

Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics

Otimização dos custos de descarregamento de navios no Porto de Tubarão

Bruno Luís Honigman Cereser¹

Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica, Unicamp, Campinas, SP

Antonio Carlos Moretti²

Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica, Unicamp, Campinas, SP

Luiz Leduino de Salles Neto³

Instituto de Ciência e Tecnologia, Unifesp, São José dos Campos, SP

Anibal Tavares de Azevedo⁴

Faculdade de Ciências Aplicadas, Unicamp, Limeira, SP

Resumo. Apresentamos nesse trabalho algumas inovações resultados do projeto “Otimização dos custos de carregamento e de transporte de cargas por navios: aspectos teóricos e computacionais”, integrante do programa PITE-Fapesp-Vale. O projeto apresentou um grande avanço tanto prático, com o depósito de um pedido de patente, como teórico, com o desenvolvimento de novos modelos matemáticos para o problema de descarregamento de navios graneleiros. Também foi desenvolvido um novo modelo matemático para o Terminal de Produtos Diversos, apresentado em detalhe nesse trabalho Trata-se, sem dúvida, de um caso de sucesso de aplicação da matemática na melhoria de processos industriais. **Palavras-chave.** Problema de Alocação de Navios em Berços, Otimização portuária, Transporte marítimo.

1 Introdução

A importância estratégica da melhoria das operações nos portos brasileiros tem sido amplamente noticiada pela imprensa brasileira e passa a ser, pelo que é noticiado, uma questão prioritária para o poder público. Reportagem publicada no jornal O Estado de São Paulo em 30 de setembro de 2012 afirma que:

“O modelo de gestão dos portos é confuso, difícil de ser gerenciado e representa um gargalo para o Brasil, na avaliação do governo, que prepara um pacote que promete uma “revolução” no setor. (...)”

Decorre desse quadro a relevância e o desafio do projeto desenvolvido e brevemente descrito desse trabalho. Esse projeto de inovação tecnológica, apoiado pela Fapesp e pela

¹brunolhcereser@gmail.com

²moretti@ime.unicamp.br

³luiz.leduino@unifesp.br

⁴atanibal@gmail.com

Vale por meio de um chamada PITE de 2010, foi concluído em julho de 2015 e objetivou a confecção de um protótipo de software que possibilitasse a minimização dos custos de carregamento de navios nos portos brasileiros, em especial no Porto de Tubarão da Vale em Vitória (ES).

O complexo portuário de Tubarão localizado na ponta do mesmo nome, na parte continental do município de Vitória, capital do Espírito Santo foi inaugurado em 196 e é controlado pela empresa Vale. É o maior porto de exportação de minério de ferro do mundo e permite o acesso de navios Graneleiros de grande porte. Possui 4 terminais de carga/descarga:

- TPM - Terminal de Praia Mole (carvão)
- TPD - Terminal de Produtos Diversos (grãos e fertilizantes)
- TGL - Terminal de Granéis Líquidos (combustíveis)
- Terminal de Tubarão (minério e pelotas)

Fundamentalmente os problemas foram abordados no referido projeto como problemas de alocação de berços. O problema de alocação de navios em berços possui duas decisões principais *onde* e *quando* os navios devem atracar. Normalmente, existem restrições de atracação (devido a profundidade de cada berço), também com relação a distância máxima entre guindaste e navio, ou até mesmo se o berço é especializado em um tipo de navio específico. As dissertações [2, 3], desenvolvidas no âmbito do projeto em questão, trazem explicações detalhadas de diversos modelos matemáticos para o problema de alocação de berços.

Descrevemos nas próximas seções alguns avanços práticos obtidos e que foram entregues à empresa Vale no âmbito desse projeto. Durante os quatro anos de desenvolvimento do projeto também foram alcançados avanços científicos, como os descritos no artigo [1], e novos mestres foram formados no IMECC-Unicamp, na FCA-Unicamp e no ICT-Unifesp.

