operação.

Assim, a busca por uma logística de modo a minimizar o tempo de espera e atendimento dos navios motivou o surgimento do problema portuário que aborda a programação e a alocação de navios às áreas de atracação ao longo de um cais. Na literatura o problema é conhecido como Problema de Alocação de Berços (PAB) e consiste em alocar navios a posições de atracação de forma que seja utilizado o máximo de espaço do cais minimizando o tempo de serviço.

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.

Diversos estudos e técnicas são encontrados na literatura 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).

Para Cordeau et. al (2005) as principais decisões a serem tomadas neste processo envolvem a escolha de *onde* e *quando* os navios deverão atracar. Dessa forma, foi realizado um estudo detalhado do modelo desenvolvido por Mauri et. al. (2008) e dos fundamentos matemáticos da técnica *Simulated Annealing* (SA) sobre o trabalho de Mauri et. al. (2008) e Cordeau et. al (2005).

Os resultados obtidos por Mauri et. al. (2008), a partir de testes gerados aleatoriamente por Cordeau et al. (2005), mostraram soluções de qualidade em tempo de processamento expressivamente baixo. No entanto, como o próprio autor sugere seria interessante se o modelo e a técnica SA fossem testados em problemas reais encontrados em portos brasileiros.

Nesse sentido, o trabalho proposto teve como objetivo aplicar o modelo desenvolvido por Mauri et. al. (2008) em um Terminal de Contêineres, bem como desenvolver um aplicativo dinâmico de alocação de navios aos berços utilizando a técnica *Simulated Annealing*, diferenciando-se dos demais estudos encontrados, possibilitando realizar cenários mais próximos das atividades praticadas nos portos.

O aplicativo desenvolvido possibilita utilizar uma interface para, através de *menus*, controlar e variar parâmetros, executar o modelo, além de inspecionar os resultados que vão sendo obtidos durante o processo de minimização da função objetivo. Além disso, permitirá ao usuário a simulação de cenários para regras de atracação. A facilidade de implementação e principalmente a robustez das técnicas SA na resolução do problema de alocação e programação de navios a berços poderá ser observada a partir dos cenários construídos sobre os dados reais do Terminal de Contêineres do Porto do Rio Grande.

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).

Este trabalho está subdividido da seguinte forma: na Seção 1 será apresentada a modelagem e a formulação matemática do problema de acordo com os estudos de Mauri et. al. (2008) e

Cordeau et al. (2005), com o intuito da investigação e compreensão. Na Seção 2 será apresentada a metodologia da técnica *Simulated Annealing* que consiste numa técnica de busca local probabilística e fundamenta-se numa analogia com a termodinâmica. Ainda nessa seção, é descrito os passos do algoritmo SA na resolução do problema específico de alocação de berços. Na Seção 3, é apresentada a operacionalização do aplicativo que fornece uma programação dos navios previstos para alocar em um determinado período de tempo, sendo esse desenvolvido com o auxílio do software Delphi®, baseado em informações prévias sobre o horário de chegada dos navios ao porto em um período de tempo determinado. Na Seção 4, são apresentados os resultados computacionais da alocação de navios aos berços, no período de 1 mês, no Terminal de Contêineres Tecon do Porto do Rio Grande. Resultados computacionais sobre cenários de estudo, que consideraram outras restrições encontradas nas atividades portuárias, também são apresentados.

1. 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, o 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 atru 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 ;

$M_{ij} = \max\{ b_i + t_i^k - a_j, 0\}, \forall k \in M$ 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:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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.

No entanto, no modelo proposto por Mauri et. al (2008) às restrições (7) e (8) são relaxadas, sendo transferidas para a função objetivo (13). De forma análoga, as restrições (9) e (10) também são transferidas para a função objetivo (14). As demais restrições são mantidas. Ainda na função objetivo são adicionados fatores de penalização w_i para cada termo.

