O Problema de Alocação de Berços: Aspectos Teóricos e Computacionais

Flávia Barbosa
UNICAMP
flaflabarbosa0@gmail.com

Antônio Carlos Moretti
UNICAMP
moretti@ime.unicamp.br

Luiz Leduíno de Salles Neto
UNIFESP
luiz.leduino@unifesp.br

RESUMO

Este trabalho irá estudar as questões acerca do problema de alocação de berços. Nesse contexto, formas mais eficazes para a operação de descarga do carvão feita pela companhia Vale serão propostas com o intuito de reduzir os custos.

PALAVRAS-CHAVE: alocação, corte, esquematização

1. Introdução

O comércio internacional é profundamente dependente do transporte marítimo e por isso, os portos tem sido forçados a investir em infra-estrutura e logística. Nesse contexto, o presente trabalho aborda o Problema de Alocação de Berços: como alocar navios a berços em um dado horizonte de planejamento de modo a minimizar os custos operacionais. No Brasil a companhia Vale é responsável pela exportação da matéria-prima minério de ferro utilizado na fabricação do aço. Assim, será proposto métodos que otimizem suas operações portuárias, mais especificamente para o Terminal de Praia Mole no Porto de Tubarão. Para tanto, dois modelos matemáticos e duas heurísticas foram implementadas. Os modelos, adaptados de casos existentes na literatura, são executados com o GLPK e o CPLEX e os resultados obtidos são comparados para que a melhor opção seja encontrada.

2. Descrição do problema

O Problema de Alocação de Berços (Berth Allocation Problem - BAP) consiste em determinar os horários e as posições de atracação de navios nos berços do cais. Primeiramente vamos trabalhar com uma interpretação de problema de corte.

No caso que será estudado aqui, o eixo horizontal representa o horizonte de planejamento e o eixo vertical representa o tamanho do cais. Analogamente, o navio será representado como um retângulo cujo comprimento é o tempo de processamento do navio e cuja altura é tamanho do navio. Assim, nosso problema será determinar as coordenadas do canto inferior esquerdo do retângulo no diagrama.

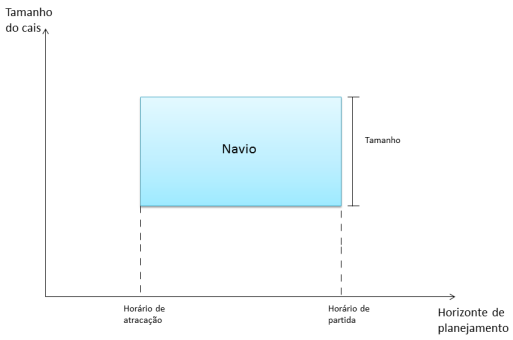

Figura 1: Interpretação do BAP como um problema de corte.

3. Métodos e abordagens

3.1. Modelo de corte para o caso da Vale

- N: número de retângulos a serem alocados;
- m: número total de folhas de estoque disponíveis;
- M: número grande arbitrário;
- (p_i): parâmetros indicando tempo de processamento do navio i;
- x_i: variável contínua indicando o horário do início do processamento do navio i.
- y_i, tal que $1 \leq y_i \leq 2$: variável inteira que indica em qual berço o navio i foi alocado
- e_i: horário de chegada do navio i

