

Problema de Alocação de Berços com Questões de Multiobjetividade em Portos Graneleiros com Restrições de Maré e Controle de Estoque

Victor Hugo Barros¹, Alexandre C. M. Oliveira², Luiz A. N. Lorena³, Solon Carvalho³

¹Programa de Doutorado em Computação Aplicada – CAP
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE

²Departamento de Informática – DEINF
Universidade Federal do Maranhão - UFMA

³Laboratório Associado de Computação e Matemática Aplicada – LAC
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE

bs.victorhugo@gmail.com, acmo@deinf.ufma.br, lorena@lac.inpe.br, solon@lac.inpe.br

Abstract. *The berth allocation problem is defined as planning of which position along the quay and when each vessel should moor. This paper consists of a brief literature review of Berth Allocation Problem (BAP). Two mathematical models are presented and first one solved by a commercial solver. The second is presented in a multiobjective environment. Finally, a discussion of the experiments is presented.*

Resumo. *O problema de alocação de berços pode ser definido como o planejamento de qual posição do cais e de qual período cada navio deve ser atribuído, ou seja, onde e quando atracar. Neste trabalho é feita uma breve revisão bibliográfica do Problema de Alocação de Berços (PAB). Dois modelos matemáticos são apresentados e o primeiro resolvido por um solver comercial. O segundo é apresentado em um ambiente multiobjetivo. Finalmente, uma discussão dos experimentos é apresentada.*

Palavras-chave: *Problema de Alocação de Berços, Modelagem Matemática, Multiobjetivo.*

1. Introdução

O problema de alocação de berços pode ser definido como o planejamento de qual posição do cais e de qual período cada navio deve ser atribuído, ou seja, onde e quando atracar [Cordeau et al. 2005]. Uma grande quantidade de trabalhos envolvendo portos de contêineres [Bierwirth and Meisel 2010] têm sido desenvolvidos. Entretanto, pouco tem se feito para portos que operam com navios de carga a granel, denominados *portos graneleiros*.

Existe alguns critérios para classificação do PAB. Uma delas é quanto sua função objetivo aplicada. Várias são as possibilidades de escolha: *tempo de espera dos navios, tempo de tratamento dos navios, tempo de conclusão dos navios, atraso no atendimento em relação ao tempo definido em contrato* ou mesmo a *multa* paga nesses casos, *makespan*, que é o período entre o início do atendimento do primeiro navio e o término do último etc. Na Figura 1 algumas dessas medidas podem ser elucidadas.

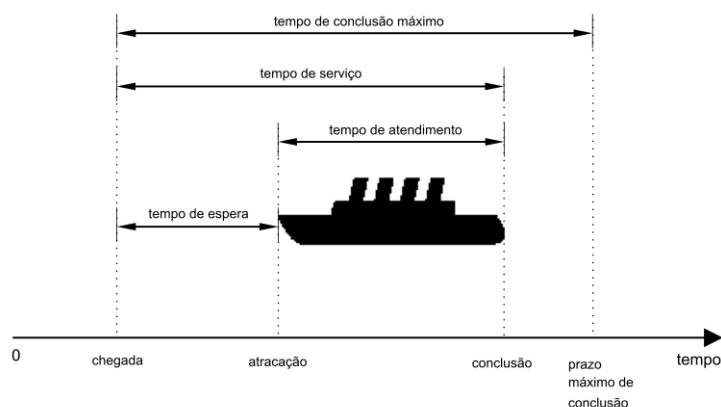


Figura 1. Tempos de um navio

O tempo de espera é o intervalo entre a chegada do navio e o início do seu atendimento. O tempo de atendimento, também conhecido como tempo de tratamento, é o período em que o navio permanece atracado sendo carregado ou descarregado. O tempo de serviço é a soma dos tempos de espera e de atendimento. O tempo de conclusão máximo é o período definido previamente para liberação do navio desde a sua chegada.