O modelo apresentado por Mauri et al. (2008) é então formulado como:

Minimizar

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

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

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

Sujeito à

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

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

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

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

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

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

Segundo Mauri et al. (2008), nessa formulação o problema tem resolução menos árdua do que na formulação anterior e torna-se um problema de Roteamento de Veículos com Garagens Múltiplas Sem Janelas de Tempo. A solução inicial para o problema é gerada através de uma heurística de distribuição de berços e programação de navios. A heurística de distribuição de berços aos navios é aleatória, porém existe a necessidade de verificar se o berço selecionado poderá atender o navio em questão. Na heurística de programação são efetuados os cálculos de horário de atracação de cada navio e da função objetivo da solução (eq. (12), (13) e (14)). Como estruturas de vizinhanças são utilizados três movimentos de troca, esses movimentos

permitem reordenar, realocar e trocar navios, onde cada solução vizinha é gerada por apenas um desses movimentos, sendo essa escolha aleatória.

2. Metodologia

2.1 Simulated Annealing

O *Simulated Annealing* é um algoritmo aproximativo de busca local proposto por Kirkpatrick et al. (1983), inspirado no processo físico de resfriamento de sólidos visando atingir formas bem definidas após o fim do processo. Começando com uma solução inicial, e armado com funções adequadas de perturbação e avaliação, o algoritmo executa uma busca parcial estocástica do espaço de soluções. Os movimentos que pioram a avaliação da solução corrente são aceitos ocasionalmente com uma probabilidade controlada por um parâmetro (T) chamado temperatura. A probabilidade da aceitação de movimentos de piora diminui à medida que T diminui. Na alta temperatura, a busca é quase aleatória, quando a temperatura é baixa a busca se torna bem gulosa. Na temperatura zero, a busca é totalmente gulosa, isto é, apenas os movimentos bons são aceitos.

Segundo Becceneri, (2008), a técnica 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).

2.2 Descrição do Algoritmo SA para o PAB

A metodologia SA é metáfora de um processo térmico, annealing ou recozimento, utilizado em metalurgia para obtenção de estados de baixa energia num sólido. 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, para ter, como resultado prático, uma redução dos defeitos do material, possibilitando atingir o ótimo global da função. Se a temperatura não for reduzida suficientemente lenta, um mínimo local poderá ser atingido.

O SA é dotado de parâmetros como temperatura inicial, taxa de resfriamento e número máximo de iterações por grau de temperatura, que devem ser devidamente ajustados para a obtenção de bons resultados.

A seguir apresenta-se o algoritmo SA implementado, de acordo com Mauri et al. (2008) para o problema de alocação em berços.

1. DADO (α , 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).

Discorreremos sobre as linhas do algoritmo SA, para um entendimento melhor da técnica, quando aplicado ao problema PAB.

A Linha 1, apresenta os dados de entrada, α 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 9 representa o incremento das iterações. Na Linha 10, gera-se uma solução vizinha qualquer S' através de um dos movimentos de troca. Os movimentos de troca são *reordenar* navios (troca de posição na sequência de atendimento de dois navios selecionados em um determinado berço), *realocar* navios (um navio é selecionado de um berço e atribuído a outro berço, obrigatoriamente o navio selecionado deverá atender as restrições impostas pelo berço), *trocar* navios (dois navios são selecionados e trocados de berços, obrigatoriamente os navios selecionados deverão atender as restrições impostas pelos berços).

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 α . 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 poderá representar um mínimo global.

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

3. Operacionalização do Aplicativo para o modelo PAB

O aplicativo desenvolvido utiliza a técnica Simulated Annealing para resolver o problema e permitirá ao usuário à simulação de 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 possibilitar ajustar a janela de tempo a ser oferecida ao armador pelo terminal.

O aplicativo 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 à janela determinada e não possa atracar em virtude de não haver disponibilidade de berço). A partir da informação sobre os horários e datas, o aplicativo distribui e programa os navios aos berços ao longo do período previamente estabelecido (a programação dos navios é disponibilizada aproximadamente com 2 meses de antecedência pelo Terminal de Contêineres no Porto do Rio Grande).

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 interface da ferramenta desenvolvida possibilita gerar um relatório sobre os dados dos navios: listagem ordenada da chegada dos navios ao porto; listagem dos berços (capacidade, horário de abertura e fechamento). São ainda registrados todos os resultados (Figura 1) obtidos durante o processo, as melhores soluções obtidas bem como os parâmetros na aplicação da técnica SA. Também, são registrados o total de movimentos de *realocação*, *reordenação* e *troca* de navios permitindo uma avaliação maior sobre essa estrutura de vizinhança que utiliza os três movimentos, onde a escolha é feita de forma aleatória, porém uniformemente distribuída. Salientamos que existe a possibilidade de fixar navios aos berços, visto que, em situações reais determinados navios só poderão ser alocados em berços apropriados ao seu tipo de carga.