2 O Terminal da Praia Mole

A pedido da empresa Vale o projeto deu prioridade à confecção de um otimizador para ser aplicado ao Terminal da Praia Mole do Porto de Tubarão. Esse terminal é responsável pela movimentação de 70% do carvão mineral importado pelo país.

No Terminal de Praia Mole só é realizado o descarregamento de navios graneleiros com carga de carvão mineral. Para dar uma dimensão da dificuldade em modelar matematicamente as operações desse terminal descrevemos a seguir os seus principais parâmetros. Esse terminal dopera com guindastes do tipo Descarregador de Navio (DN), que se movimenta em um trilho, possui 2 berços e faz o transporte do carvão do navio para o pátio de estocagem e do pátio de estocagem até a estação de carregamento de trens, através de esteiras, chamadas de Linhas. Existem 4 DNs e apenas 3 linhas para o desembarque. Cada DN pode operar em qualquer uma das três linhas, possibilitando a operação de 2 DNs em uma mesma linha. Com isso, atualmente, é usado como referência uma taxa de

eficiência, que é uma média da taxa real que está sendo praticada dividido pelo número de esteiras (taxa de eficiência máxima = 2066t/h).

Para esse importante terminal de importação de carvão mineral foi entregue um protótipo de sistema computacional, que está sob avaliação do INPI [4]. Um modelo matemático, que integra o sistema, foi desenvolvido para atender aos requisitos específicos do TPM, não atendidos pelos modelos da literatura como o citado na seção anterior.

Na próxima seção apresentamos o modelo matemático desenvolvido para o terminal de produtos diversos do Porto de Tubarão da Vale.

3 Modelo Matemático para o Terminal de produtos diversos

O Terminal de produtos diversos da Vale no Porto de Tubarão trabalha com a exportação de grãos e a importação de fertilizantes. Como há nesse terminal características distintas do TPM, abordado na seção anterior, um outro modelo matemático teve que ser desenvolvido. Entre as principais circunstâncias atreladas ao cenário de um produtos diversos, as seguintes situações foram consideradas:

- Variáveis

$x_{ijk} = 1$, se o navio i é atendido após o navio j no berço k , e 0 caso contrário.

T_{ik} - Hora de atracação do navio i no berço k .

- Parâmetros

t_{ik} - Duração do serviço do navio i no berço k .

a_i - Chegada do navio.

b_i - Término da janela de tempo.

M - Número muito grande (relativo aos dados do problema).

Levando em consideração que o terminal possui braços dependentes, as seguintes equações forma obtidas:

$$T_{i,2} \leq T_{j,1} \quad (\text{primeiro a atracação no berço 2}) \quad (1a)$$

OU

$$T_{i,2} \geq T_{j,1} + t_{j,1} \quad (\text{só pode atracar no berço 2 depois de liberar o berço 1}) \quad (1b)$$

Tendo em vista que as restrições são válidas apenas quando o navio j é atendido no berço 2 e o navio i é atendido no berço 1, e fazendo uso de técnicas Programação Linear para eliminação da conjunção **OU** obtemos o seguinte conjunto de restrições:

$$tda_{i,j} \leq M * y_{i,j} \tag{2a}$$

$$tda_{i,j} \geq 0 \tag{2b}$$

$$tdp_{i,j} \geq t_{i,2} * (1 - y_{i,j}) \tag{2c}$$

$$tdp_{i,j} \leq M * (1 - y_{i,j}) \tag{2d}$$

$$T_{i,2} + tda_{i,j} = T_{j,1} + tdp_{i,j} \tag{2e}$$

$$\forall i \in N, \forall j \in N \tag{2f}$$

onde

- $y_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{se a restrição 2a está ativa} \\ 0, & \text{se a restrição 2c e 2d estão ativas.} \end{cases}$
- $tda_{i,j}$ - Indica quanto tempo **antes** o navio i foi atendido no berço 2 comparado com o navio j atendido no berço 1.
- $tdp_{i,j}$ - Indica quanto tempo **depois** o navio i foi atendido no berço 2 comparado com o navio j atendido no berço 1.

