

22^o CONGRESSO NACIONAL DE TRANSPORTE AQUAVIÁRIO, CONSTRUÇÃO NAVAL E OFFSHORE – SOBENA 2008

MODELO DE PLANEJAMENTO DE INVESTIMENTOS EM TERMINAIS PORTUÁRIOS DE GRANÉIS SÓLIDOS

David Joshua Krepel Goldberg
Mestrando em Engenharia Naval e Oceânica (POLI – USP)
Centro de Estudos em Gestão Naval

Dr. Emerson Carlos Colin
Depto. Eng. de Produção (POLI – USP)

Eng. Edmundo Finamore Ferraz

Prof. Dr. Marcos Mendes de Oliveira Pinto
Depto de Eng. Naval e Oceânica (POLI – USP)
Centro de Estudos em Gestão Naval

Resumo

Este trabalho apresenta os fundamentos da análise de investimento em terminais portuários de granéis sólidos, e propõe um modelo de programação inteira de seleção de um plano ótimo de expansão da capacidade pelo critério de menor custo em valor presente.

A parametrização consiste na elaboração de layouts, na estimativa de indicadores operacionais de terminais portuários (incluindo tempos médios de fila) e de custos e investimentos associados à aquisição de equipamentos e expansão de infra-estrutura. Uma aplicação é apresentada.

Abstract

In this paper the authors present the fundamentals of investment analysis in solid bulk terminals and develop an Integer Programming model that selects the optimal capacity ramp up of the terminal under the minimal present value of total cost criterion.

The parameterization consists of layout options developments and estimates of operational indicators (including average queue time), costs and investments in

equipment acquisition or infrastructure expansion.

An application is provided.

1. Introdução

Conduzida pelas altas taxas de crescimento econômico dos principais países em desenvolvimento, a demanda mundial por granéis sólidos (principalmente minérios e alimentos) tem crescido fortemente, desafiando a capacidade produtiva e logística brasileira.

O Brasil é o maior exportador mundial de minério de ferro (em 2008 tomou pela primeira vez o lugar da Austrália), de açúcar, e também o segundo maior exportador de soja (deverá ultrapassar os EUA na safra 2008/2009), entre outras posições relevantes nos mercados de granéis. Em 2005, foram escoados pelos portos nacionais 393 milhões de toneladas (Mt), contra 298 Mt em 2001 – uma taxa de crescimento anual de 8,0%¹. Esse tipo de

¹ Taxa Anual de Crescimento Composto, dada pela formulação: $TACC = \left[\left(\frac{V_f}{V_i} \right)^{\frac{1}{T_f - T_i}} \right] - 1$, onde

carga representou 61% do peso total exportado em 2005. Os três principais granéis sólidos, minério de ferro, complexo soja e açúcar, somaram 79% do total em 2005 - 60%, 13% e 6%, respectivamente (COPPEAD, 2007).

No caso do minério de ferro, a Vale, maior exportadora mundial, é responsável pela grande maioria da carga movimentada, em terminais portuários próprios. São estes o Porto de Tubarão (ES), o Terminal Marítimo de Ponta da Madeira (TMPM - MA), o Terminal da Ilha de Guaíba (TIG - RJ) e a Companhia Portuária Baía de Sepetiba (CPBS - RJ). Os dois últimos estão na região de Sepetiba. Movimentaram, em 2006, 101 Mt (Tubarão), 75 Mt (TMPM) e 64 Mt (TIG e CPBS), crescendo ao ano 5,8%, 9,9% e 15%, respectivamente, entre 2001 e 2006 (MDIC, 2007).

Estes volumes movimentados poderiam ser maiores houvesse uma oferta de capacidade maior. O tempo médio de espera para atracação de navios de granéis sólidos, segundo armadores e agentes marítimos, em 2005, foi 47,1 horas, e o tempo máximo de espera chegou a 161,1 horas (COPPEAD, 2007). Esses altos tempos reforçam a necessidade dos setores público e privado de investirem em infra-estrutura portuária, contexto em que se situa o presente trabalho. Altos tempos de fila incorrem em valores também grandes de multas aos armadores (demurrage).