Inicialmente, um novo modelo matemático, denominado PGME, é apresentado para a resolução do problema de alocação de berços para o cenário encontrado no complexo portuário marítimo de São Luís-MA [Barros et al. 2009]. Os resultados são comparados com os resultados de um modelo anterior, denominado PGME*. Na segunda parte deste trabalho uma extensão do PGME é apresentada em uma abordagem multiobjetiva.

O restante deste trabalho está organizado como segue. Na Seção 2 é feita uma revisão bibliográfica. Na Seção 3, os dois modelos são apresentados. Os resultados dos experimentos realizados para o primeiro são apresentados no Seção 4. E, finalmente, na Seção 5 são feitas as conclusões do trabalho.

2. Revisão bibliográfica

Até meados da década de 1990, poucos trabalhos abordavam o PAB. O trabalho [Thurman 1989] foi o pioneiro quando propôs um modelo de otimização para a estação naval Norfolk. O trabalho de [Imai et al. 1997] pode ser considerado seminal no sentido de organizar o PAB em classes. O autor define o problema tratado como estático (*Static Berth Allocation Problem* - SBAP), que considera no planejamento apenas os navios que estão já disponíveis para atracação. O problema dinâmico considera também os navios que ainda estão em percurso até o porto, onde é estimado um tempo de chegada. O trabalho [Imai et al. 1997] foi também o primeiro a abordar o problema de escalonamento de máquinas na forma multi-objetiva [Vis and De Koster 2003]. Ele objetivava a minimização dos tempos de espera e de serviço, além do desvio entre a ordem de chegada e a ordem de atendimento dos navios com o intuito de diminuir insatisfações geradas por ultrapassagens.

Em [Xu et al. 2012], devido a grande variação das condições de maré durante um dia no

cenário estudado, o calado dos navios é considerado. Em certas condições alguns navios não podem atracar em determinados berços. O horizonte de planejamento, assim, é dividido em duas partes, uma maré baixa e uma maré alta, onde a primeira é mais restritiva. Um modelo linear inteiro misto é descrito para o problema e heurísticas são desenvolvidas para resolver o problema nos casos estático e dinâmico. Os autores observam também que dois níveis de maré por dia são apenas uma simplificação e não retratam da melhor forma a realidade.

Em [Han et al. 2006] é tratado um problema discreto (berços como pontos de atracação) com restrições de calado e de comprimento do navio, que devem ser compatíveis com o berço atracado. O tempo de tratamento do navio é dependente do berço onde foi servido. Através da função objetivo é minimizado o tempo de serviço dos navios. Os autores descrevem um modelo não-linear para o problema e o resolvem através de uma estratégia híbrida, que utiliza algoritmo genético e *simulated annealing*.

No trabalho [Zhou et al. 2006] também são levados em conta restrições físicas do berço, como calado e comprimento dos navios. O tempo de chegada e o tempo de tratamento dos navios são assumidos coeficientes estocásticos. A função objetivo minimiza o tempo de espera estimado dos navios. O problema é resolvido por meio de um algoritmo genético.

Em [Cheong et al. 2007] é abordado um problema de alocação de berços que objetiva a minimização de três medidas diferentes: *makespan*, número de ultrapassagens e tempo de espera. O autor ressalta que reduzir o *makespan* é um desejo do porto, mas é concorrente ao desejo dos navios de reduzir as ultrapassagens e o tempo de espera.

Em [Cheong et al. 2010] é proposto um *Multi-Objective Evolutionary Algorithm - (MOEA)* que incorpora o conceito de optimalidade de Pareto para resolver um PAB multi-objetivo com três medidas de desempenho. A função objetivo minimiza o *makespan*, o tempo de espera e desvio na ordem de atracação a partir um escala de prioridades pré-determinadas.

Em [Imai et al. 2007] é levado em conta o desejo do navio de não ter atrasos em relação ao seu tempo estimado de partida e o desejo do porto de atender todos os navios o mais rápido possível. Neste trabalho é provado que minimizar o tempo de serviço total resulta em minimizar o tempo de atraso total nas partidas dos navios quando pesos não são utilizados. Um modelo bi-objetivo foi, desta forma, formulado sem considerar ponderações entre os navios.