$$a_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{se o retângulo } i \text{ está à esquerda do retângulo } k. \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$b_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{se o retângulo } i \text{ está à direita do retângulo } k. \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$c_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{se o retângulo } i \text{ está atrás do retângulo } k. \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$d_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{se o retângulo } i \text{ está na frente do retângulo } k. \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$\begin{aligned}
\min \quad & \sum_i (e_i - x_i) && (1)\\
\text{s.a} \quad & x_i + p_i \leq x_k + (1 - a_{ik})M \ \forall i, k, i < k && (2)\\
& x_k + p_k \leq x_i + (1 - b_{ik})M \ \forall i, k, i < k && (3)\\
& y_i + 1 \leq y_k + (1 - c_{ik})M \ \forall i, k, i < k && (4)\\
& y_k + 1 \leq y_i + (1 - d_{ik})M \ \forall i, k, i < k && (5)\\
& a_{ik} + b_{ik} + c_{ik} + d_{ik} \geq 1 \ \forall i, k, i < k && (6)\\
& x_i \geq e_i \ \forall i && (7)\\
& 1 \leq y_i \leq 2 && (8)\\
& l_{xi}, h_{yi}, a_{ik}, b_{ik}, c_{ik}, d_{ik} \in 0, 1 \ \forall i, k && (9)\\
& x_i \geq 0 \ \forall i && (10)\\
& y_i \geq 0 \text{ e inteiro } \forall i. && (11)
\end{aligned}$$

3.2. Modelo de Esquematização de Navios a Berços

$$z_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se o navio } i \text{ está no berço } j. \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$a_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{se o retângulo } i \text{ está à esquerda do retângulo } k. \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$x_i =$ posição do início do atendimento do navio no horizonte de planejamento.

$$\begin{aligned}
\min \quad & \sum_i (e_i - x_i) && (12)\\
\text{s.a} \quad & \sum_j z_{ij} = 1 \ \forall i && (13)\\
& z_{ij} + z_{kj} - a_{ik} - a_{ki} \leq 1 \ \forall i \neq k, j && (14)\\
& x_i + p_i - (1 - a_{ik})M \leq x_k \ \forall i, k && (15)\\
& z_{ij} + z_{kh} + a_{ik} + a_{ki} \leq 2 \ \forall i \neq k, j \neq h && (16)\\
& x_i \geq e_i \ \forall i. && (17)
\end{aligned}$$

3.3. Heurística *Aloca-Berço*

Os parâmetros usados pela heurística são os mesmos. A primeira ação a ser feita é colocar os navios em ordem crescente de horário de partida ($w_i = e_i + p_i$). Então são criadas duas listas vazias, uma representando o Berço 1 e outra o Berço 2. Também deve ser criada um vetor L em que na posição j é armazenado a soma do tempo de atendimento do Berço j ($j = 1, 2$).

No Passo k do algoritmo (quando o k-ésimo navio deve ser alocado a um berço) verifica-se qual berço possui o menor tempo total de atendimento. Se $L(1) < L(2)$, então o Navio k é alocado no Berço 1 e $L(1)$ é atualizado para $L(1) + p(k)$. Caso contrário, o Navio k é alocado no Berço 2 e $L(2)$ é atualizado para $L(2) + p(k)$. Esse procedimento é feito até que todos os navios sejam atribuídos a um berço.

3.4. Heurística *First Come, First Serve* (FCFS)

O terminal utiliza o princípio *First Come, First Serve* para a atribuição de seus navios nos dois berços: o primeiro navio a chegar é o primeiro a ser alocado ao berço que estiver livre. É interessante implementar esse algoritmo para que seja possível comparar os resultados dos modelos e da heurística com a estratégia de alocação que tem sido usado pela Vale.

Para tanto, basta fazer uma simples modificação no algoritmo da heurística apresentada anteriormente: os navios devem ser colocados em ordem crescente de horário de chegada.

4. Resultados

Problemas de diferentes tamanhos serão estudados e para cada um desses tamanhos foram gerados 10 cenários. Os horários de chegada dos navios foram gerados com base em uma distribuição uniforme entre $[0, 25]$ e os tempos de processamento foram gerados por uma distribuição binomial com 16 tentativas e $p = 0.5$.

Os valores encontrados para a função-objetivo (soma dos tempos de espera) com GLPK e com CPLEX serão comparados para ambos modelos, o valor da função objetivo do problema de corte e do problema de esquematização quando utilizamos o CPLEX e o melhor resultado dos modelos com as heurísticas. O critério de parada para a execução dos problemas nos solvers foi o tempo, limitado em 1 hora.