Dentro do sistema portuário, os gargalos podem se encontrar na capacidade de armazenagem, no número e capacidade de equipamentos ou no número e capacidade de berços. No caso dos granéis sólidos, segundo os próprios terminais, o berço é o principal gargalo, com 53% das respostas, seguido de armazenagem (47%) e equipamentos (33%).

Existem, assim, oportunidades para se investir em melhorias operacionais nos terminais existentes ou na adição de nova capacidade.

Os investimentos são em geral enormes e divididos em etapas, cobrindo um longo horizonte de planejamento. A influência de variáveis fora do controle do terminal complica a tomada de decisão.

Este trabalho descreve os principais fatores a serem considerados na análise de investimento em terminais portuários focados na movimentação de granéis sólidos, e propõe um modelo de programação inteira de análise de investimentos por etapas, baseado na

comparação de alternativas e seleção pelo critério de valor presente líquido.

No item seguinte aborda-se os principais conceitos empregados ao se definir um plano de investimentos para um terminal portuário de granéis sólidos. No item 3 é definido um modelo matemático para auxílio à tomada de decisão neste contexto, as premissas consideradas e formas de parametrizá-lo. A seguir, é apresentada uma aplicação com base em dados reais para um terminal portuário de granéis sólidos. Finalmente, os comentários finais, que incluem sugestões de desdobramento do trabalho.

2. Conceitos principais

Investe-se num terminal para que sua capacidade efetiva seja, no mínimo, igual à demanda que pode, segundo a avaliação dos seus gestores, ser capturada por este.

Um terminal de exportação de granéis sólidos pode ser dividido em três subsistemas: descarga (baías de descarga e equipamentos junto aos acessos terrestres), estocagem e embarque² (berços e equipamentos junto aos acessos marítimos). Para uma compreensão aprofundada destes sistemas recomenda-se a consulta à Alfredini (2005).

A capacidade efetiva de um sistema é o máximo volume que pode movimentar no período, supondo uma demanda irrestrita. O sistema com menor capacidade efetiva é definido como o gargalo do Porto.

O sistema de estocagem em geral não é o gargalo de terminais de granéis sólidos, especialmente nos casos em que a carga pode ser guardada em pátios abertos como minérios e carvão. A definição de sua capacidade efetiva não segue o mesmo padrão dos sistemas de embarque/ desembarque e descarga/ expedição e por isso não é abordado neste estudo. Ballou (2006) oferece mecanismos de planejamento e gerenciamento de estoques.

A formulação geral para os sistemas abordados neste estudo é:

$$CE = V_{MAX} = HO_{MAX} \cdot TN \cdot EF \quad (1)$$

Onde: V_{MAX} é o volume máximo, ou capacidade efetiva CE; HO_{MAX} é o máximo de horas de operação efetiva atingível no período; TN é a taxa nominal do sistema; e EF é a eficiência da operação.

² Um terminal de importação de carvão, por exemplo, pode ser dividido em desembarque, estocagem e expedição.

Vf é o valor final, Vi o valor inicial, Tf o ano final e Ti o ano inicial.

O uso destes e de outros indicadores é corrente, por exemplo, na avaliação interna de desempenho dos terminais da Vale (Companhia Vale do Rio Doce, 2007).

Estes valores dependem da configuração do sistema, isto é, do número, características e arranjo de berços, estações, pátios e equipamentos. A decisão do investimento implica em avaliar a melhor seqüência de configurações a ser adotada por um sistema ao longo do horizonte de planejamento.

Alguns dos pontos são também explorados por Novaes (1975), onde se desenvolve um modelo probabilístico para dimensionar expansões no Porto de Santos. Seu estudo, à diferença do ora proposto, considera custos de navios parados ao invés de custos de demurrage no cálculo do valor das filas de navios e limita-se apenas ao investimento em berços, entre outros, sendo mais simples em termos de elementos considerados.