Um PAB discreto e dinâmico é tratado de forma multi-objetiva em [Golias et al. 2009]. Os autores observam que é comum a existência de grupos de navios com exigências de atendimentos similares, seja por prioridades contratuais ou seja por restrições físicas. Esses navios são organizados em grupos, denominados *preferenciais*. Assim, é proposta uma formulação onde para cada grupo preferencial é feita a minimização dos seus tempos de serviços, além da minimização do tempo de serviço total de todos os navios. A motivação para a abordagem multi-objetiva é devido ao fato de outras abordagens comuns nestes casos apresentarem dificuldades. Restrições para exigências de atendimento, por exemplo, podem levar a muitas soluções inviáveis e a atribuição de pesos, em outra abordagem, é de difícil configuração.

3. Modelos

Neste trabalho, dois modelos matemáticos são apresentados. Eles foram desenvolvidos com o objetivo de representar o cenário encontrado no complexo portuário marítimo de São Luís-MA. O modelo denominado neste trabalho de PGME é uma evolução do modelo apresentado em [Barros et al. 2009], denominado a partir daqui de PGME*. Ele refere-se ao PAB em portos graneleiros com condições favoráveis de maré e restrições de estoque onde a função objetivo minimiza o tempo total de serviço dos navios. O segundo modelo é uma abordagem multiobjetiva deste cenário. São considerados, além do tempo total de serviço dos navios, a minimização do *demurrage* e do número de ultrapassagens entre os navios.

Os portos movimentam apenas cargas a granel e, desta forma, o tempo de atendimento de cada navio é uma relação entre carga do navio pela vazão do berço. As cargas diferentes possuem a mesma vazão no mesmo berço, podendo variar apenas entre os berços. Além disso, não há o problema de alocação de contêineres.

Os períodos de atracação são discretizados em janelas de tempo com condições favoráveis devido à grande amplitude dos níveis de maré. Assim, são fornecidos pequenos intervalos para as operações de atracação e desatracação. Desta forma, o horizonte de planejamento é dividido em $|M|$ janelas de tempo. Na Seção 3.1 o modelo PGME e na Seção 3.2 o modelo multiobjetivo são apresentados.

3.1. PGME

Os dados de entrada são:

- N : conjunto de navios;
- M : conjunto de marés;
- L : conjunto de posições de atracação (berços);
- K : conjunto de cargas operadas no porto;
- a_i : maré de chegada do navio i ;
- v_l : velocidade de carregamento do berço l ;
- e_k : nível de estoque inicial da carga k ;
- c_k : quantidade de produção da carga k ;
- h_{il} : tempo de tratamento do navio i no berço l ;
- q_{ik} : capacidade de transporte do navio i em relação a carga k .

As variáveis de decisão são dadas por y_{ijl} :

$$y_{ijl} = \begin{cases} 1 & \text{se o navio } i \text{ atracar na maré } j \text{ no berço } l \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (1)$$

A decisão é encontrar a maré j que o navio i deve atracar e começar o atendimento e determinar também em qual berço l isto ocorrerá, tendo em vista que os berços possuem vazões diferentes o que influencia no tempo de atendimento. Assim, y_{ijl} é uma variável binária onde 1 significa que houve a decisão de atracar e 0 caso contrário.