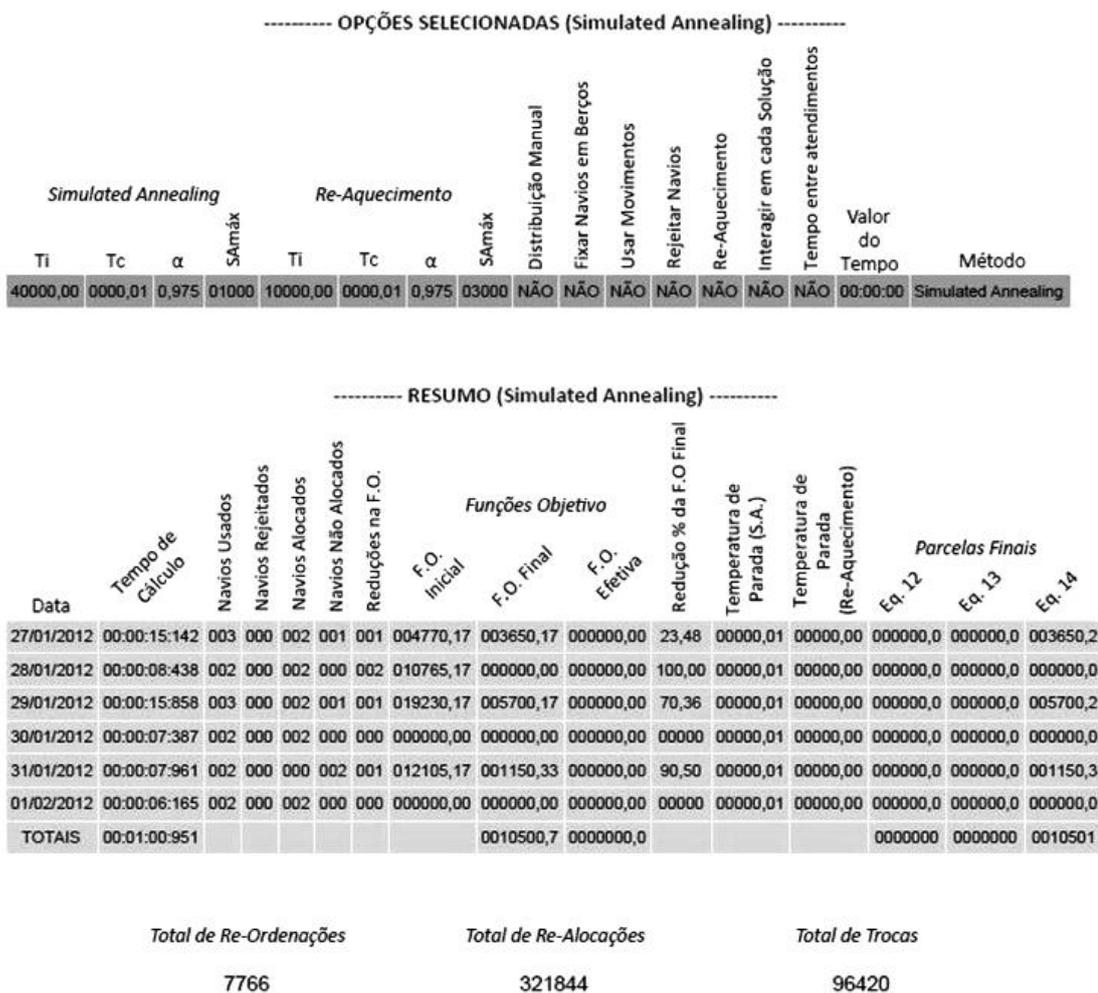


Figura 1- Registro dos Resultados¹

A operacionalização e o menu de opções do aplicativo serão descritos, a fim de motivar o leitor a implementar uma ferramenta computacional, baseada na técnica *Simulated Annealing*, para resolver o problema de alocação de berços de maneira prática e eficiente.