2.1. Avaliação da capacidade efetiva de um sistema

Para definir a CE de um sistema portuário, com uma determinada configuração, deve-se determinar seus componentes HO_{MAX} , TN e EF.

Como abordam Örjan (1998) e, mais detalhadamente, Jeong e Phillips (2001), o tempo de operação efetiva (HO) concorre com uma série de outros tempos ao longo do ano, dentre os quais:

- Tempo de manutenção preventiva (MP);
- Tempo sem programação (SP);
- Tempos pré e pós-operacionais (TP);
- Paradas operacionais do sistema (PO);

A figura 1 mostra como o tempo total (1 ano, por exemplo) pode ser quebrado nos tempos acima.

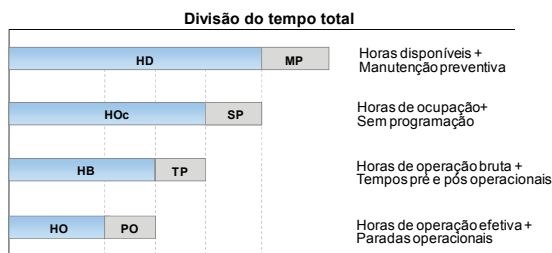


Figura 1: Divisão do tempo total de um sistema de operações

Assim, HO_{MAX} será maior quanto menor forem os demais tempos. MP em geral é um valor fixo, que depende da política de manutenção da empresa. Valores altos diminuem o tempo disponível para operação e valores baixos aumentam as PO devido às quebras de equipamentos. Tipicamente, a tempo em MP oscila em torno de 5%.

É necessário ainda que o sistema opere com algum nível de ociosidade para acomodar as aleatoriedades nos intervalos entre chegadas e saídas de lotes de carga. Num sistema em que quase 100% do tempo total está programado com a operação de navios, trens ou MP, filas enormes tendem a se formar, incorrendo em altos custos de multas para o terminal. Assim, um tempo sem programação é necessário.

Para operadores portuários que operam em concorrência com outros e movimentam cargas de terceiros, este tempo varia tipicamente entre 30% e 20% do total. É menor em terminais como os de exportação de minério de ferro, em que a carga é própria e há baixo risco de perda do cliente por nível de serviço deficiente que oscila como algo em torno de 10%.

Os tempos pré e pós-operacionais são proporcionais ao número de vezes que uma operação ocorre, em maior grau, e ao porte dos trens e navios operados, em menor grau. Já os tempos de paradas operacionais, devidos a mau tempo, quebras, bloqueios, manobras, entre outros, são proporcionais ao número de horas efetivamente operadas e variam entre configurações do sistema.

A taxa nominal (TN) é a máxima taxa de movimentação em que um sistema pode operar de forma contínua, sem desgaste excessivo de motores e componentes. É em geral definido pelos fabricantes dos equipamentos.

Já a eficiência da operação (EF) é a razão entre a taxa efetiva (TE) e a nominal, onde TE é o volume movimentado em HO:

$$EF = \frac{TE}{TN} = \frac{V}{HO.TN} \quad (2)$$

Note-se que esta abordagem difere um pouco do cálculo da CE por meio do cálculo da ocupação média dos navios:

$$CE = V_{MAX} = HO_{MAX} TC.Oc.N. \quad (1)$$

2.2. Investimento em capacidade efetiva

Deve-se dimensionar o terminal para que, a cada ano do horizonte de planejamento, sua CE seja igual ou superior à demanda projetada.

A decisão de como expandir a CE ano a ano encontra uma série de possibilidades. Uma mesma TN pode ser atingida com diversas configurações. Por exemplo, atingir 10.000 tph (toneladas por hora) é possível com um único equipamento desta capacidade ou com dois equipamentos de 5.000 tph, colocados em estações de descarga ou berços diferentes. A diferença está nos valores investidos e nas

diferentes possibilidades que as alternativas abrem para futuras expansões.