A função objetivo foi designada como a soma dos tempos de serviço dos navios. O tempo de serviço foi ilustrado por meio da Figura 1. A maré de chegada a_i subtraída da maré de saída do navio i no berço l , ou seja, $j + h_{il} - a_i$, resulta no tempo de serviço de cada

navio. A função objetivo, desta maneira, pode ser representada por meio da Equação 2. O modelo matemático para o PGME foi formulado da seguinte forma:

$$\min \sum_{i=1}^{|N|} \sum_{j=1}^{|M|} \sum_{l=1}^{|L|} (j + h_{il} - a_i) y_{ijl} \quad (2)$$

sujeito a:

$$\sum_{j=1}^{a_i-1} \sum_{l=1}^{|L|} y_{ijl} = 0, \quad \forall i \in N \quad (3)$$

$$\sum_{j=a_i}^{|M|} \sum_{l=1}^{|L|} y_{ijl} = 1, \quad \forall i \in N \quad (4)$$

$$\sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^{|N|} \sum_{\substack{m=j \\ m \leq |M|}}^{j+h_{il}-1} y_{nml} \leq (1 - y_{ijl})|N|, \quad \forall i \in N, j \in M, l \in L \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^{|N|} \sum_{l=1}^{|L|} \sum_{z=a_i}^j \frac{\min\{j - a_i + 1, h_{il}\}}{h_{il}} q_{ik} y_{izb} \leq j c_k + e_k, \quad \forall j \in M, b \in L, k \in K \quad (6)$$

A restrição 3 garante que a maré de chegada será respeitada e nenhum navio atracará antes. A restrição 4, por sua vez, exige que todo navio seja atracado após sua respectiva maré de chegada.

A Equação 5 evita que um navio seja atracado a um berço antes que o navio anterior tenha saído, ou seja, evita a sobreposição de navios. Para isso, a cada atracação de um navio i na maré j e no berço l , $y_{ijl} = 1$, é anulada a atracação de qualquer navio n , $\forall n \neq i$, até a maré de desatracação de i , que pode ser obtida da seguinte forma $j + h_{il} - 1$.

A Equação 6 refere-se ao controle de estoque. Em cada maré j e para cada carga k é restringida a quantidade de carga carregada em todos os navios a apenas o que já foi produzido somado ainda ao estoque inicial. Ou seja, os navios não podem ser abastecidos com mais carga do que já foi produzida pela fábrica ou porto. O que já foi produzido da carga k até a maré j somado ao estoque inicial e_k pode ser obtido assim: $j c_k + e_k$. A quantidade consumida por cada navio i até esta maré j , por sua vez, pode ser obtida da seguinte forma:

$$\frac{j - a_i + 1}{h_{il}} q_{ik} \quad (7)$$

3.2. Modelo Multiobjetivo

Vários objetivos podem ser identificados para o PAB, todavia, nesta etapa do trabalho, apenas três critérios são considerados: tempo de serviço dos navios, *demurrage* e número de ultrapassagens entre os navios. O objetivo é a minimização destas três medidas.

A expressão para minimizar o tempo de serviço dos navios já foi apresentada por meio da Equação 2. Portanto, apenas as expressões para minimização do *demurrage* e do número de ultrapassagens são apresentadas a seguir.

3.2.1. Minimização do Demurrage

Como o *demurrage* significa uma multa por atraso, devem ser considerados o *tempo de conclusão máximo* (ver Figura 1) e o valor de multa por maré de sobrestadia, sendo a multa total proporcional a este período a mais. Desta forma, os dados adicionais utilizados são:

- t_i : tempo de conclusão máximo do navio i ;
- d_i : valor de multa aplicada ao porto por maré de sobrestadia do navio i .

O tempo de sobrestadia é, então, definido como

$$\text{sobrestadia}_i = j + h_{il} - 1 - t_i$$

Assim, multiplicando este resultado por $d_i y_{ijl}$, obtém-se a função objetivo, na Equação 8, que minimiza o valor total de *demurrage* pago.

$$\min \sum_{i=1}^{|N|} \sum_{j=t_i-h_{il}+2}^{|M|} \sum_{l=1}^{|L|} (j + h_{il} - 1 - t_i) d_i y_{ijl} \quad (8)$$

3.2.2. Minimização das Ultrapassagens

Ao contrário da função objetivo de minimização do *demurrage*, para a minimização do número de ultrapassagens não é necessário a inserção de dados complementares. A informação da maré de chegada, a_i , é suficiente para determinar o número de ultrapassagens. E, para realizar esta função objetivo, uma nova variável, assim como um novo conjunto de restrições, são adicionados ao modelo.