A função objetivo é dada por $\sum_{i \in N, k \in B} (T_{i,k} - a_i + t_{i,k}) * \sum_{j \in N \cup \{u(k)\}} x_{i,j,k}$ que nada mais

é que a somatória dos tempos de espera e dos tempos de atendimento dos navios, é uma equação não linear. O tempo $t_{i,k}$ é variável, pois depende da quantidade de máquinas que atendem o navio i , no berço k , então temos um multiobjetivo agora, que é minimizar o tempo de espera ($T_{i,k} - a_i$) de cada navio no porto, bem como minimizar o seu tempo de atendimento ($t_{i,k}$), para melhor representação do nosso objetivo, vamos multiplicar o tempo de atendimento por um fator $\mu_{i,k} \in [0, 1]$ indicando o peso que cada duração de atendimento tem na função objetivo.

Podemos definir uma nova variável $z_{i,k}$ tal que:

$$z_{i,k} \leq M * \sum_{j \in N \cup \{u(k)\}} x_{i,j,k} \tag{3a}$$

$$z_{i,k} \leq T_{i,k} + \mu_{i,k} t_{i,k} - a_i \tag{3b}$$

$$z_{i,k} \geq T_{i,k} + \mu_{i,k} t_{i,k} - a_i - M * (1 - \sum_{j \in N \cup \{u(k)\}} x_{i,j,k}) \tag{3c}$$

$$z_{i,k} \geq 0 \tag{3d}$$

$$\forall i \in N, \forall k \in B \tag{3e}$$

Com isso $z_{i,k}$ assume o valor de $(T_{i,k} + \mu_{i,k} t_{i,k}) * \sum_{j \in N \cup \{u(k)\}} x_{i,j,k}$, e o problema pode ser formado apenas com restrições lineares.

4 Testes para o Terminal de Produtos Diversos

Apresentamos, a seguir, dois dos diversos testes computacionais realizados. Para obter as soluções via o modelo apresentado na seção anterior foi usado o software FICOTM *Xpress Optimization Suite* que é uma ferramenta com o pacote CPLEX.

4.1 Teste com dados aleatórios

Este caso chamado de caso Caso3PD, é um caso fictício, com 5 navios.

- 5 navios $N : [1\ 2\ 3\ 4\ 5]$
- 2 berços $B : [1\ 2]$
- Tempo de chegada de cada um dos navios $CHEGADA : [4\ 5\ 4\ 8\ 7]$

- Tempos de atendimento $t:NxB\ t = \begin{bmatrix} 2 & 2 \\ 5 & 6 \\ 6 & 3 \\ 5 & 4 \\ 6 & 5 \end{bmatrix}$

Navios	N1	N2	N3	N4	N5
Chegada (h)	4	5	4	8	7
$t_{i,1}$ (hs)	2	5	6	5	6
$t_{i,2}$ (hs)	2	6	3	4	5

Tabela 1: Dados do Caso3PD

Nesse caso, que é um caso de pequena escala e de fácil resolução, com apenas 134 restrições, 99 variáveis e 964 elementos não nulos, a solução ótima foi encontrada em aproximadamente 1 segundo.

Berço 1	N1	N2	
Atracação	4,00	7,00	
Serviço	2,00	5,00	
Berço 2	N3	N5	N4
Atracação	4,00	7,00	12,00
Serviço	3,00	5,00	4,00

Tabela 2: Resultados do Caso3PD

Essa solução possui um *gap* relativo de 0%, indicando que é uma solução ótima do problema.

4.2 Teste com dados reais

Este caso chamado de caso ValePD, é um caso baseado nos dados fornecidos pela empresa Vale S.A..