Inicialmente são cadastrados os navios e os berços, e as opções são descritas a seguir:

- **Adicionar Navios** – informações sobre nome do navio, data e hora de chegada prevista, comprimento (m), tempo de atendimento, duração da janela de tempo, custo por minuto (R\$). A leitura dos dados é feita através de um arquivo Excel em formato .xls.

¹ Fonte: Rodrigues (2012).

- **Cadastrar Berços** – informações sobre nome do berço, capacidade em relação ao comprimento (m), dia da semana em que o berço opera constando o horário de abertura e fechamento do berço.

Após os navios inseridos e os berços cadastrados, a técnica SA é escolhida para resolução do PAB. São informados os parâmetros de entrada, solução inicial e tempo entre atendimentos. Essas opções são descritas a seguir:

A opção **Calcular** executa o algoritmo SA. Nessa opção são informados os parâmetros de entrada e a escolha do método de cálculo (*Simulated Annealing* ou *Simulated Annealing+Reaquecimento*). A técnica de Reaquecimento permite que o usuário tenha a possibilidade de encontrar soluções melhores que as soluções obtidas sem o reaquecimento, nesse caso o algoritmo SA é novamente executado, tendo como solução inicial a melhor solução encontrada.

A opção **Tempo entre atendimentos** define um tempo de parada do berço durante a saída de um navio e atracação de outro.

A solução inicial poderá ser obtida a partir da opção **Definida pelo Usuário**, onde os navios podem ser distribuídos (inseridos) aos berços manualmente (quando selecionada a opção) ou aleatoriamente conforme heurística de distribuição, quando essa opção não for selecionada.

Com o intuito de tornar o aplicativo mais dinâmico e o modelo mais aderente a realidade praticada nos portos também foi criada as opções de:

- **Fixar Navios em Berços** – determinados navios só podem ser atendidos por berços específicos, de forma que os mesmos não podem ser alocados em outros berços.
- **Rejeitar Navios** – cancela a programação do navio de um determinado dia, sendo esse automaticamente transferido para a lista dos navios do próximo dia.

O aplicativo também permite que o usuário através da opção **Mostrar operações** acompanhe os resultados sobre o valor das melhores soluções da função objetivo de cada dia de alocação dos navios aos berços, as iterações na estrutura de vizinhança e o resfriamento T_c .

Após, todos os cálculos realizados, o aplicativo apresenta uma listagem com as datas dos navios alocados, onde é possível visualizar o valor da função objetivo inicial e final, tempo de processamento do algoritmo, a quantidade de navios alocados e não alocados em determinado dia.

Finalmente, a opção **Salvar** que contém os registros, da programação dos navios aos berços, em um arquivo no formato pdf. E a opção Temas que modifica a visualização da interface, alterando cores e formas dos menus.

4. 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 do Porto do Rio Grande, 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 em 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 unidade monetária. Para avaliar o desempenho do método foram utilizados 6 problemas testes conforme Tabela 1.

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 do software Delphi® baseada em *Object Pascal (Pascal com extensões orientadas a objetos)*. Os parâmetros utilizados foram: $\alpha = 0,975$, $T_i = 40000$, $T_c = 0,01$ e $SA_{max} = 1000$ e as penalizações utilizadas foram $w = [1,10,10]$. Para o reaquecimento os parâmetros foram $\alpha = 0,975$, $T_i = 40000$, $T_c = 0,01$ e $SA_{max} = 2000$, os mesmos obtidos por Mauri et. al. (2008).

A Tabela 1 mostra os testes realizados com a técnica *Simulated Annealing* e *Simulated Annealing* + Reaquecimento.