Com efeito, a decisão entre as configurações, num dado ano, deve também considerar os investimentos que devem ser realizados em anos posteriores. Por exemplo, adquirir uma máquina de 5.000 tph num ano e outra similar no ano posterior pode ser mais caro do que adquirir uma de 10.000 tph já no primeiro ano, mesmo porque os valores investidos não são lineares com a CE. Uma máquina de 10.000 tph de TN não custa em geral o dobro de uma de 5.000 tph.

Além do investimento, sistemas mais complexos e de maior capacidade têm em geral maior custo operacional fixo e variável, relacionados ao consumo de energia, mão-de-obra direta e manutenção.

Outro fator a ser considerado na tomada de decisão é o custo total de demurrage (multa por atraso dos navios). Quanto maior a diferença entre a capacidade efetiva do terminal e a demanda anual, maior a ociosidade média e menor tende a ser o tempo médio de fila e, por conseguinte, o demurrage acumulado no período.

Este custo deve ser considerado junto com o investimento, buscando o menor custo total, como ilustra a figura abaixo.

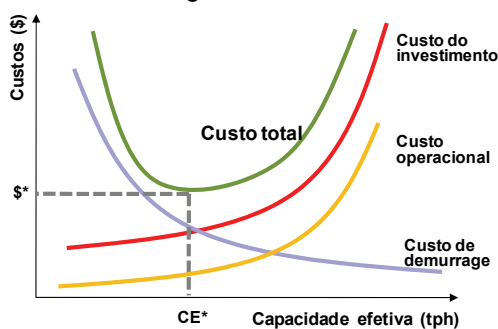


Figura 2: Gráfico ilustrativo da relação entre custos e capacidade efetiva dos sistemas

Tal decisão se apresenta a cada ano. Todavia, a melhor solução a cada ano pode ser diferente do melhor plano de investimentos, como já expresso anteriormente. O objetivo do modelo neste estudo é justamente determinar o plano de investimentos com menor valor presente líquido.

3. Modelagem do problema

Foi desenvolvido um modelo de programação inteira (PI) para resolver o problema. Trata-se de um tipo de modelo de programação matemática que lida com variáveis de decisão binárias, sendo aplicados em uma vasta gama de problemas.

Para um estudo aprofundado do assunto, com diversas aplicações, recomenda-se a leitura de Colin (2007).

3.1. Modelo em programação inteira

Considere um problema de decisão do plano de investimentos em um terminal portuário de exportação de granéis sólidos. O que se quer é saber, em cada ano $i \in \{1, \dots, I\}$ do horizonte de planejamento, qual a configuração $j \in \{1, \dots, J\}$ a ser utilizada.

Define-se a variável binária a_{ijk} , que assume valor 1 se no ano i o terminal modificar sua configuração de j para k , e 0, caso contrário.

O modelo de programação matemática pode ser escrito como:

$$\min VPL = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=j}^J a_{ijk} (C_{ij} + s_{jk}) \frac{1}{(1+td)^i} \quad (3)$$

Sujeito as restrições:

$$CE_j \geq d_i \cdot a_{ijk}, \quad \forall i \in \{1, \dots, I\}, j \in \{1, \dots, J\}, k \in \{j, \dots, J\} \quad (4)$$

$$a_{ijk} \leq p_{jk}, \quad \forall i \in \{1, \dots, I\}, j \in \{1, \dots, J\}, k \in \{j, \dots, J\} \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^J a_{ijk} - \sum_{l=1}^J a_{i+1,kl} = 0, \quad \forall i \in \{1, \dots, I-1\}, k \in \{j, \dots, J\} \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^J a_{ijk} = 1, \quad \forall i \in \{1, \dots, I\} \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^J a_{11k} = 1 \quad (8)$$

$$a_{ijk} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in \{1, \dots, I\}, j \in \{1, \dots, J\}, k \in \{j, \dots, J\} \quad (9)$$

A função objetivo (3) é o valor presente líquido (VPL) a ser minimizado. A formulação atribui, para cada fase a_{ijk} do plano realizada (valor 1), um custo operacional C_{ij} , associado ao ano i com a configuração j , e um investimento s_{jk} entre as configurações j e k (admite-se $j=k$). O termo final traz os custos a valor presente, com uso de uma taxa de desconto td . É importante ressaltar que o custo do último ano envolve também as parcelas constantes trazidas da perpetuidade.