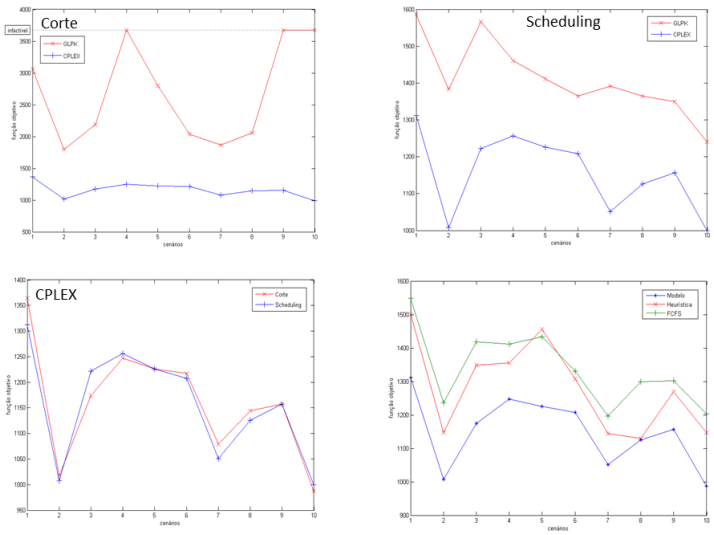

Figura 2: Comparações para 30 navios.

5. Conclusões

O objeto de estudo do presente trabalho foi o Problema de Alocação de Berços: qual a melhor maneira de alocar os navios que chegam ao terminal de modo a minimizar o tempo de espera desses. Após um abrangente estudo sobre as variações que estão disponíveis na literatura, dois modelos matemáticos foram adaptados e uma heurística foi construída. A otimalidade só foi garantida para os cenários com 10 navios. Pelos gráficos e tabelas apresentados no Capítulo , o desempenho do CPLEX foi notavelmente melhor para ambos modelos, apresentado o melhor resultado de função-objetivo (mesmo sem garantia de otimalidade). Em alguns cenários, o GLPK

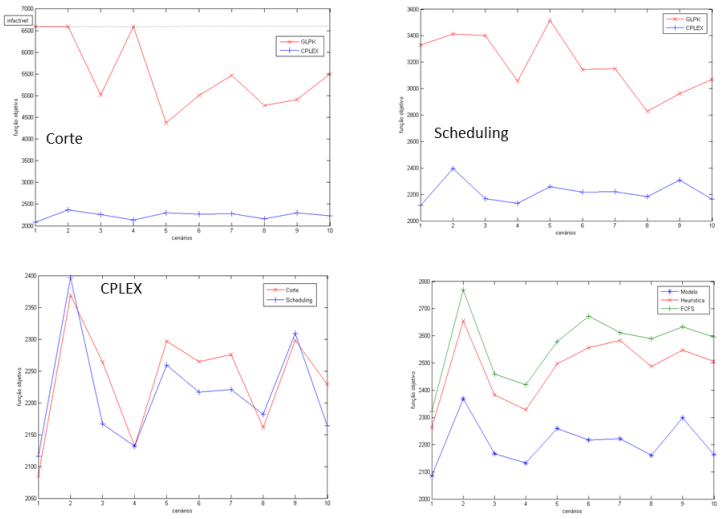

Figura 3: Comparações para 40 navios.

não conseguiu sequer obter uma solução factível dentro do tempo estipulado. Quando os modelos foram comparados, a diferença apresentada foi pequena, mas em pouco mais da metade dos casos o modelo de esquematização retornou um valor melhor para a função-objetivo minimizada.

Depois do resultado do modelo, está o resultado obtido pela heurística. Também é possível ver que o *FCFS* em quase todas as vezes foi o método que teve o pior resultado. De modo geral, pode-se concluir que uma maneira mais eficaz de fazer o planejamento das operações de atracação no terminal foi obtida.