Tabela 1: Cenários de estudos obtidos com o método proposto utilizando 3 berços²

	Testes	10 navios	15 navios	25 navios	40 navios	55 navios	62 navios
Simulated Annealing	Tempo (h:min:s)	00:01:45	00:02:40	00:03:43	00:05:40	00:07:32	00:13:26
	Z*	16.070,80	19.626,20	42.041,80	83.017,80	174.688,30	215.320,50
	Reordenações	34.265	19.706	72.062	136.007	241.621	356.852
	Realocações	313.989	476.031	858.887	1.157.149	1.611.695	2.008.226
	Trocas	109.614	165.871	318.709	475.933	679.609	882.256
Simulated Annealing + Reaquecimento	Tempo (h:min:s)	00:03:34	00:05:24	00:08:39	00:13:40	00:20:48	00:27:13
	Z*	16.070,80	19.626,20	42.041,80	83.017,80	174.688,30	215.320,50
	Reordenações	41.070	157.843	94.241	284.927	686.506	909.736
	Realocações	1.014.985	1.374.393	2.438.671	3.379.699	4.718.451	6.043.475
	Trocas	310.206	526.017	874.357	1.353.062	2.018.445	2.592.202

Esses testes foram realizados com o intuito de avaliação do tempo de processamento do algoritmo e do custo final em relação à quantidade de navios a serem alocados no período de um mês. O Terminal de Contêineres Tecon do Porto do Rio Grande utiliza 3 berços, os navios que utilizam o terminal podem ser atendidos por qualquer berço e o tempo entre atendimentos é fixado em 2 horas.

Embora não se tenha acesso à modelagem e a técnica utilizada que serve de suporte para o sistema informatizado de alocação de navios aos berços, do Terminal de Contêineres Tecon do Porto do Rio Grande, os resultados sobre os testes realizados mostraram a viabilidade do método proposto. Considerando ainda que, o problema é de otimização combinatória, de natureza não polinomial e o tempo gasto na resolução dos problemas testes não é deterministicamente calculado, boas soluções foram obtidas para o período de tempo estabelecido, apresentando tempos de processamento baixos. Fatores como custo, capacidades dos berços, contribuem para o tempo total de solução. Assim, dependendo da programação dos navios aos berços sobre determinados portos, os tempos computacionais poderão sofrer alterações significativas.

O método *Simulated Annealing* + Reaquecimento não proporcionou melhoria em relação ao método *Simulated Annealing*, dessa maneira a solução dos 6 testes realizados permaneceram iguais. Essa melhora existe e aparece em poucos problemas testes realizados por Mauri et.al. (2008).

² Fonte: Rodrigues (2012)

Cenários de estudo também foram realizados a fim de testar a metodologia quando outras restrições são impostas ao problema, como rejeição e fixação de navios aos berços. As Tabelas 2 e 3 mostram os cenários de estudos realizados sobre a programação de 62 navios através do método *Simulated Annealing* e *Simulated Annealing* + Reaquecimento, em ambos cenários os dados utilizados foram os dados reais do Terminal de Contêineres Tecon do Porto do Rio Grande.

Tabela 2 – Cenários obtidos com o método *Simulated Annealing*³

Cenários	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Simulated Annealing	Sim	Sim	Sim
Rejeitar Navios	Não	Sim	Não
Fixar Navios	Não	Não	Sim
Tempo (h:min:s)	00:13:13	00:17:04	00:20:51
Re-ordenações	304.525	365.507	1.458.455
Re-alocações	1.963.263	1.798.346	0
Trocas	851.481	838.833	0
Valor da Função Objetivo inicial	610.217,53	503.376,26	413.864,02
Valor da Função Objetivo Final (Z^*)	215.320,50	157.434,70	404.974,00

Tabela 3 – Cenários obtidos com o método *Simulated Annealing* + Reaquecimento⁴

Cenários	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6
Simulated Annealing + Reaquecimento	Sim	Sim	Sim
Rejeitar Navios	Não	Sim	Não
Fixar Navios	Não	Não	Sim
Tempo (h:min : s)	00:29:38	00:33:13	00:37:11
Re-ordenações	1.007.248	876.882	2396.276
Re-alocações	5.795.619	5.398.581	0
Trocas	2.580.926	2.344.157	0
Valor da Função Objetivo inicial	458.502,27	336.660,05	413.864,02
Valor da Função Objetivo Final (Z^*)	215.320,50	154.614,30	404.974,00

³ Fonte: Rodrigues (2012).

⁴ Idem.

A seguir algumas observações pertinentes sobre os cenários realizados.