A variável definida como v_{in} é uma variável binária que representa a existência ou não de ultrapassagem entre os navios i e n , como segue:

$$v_{in} = \begin{cases} 1 & \text{se o navio } i \text{ é ultrapassado pelo navio } n \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (9)$$

Para isto, a restrição 10 determina o valor da variável v_{in} , atribuindo 1 quando, após a maré de atracação do navio i , não há a atracação do navio n .

$$\sum_{l=1}^{|L|} y_{ijl} - \sum_{m=j}^{|M|} \sum_{l=1}^{|L|} y_{nml} \leq v_{in}, \quad \forall i \in N, n(n \neq i) \in N, j \in L \quad (10)$$

Assim, associado à restrição 10, a função objetivo que minimiza o número de ultrapassagens foi definida como:

$$\min \sum_{i=1}^{|N|} \sum_{n=1}^{|N|} v_{in} \quad (11)$$

Dentro do modelo matemático, as três funções objetivos são utilizadas por meio do método da soma ponderada, onde o problema multiobjetivo torna-se um problema mono-objetivo, além da inclusão da restrição apresentada na Equação 10. Os pesos w_1 , w_2 e w_3 são constantes reais que complementam o método e devem ser ajustados para atribuir o nível de importância para cada objetivo.

Desta forma, a função objetivo para PGMEMO é descrita em 12.

$$\min w_1 \sum_{i=1}^{|N|} \sum_{j=1}^{|M|} \sum_{l=1}^{|L|} (j+h_{il}-a_i)y_{ijl} + w_2 \sum_{i=1}^{|N|} \sum_{j=t_i-h_{il}+2}^{|M|} \sum_{l=1}^{|L|} (j+h_{il}-1-t_i)d_i y_{ijl} + w_3 \sum_{i=1}^{|N|} \sum_{n=1}^{|N|} v_{in} \quad (12)$$

4. Experimentos computacionais

Todos os experimentos foram realizados em um computador com processador *Core i5* e com 4 GB de memória RAM. As soluções foram derivadas por meio do *solver* IBM ILOG CPLEX versão 12.2, no sistema operacional *Microsoft Windows 7*. O mesmo conjunto de 12 instâncias experimentadas com o modelo PGME* foram aplicadas para o PGME.

Na Tabela 4, é relacionado o conjunto de instâncias geradas com suas respectivas soluções derivadas pelo CPLEX. Ela é composta pelo número da instância, número de navios, quantidade de marés estimadas, número de berços considerados e os respectivos tempos de execução e custos dos modelos apresentados.

Foi estabelecido o limite de 3600 segundos para o tempo máximo de execução do *solver* na derivação das soluções. Com o novo modelo, a instância 12 excedeu o tempo limite de 3600, porém obteve um *gap* de 3,5% apenas para a solução ótima. Todas as outras instâncias foram resolvidas otimamente pelo novo modelo.

No modelo anterior, todas as execuções das instâncias com 20 e 30 navios excederam o tempo limite, sendo que para as instâncias 9, 11 e 12 sequer foi encontrado alguma solução viável. Foram encontradas soluções não-ótimas para instâncias 7, 8 e 10, mas com *gap* alto.

As instâncias de 15 navios resultaram em diferenças consideráveis nos tempos de processamento. Para estas instâncias, o PGME* derivou todas as soluções ótimas, mas com tempos de processamento muito altos se comparados aos tempos do PGME. Em média, o

#	N	M	L	Tempo (s)		Custo	
				PGME*	PGME	PGME*	PGME
1	10	15	4	0,77	0,25	29	29
2	10	20	3	1,10	0,4	44	44
3	10	25	2	3,4	0,44	43	43
4	15	30	4	935,46	1,8	77	77
5	15	35	3	816,89	2,65	86	86
6	15	40	2	919,2	4,57	121	121
7	20	40	4	3600,0	4,01	114 (36, 61%)	108
8	20	40	3	3600,0	4,19	108 (40, 96%)	107
9	20	55	2	3600,0	20,26	-	287
10	30	70	4	3600,0	25,65	211 (63, 13%)	185
11	30	75	3	3600,0	31,2	-	190
12	30	80	2	3600,0	3600,0	-	600 (3, 5%)

Tabela 1. Comparação dos resultados para os 2 modelos

PGME* exigiu 890,51 segundos enquanto o novo modelo não precisou mais do que 3,00 segundos para solucionar estas instâncias.

