

# Heurística Baseada no *Simulated Annealing* Aplicada ao Problema de Alocação de Berços\*

Geraldo R. Mauri<sup>1,2</sup>, Luiz A. N. Lorena<sup>2</sup>, Alexandre C. M. de Oliveira<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Rural, Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre - ES

<sup>2</sup>Laboratório Associado de Computação e Matemática Aplicada, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos - SP

<sup>3</sup>Departamento de Informática, Universidade Federal do Maranhão, São Luís - MA  
mauri@cca.ufes.br, lorena@lac.inpe.br, acmo@deinf.ufma.br

**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 vehicle routing problem. The computational results are compared against CPLEX and other method found in literature.*

**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. Os resultados computacionais são comparados com o CPLEX e com outro método encontrado na literatura.*

## 1. Introdução

O Problema de Alocação de Berços (PAB) consiste em atribuir os navios que chegam a um determinado porto para as “posições” de atracação 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 atracação, 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 atracação 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 atracação (berço), e é uma função da distância do berço até a área de carga e descarga de containeres no pátio do porto.

O PAB, que normalmente abrange o transporte de cargas containerizadas, considera normalmente, objetivo principal a minimização do tempo total gasto pelos navios dentro do porto (uma das principais decisões referentes aos recursos de custo 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.

\*A versão completa deste trabalho foi submetida à revista GEPROS.

## 2. 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 apresentada por [Cordeau et al. 2005]. O modelo proposto por [Cordeau et al. 2005] representa o PAB como um *Problema de Roteamento de Veículos com Garagens Múltiplas e Janelas de Tempo*. Neste trabalho, o modelo é apresentado de forma relaxada, semelhante ao *Problema de Roteamento de Veículos com Garagens Múltiplas SEM Janelas de Tempo*, ou seja, as janelas de tempo, tanto para atracação dos navios, quanto para abertura e fechamento dos berços forma relaxadas.

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. Essa heurística é baseada na heurística de distribuição apresentada por [Mauri e Lorena 2006] e na heurística FCFS-G, apresentada por [Cordeau et al. 2005]. Já a heurística de programação determina o horário de atendimento dos navios nos berços.

Como estrutura de vizinhança, foram utilizados três diferentes movimentos de troca: Re-ordenar navios, Re-alocar navio e Trocar navios. Esses movimentos são baseados em outros apresentados em [Mauri e Lorena 2006]. 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.

Com o intuito de melhorar ainda mais as soluções obtidas pelo SA, foi utilizada também a técnica de “re-aquecimento” (*re-annealing*).

## 3. Resultados computacionais

Para avaliar o desempenho dos métodos e modelos descritos neste trabalho, foram utilizados 30 problemas testes (PT) distintos (com 60 navios e 13 berços) gerados por [Cordeau et al. 2005]. Com o intuito de verificar a “qualidade” dos resultados obtidos, as soluções encontradas pelo SA com o re-aquecimento (SA+RA) foram inseridas no CPLEX [Ilog 2006] como soluções iniciais para o modelo proposto por [Cordeau et al. 2005] (SA+RA+CPLEX).

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 (BT), apresentada por [Cordeau et al. 2005], em um tempo médio de 120 segundos para cada PT. Além disso, o CPLEX 10.0.1 [Ilog 2006], também foi utilizado, de forma isolada (CPLEX) e com tempo limite de 1 hora (3600 seg.) para cada PT, para resolver o modelo proposto por [Cordeau et al. 2005]. Na Tabela 1 são apresentados os resultados, e as comparações entre os métodos. A coluna “A” apresenta a melhora do CPLEX em relação ao SA com reaquecimento, ou seja, (SA+RA+CPLEX) em relação ao (SA+RA). As melhoras apresentadas em relação à Busca Tabu e ao CPLEX (isolado), são apresentadas nas colunas B e C, respectivamente.