O Cenário 2, é realizado com a intenção de avaliar o desempenho do aplicativo quando os navios são rejeitados (navios que por algum motivo não conseguem chegar na data prevista). Nesse cenário, 10 navios foram rejeitados aleatoriamente, sendo esses automaticamente inseridos na lista de espera. O valor da função objetivo tende a ser menor que no Cenário 1, devido não haver penalização sob o ponto de vista do terminal.

No Cenário 3, os 62 navios foram fixados aos berços, com o intuito de avaliar o custo da solução final e a programação dos mesmos. Nesse cenário não existem os movimentos de *realocação e troca* de navios, visto que todos os navios foram fixos. Dessa forma, observamos que o movimento de reordenação dos navios melhora ainda mais o valor da função objetivo. A metodologia utilizada faz o cálculo da programação dos navios conforme os navios são alocados aos berços com isso minimizando a violação do atendimento dos navios aos berços. Se compararmos o Cenário 1 com o Cenário 3, o valor da função objetivo final do Cenário 1 é bem menor, mas isso é justificado pelas melhorias dos movimentos de *realocação e troca*.

Nos cenários da Tabela 3, são apresentados os resultados com a aplicação do reaquecimento a fim de verificar a possibilidade de melhora da solução final encontrada.

Observamos que no Cenário 4, não há melhora da solução a partir do reaquecimento. No entanto, no Cenário 5 com reaquecimento, correspondente ao Cenário 2 sem reaquecimento, há uma melhora de aproximadamente 1,8 % na solução final. No Cenário 6 com reaquecimento, correspondente ao Cenário 3 sem reaquecimento, não há melhora na solução da função objetivo final, permanecendo essa igual.

Cabe salientar que nos cenários realizados, alguns navios violaram a janela de tempo (tempo de serviço no porto), mas todos foram programados para serem alocados em um dia e horário disponível de modo que essa violação fosse a que gerasse o menor custo possível.

Nesse sentido, os cenários permitem ao tomador de decisão uma análise mais significativa sobre os navios que excederam as janelas de tempo. Dessa forma, existe a possibilidade de realização de novos cenários a partir de estudos e ajustes pertinentes sobre a violação de

janelas de tempo dos navios. Esses cenários de estudo e a fonte de dados podem ser encontrados no trabalho de Rodrigues (2012).

Conclusão

A estratégia de solução adotada por Mauri et al. (2008) para o Problema de alocação de Berços é apropriada para os testes realizados e os cenários construídos a partir de dados reais. No entanto, uma avaliação mais criteriosa deveria ser realizada se houvesse condições de comparar o modelo e a técnica de resolução adotada pelo Terminal.

O aplicativo possibilita também fazer uma análise maior sobre a violação da janela de tempo (tempo de permanência de um navio no porto). O desenvolvimento de estratégias que permitem a recuperação de informações sobre a violação de janelas de tempo é importante para tomada de decisão.

Além disso, o desenvolvimento de ferramentas computacionais é importante e poderá facilitar o trabalho dos operadores logísticos. Muitos portos, até pouco tempo, realizavam manualmente a elaboração do plano de atracação. A resolução do problema de alocação de berços é fundamental no desempenho portuário, trazendo benefícios em termos logísticos para o sistema.

Este trabalho não esgota os estudos sobre o Problema de Alocação de Berços e tem continuidade com a implementação do Algoritmo Genético (AG), visando comparar as duas metodologias. A escolha por essas heurísticas dá-se pelo fato de serem metodologias que possuem características próprias que podem sofrer modificações tornando-se adaptáveis ao problema específico PAB.

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 a trazer incentivos para o desenvolvimento de novas ferramentas computacionais nesta área.

Referências

- Arruda, J. B. F. e Bastos, M. M. M. (2000) Pesquisa de dados secundários marítimos portuários: Brasil Europa. *Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, Gramado/RS.
- 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, pp. 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.
- Dantzig, G. B. e Ramser, J. (1959) The Truck Dispatching Problem. *Management Sciences*, vol. 6, pp. 81-94.
- Fleury, P. F. (1998) Perspectivas para a logística brasileira. *Revista Tecnológica*, vol. maio, n. 30, pp. 26.
- Guan, Y. e Cheung, R. K. (2004) The berth allocation problem: models and solutions methods. *OR Spectrum*, vol. 26, pp. 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.
- 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.
- 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*.