As instâncias de 10 navios foram resolvidas rapidamente com os dois modelos. O maior tempo exigido foi de 3,4 segundos para PGME*. Entretanto, ainda assim, o PGME obteve tempos consideravelmente menores, onde o tempo médio demandado pelo PGME equivale 20,5% do tempo médio do PGME*.

5. Conclusões

Foi apresentado neste trabalho um novo modelo matemático, denominado PGME, para o PAB para um caso específico. A abordagem seguiu a mesma estratégia do PGME*, onde o tempo foi discretizado em marés favoráveis como janelas de atracação. Pela comparação dos resultados com o modelo anterior ficou evidente o melhor desempenho deste modelo. Ainda, foi apresentado uma extensão do PGME para um cenário multiobjetivo, tendo em vista que o PAB é naturalmente multiobjetivo, considerando também como objetivos a minimização do *demurrage* e o número de ultrapassagens.

Referências

- Barros, V., Costa, T., Oliveira, A., and Lorena, L. (2009). Problema de alocação de berços heterogêneos em portos graneleiros com restrições de estoque e condições favoráveis de maré. In *SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO*, volume 16.
- Bierwirth, C. and Meisel, F. (2010). A survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals. *European Journal of Operational Research*, 202(3):615–627.
- Cheong, C., Lin, C., Tan, K., and Liu, D. (2007). A multi-objective evolutionary algorithm for berth allocation in a container port. In *Evolutionary Computation, 2007. CEC 2007. IEEE Congress on*, pages 927–934. IEEE.
- Cheong, C., Tan, K., Liu, D., and Lin, C. (2010). Multi-objective and prioritized berth allocation in container ports. *Annals of Operations Research*, pages 1–41.

- Cordeau, J. F., Laporte, G., Legato, P., and Moccia, L. (2005). Models and tabu search heuristics for the berth allocation problem. *Transportation Science*, 39:526–538.
- Golias, M., Boile, M., and Theofanis, S. (2009). Berth scheduling by customer service differentiation: A multi-objective approach. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 45(6):878–892.
- Han, M., Li, P., and Sun, J. (2006). The algorithm for berth scheduling problem by the hybrid optimization strategy gasa. In *Control, Automation, Robotics and Vision, 2006. ICARCV'06. 9th International Conference on*, pages 1–4. IEEE.
- Imai, A., Nagaiwa, K., and Tat, C. (1997). Efficient planning of berth allocation for container terminals in asia. *Journal of Advanced Transportation*, 31(1):75–94.
- Imai, A., Zhang, J., Nishimura, E., and Papadimitriou, S. (2007). The berth allocation problem with service time and delay time objectives. *Maritime Economics & Logistics*, 9(4):269–290.
- Thurman, K. (1989). Optimal ship berthing plans. Technical report, DTIC Document.
- Vis, I. and De Koster, R. (2003). Transshipment of containers at a container terminal: An overview. *European Journal of operational research*, 147(1):1–16.
- Xu, D., Li, C., and Leung, J. (2012). Berth allocation with time-dependent physical limitations on vessels. *European Journal of Operational Research*, 216(1):47–56.
- Zhou, P., Kang, H., and Lin, L. (2006). A dynamic berth allocation model based on stochastic consideration. In *Intelligent Control and Automation, 2006. WCICA 2006. The Sixth World Congress on*, volume 2, pages 7297–7301. IEEE.