**Tabela 1. Resultados computacionais.**

PT	BT	CPLEX		(SA+RA)		(SA+RA+CPLEX)			Melhoras (%)		
	Z	Z	Gap (%)	Z	Tempo (seg.)	Z	Gap (%)	Tempo (seg.)	A	B	C
i01	1415	-	-	1409	53,12	1409	0,14	3653,12	0,00	0,43	-
i02	1263	2606	3,82	1261	58,94	1261	0,01	101,85	0,00	0,16	106,66
i03	1139	2565	4,00	1129	54,03	1129	0,09	3654,03	0,00	0,89	127,19
i04	1303	4353	8,62	1302	67,33	1302	0,23	3667,33	0,00	0,08	234,33
i05	1208	2672	4,89	1207	55,38	1207	0,11	3655,38	0,00	0,08	121,38
i06	1262	-	-	1261	53,88	1261	0,17	3653,88	0,00	0,08	-
i07	1279	2887	4,73	1279	60,52	1279	0,17	3660,52	0,00	0,00	125,72
i08	1299	5177	11,69	1299	61,45	1299	0,12	3661,45	0,00	0,00	298,54
i09	1444	-	-	1444	57,91	1444	0,54	3657,91	0,00	0,00	-
i10	1212	-	-	1213	68,95	1213	0,21	3668,95	0,00	-0,08	-
i11	1378	-	-	1368	76,77	1368	0,36	3676,77	0,00	0,73	-
i12	1325	3206	5,48	1325	62,84	1325	0,14	3662,84	0,00	0,00	141,96
i13	1360	-	-	1360	68,19	1360	0,16	3668,19	0,00	0,00	-
i14	1233	-	-	1233	75,06	1233	0,10	3675,06	0,00	0,00	-
i15	1295	4672	9,77	1295	54,55	1295	0,07	3654,55	0,00	0,00	260,77
i16	1375	4320	8,97	1364	63,91	1364	0,19	3663,91	0,00	0,81	216,72
i17	1283	-	-	1283	56,28	1283	0,28	3656,28	0,00	0,00	-
i18	1346	3681	6,94	1345	53,98	1345	0,24	3653,98	0,00	0,07	173,68
i19	1370	2400	3,04	1370	52,83	1370	0,04	3652,83	0,00	0,00	75,18
i20	1328	-	-	1328	53,38	1328	0,20	3653,38	0,00	0,00	-
i21	1346	-	-	1341	53,52	1341	0,14	3653,52	0,00	0,37	-
i22	1332	3489	7,31	1326	57,97	1326	0,26	3657,97	0,00	0,45	163,12
i23	1266	-	-	1266	53,75	1266	0,03	3653,75	0,00	0,00	-
i24	1261	4867	10,13	1260	54,09	1260	0,15	3654,09	0,00	0,08	286,27
i25	1379	1993	2,67	1377	53,56	1377	0,44	3653,56	0,00	0,15	44,73
i26	1330	2520	3,62	1318	57,34	1318	0,14	3657,34	0,00	0,91	91,20
i27	1261	3209	5,70	1261	69,98	1261	0,01	1997,07	0,00	0,00	154,48
i28	1365	-	-	1360	58,47	1360	0,25	3658,47	0,00	0,37	-
i29	1282	4809	9,43	1280	69,09	1280	0,03	3669,09	0,00	0,16	275,70
i30	1351	-	-	1344	70,67	1344	0,15	3670,67	0,00	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>1306,93</b>	<b>0,17</b>	<b>3485,92</b>	<b>0,00</b>	<b>0,21</b>	<b>170,45</b>

#### 4. Conclusões

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.

Os resultados obtidos apresentaram soluções de boa qualidade para todos os problemas testes em baixos tempos computacionais. O método proposto se mostrou eficiente, apresentando *gaps* expressivamente baixos. A estrutura de vizinhança, através dos movimentos de troca, mostrou ser adequada e eficiente para exploração do espaço de soluções. Enfim, os resultados mostram claramente o potencial da abordagem apresentada, e conseqüentemente motivam a sua aplicação a problemas reais dos portos brasileiros e a outros problemas similares.

#### Referências

- Cordeau, J. F., Laporte, G., Legato, P. e Moccia, L. (2005). Models and Tabu Search Heuristics for the Berth Allocation Problem. *Transportation Science*, 39, p. 526-538.
- Ilog. (2006). Ilog Cplex 10.0: user's manual. France, 478 p.
- Kirkpatrick, S., Gellat, D. C. e Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science*, 220, p. 671-680.
- Mauri, G. R. e Lorena, L. A. N. (2006). Simulated Annealing Aplicado a um Modelo Geral do Problema de Roteirização e Programação de Veículos. *XXXVIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*.