- 12 navios $N : [1\ 2\ 3\ 4\ 5\ 6\ 7\ 8\ 9\ 10\ 11\ 12]$
- 2 berços $B : [1\ 2]$
- Tempo de chegada de cada um dos navios
 $CHEGADA : [0,00\ 0,00\ 0,00\ 0,00\ 4,75\ 6,92\ 0,00\ 20,15\ 16,58\ 8,33\ 11,61\ 0,00]$

- Tempos de atendimento $t:NxB\ t =$

2,73	6,99
0,00	0,01
0,44	1,13
1,81	4,64
0,70	1,78
2,32	5,93
2,09	5,33
0,13	0,34
0,00	0,00
2,37	6,05
2,55	6,51
0,32	0,81

- último navio de cada berço $u : 13$.

Navios	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12
Chegada (h)	0,00	0,00	0,00	0,00	4,75	6,92	0,00	20,15	16,58	8,33	11,61	0,00
$t_{i,1}$ (hs)	2,37	0,00	0,44	1,81	0,70	2,32	2,09	0,13	0,00	2,37	2,55	0,32
$t_{i,2}$ (hs)	6,99	0,01	1,13	4,64	1,78	5,93	5,33	0,34	0,00	6,05	6,51	0,81

Tabela 3: Dados do Caso ValePD

Nesse caso considerado de grande escala, com 592 restrições, 486 variáveis e 2948 elementos não nulos. O software foi processado até que encontrasse uma solução factível ótima, que ocorreu em 436.2 segundos .

Berço 1	N2	N12	N3	N4	N1	N5	N6	N10	N11	N8
Atracação	0,00	0,00	0,32	0,76	2,57	5,3	6,92	9,24	11,61	20,15
Serviço	0,00	0,32	0,44	1,81	2,73	0,70	2,32	2,37	2,55	0,13
	Berço 2		N7	N9						
	Atracação		0,00	16,58						
	Serviço		5,33	0,00						

Essa solução possui um *gap* relativo de 0.00%, indicando que é uma solução viável e ótima do problema.

Os testes computacionais demonstraram que o modelo melhora a solução rotineiramente adotada no terminal pela empresa Vale.

5 Conclusões e perspectivas

Apresentamos, de forma sucinta, os principais resultados de um projeto de inovação tecnológica que se alicerça da modelagem matemática. Os modelos foram desenvolvidos atendendo aos requisitos dos terminais do Porto de Tubarão da empresa Vale. Um sistema computacional foi produzido e um pedido de patente depositado no INPI. Podemos concluir que tal projeto é um caso de sucesso de aplicação da matemática na melhoria de um processo muito importante para a competitividade do país.

Após a conclusão do projeto em junho de 2015 iniciou-se tratativas para um novo projeto de transferência de tecnologia, tendo em vista o interesse da empresa na aplicação do sistema desenvolvido no Porto de Tubarão.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da Fapesp e da empresa Vale para e na realização desse projeto.

Referências

- [1] E. J. Araújo, A. A. Chaves, L. L. de Salles Neto, A. T. Azevedo, Pareto clustering search applied for 3D container ship loading plan problem. *Expert Systems with Applications*, 44:50–57, 2016.
- [2] F. Barbosa, O Problema de Alocação de Berços: Aspectos Teóricos e Computacionais, Dissertação de Mestrado, Unicamp, 2014.
- [3] B. L. H. Cereser, Um modelo matemático para otimizar o descarregamento de navios num terminal graneleiro, Dissertação de Mestrado, Unicamp, 2013.
- [4] B. L. H. Cereser, L. L. Salles Neto, A. C. Moretti, Sistema para otimizar a relação entre custos de carregamento de navios e transporte de cargas em navios atracados. *Patente: Privilégio de Inovação*. Número do registro: BR1020140157492, Instituição de registro: INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial, 2014.