São seis os conjuntos de restrições definidos. Em (4) assegura-se que a capacidade efetiva da configuração adotada seja superior à demanda d_i em um dado ano. Em (5) restringe-se as mudanças de configuração àquelas previamente definidas como possíveis, por meio dos parâmetros p_{jk} , que indicam se as mudanças entre j e k são ou não factíveis (note que $p_{jk} \neq p_{kj}$).

As restrições (6) asseguram a compatibilidade entre as fases do plano de investimento, fazendo com que uma mudança no ano $i+1$ só seja possível a partir da configuração que foi alvo de mudança no ano i . As restrições (7) fazem com que exatamente uma mudança de

fase seja feita a cada ano. A restrição (8) impõe uma condição inicial ao sistema (que a transição no primeiro ano seja de uma configuração definida, neste caso 1, para qualquer outra permitida). Finalmente, em (9) as 75 variáveis de decisão são definidas como binárias.

4. Parametrização do modelo

As CE de cada configuração podem ser determinadas a partir de valores típicos de EF, de tempo de MP, valores máximos de comprometimento (complemento da ociosidade), e da proporção de paradas em relação às horas operadas. Estes valores devem ser obtidos do histórico operacional de um ou mais terminais similares ao avaliado.

A definição das configurações j e dos valores C_{ij} e s_{jk} não é trivial e exige, na prática, um grande conhecimento do setor e esforço de coleta e processamento de dados. Considera-se, neste modelo que as capacidades efetivas CE são características da configuração j que devem ser calculadas, com o uso de HO_{MAX} , TN e EF médios de terminais similares.

Os custos C_{ij} envolvem custos de manutenção, de operação fixo e variáveis e de demurrage. As estimativas de custos de manutenção e de operação envolvem estudos de engenharia, ao passo que os custos de demurrage devem ser de alguma forma estimados. O valor típico que se atribui contratualmente ao demurrage diário é o custo operacional do navio parado, cobrado para cada dia que excede o *laytime* do navio. Ao lidar com o sistema de embarque fatores como janelas de maré e regras especiais de atracação (regras não FIFO) complicam a estimativa do tempo de fila e o uso de um modelo de simulação discreta é recomendado. Uma aproximação ao tempo médio de espera pode ser dada pela teoria de filas, a exemplo do que desenvolve Novaes (1975).

Supondo um sistema com C estações de atendimento (modelo $M/M/C$), a distribuição exponencial de intervalos entre chegadas sucessivas com média λ (taxa de chegadas), e uma taxa de serviço μ (navios servidos/tempo) para cada estação, define-se o coeficiente de congestionamento (Adan e Resing, 2002):

$$\rho = \frac{\lambda}{C\mu} \quad (10)$$

Para valores de ρ próximos de 1, o tempo médio de fila tende ao infinito, bem como o demurrage total a ser pago. O tempo médio de fila W_q para o atendimento é calculado pela relação:

$$W_q = \frac{C!}{(1-\rho)(C\mu)(C\rho)^C \left[(1-\rho) \left(\sum_{n=0}^{C-1} \frac{(C\rho)^n}{n!} \right) + \left(\frac{(C\rho)^C}{C!} \right) \right]} \quad (11)$$

Nos casos em que há apenas 1 estação, a fórmula (11) resume-se a:

$$W_q = \frac{\rho}{\mu(1-\rho)} \quad (12)$$

Esta relação pode ser aplicada, por exemplo, à chegada de navios em um berço, desde que a distribuição entre chegadas seja uma exponencial, que não haja restrições de maré ou mau tempo ou restrições ao tamanho da fila.

Os investimentos s_{jk} devem ser obtidos junto aos fabricantes de equipamentos e firmas de engenharia. Na aplicação a seguir, a parametrização completa de um problema é mostrada.

5. Aplicação: terminal portuário para exportação de minério de ferro

O objetivo da aplicação é testar a viabilidade do modelo proposto. É simplificado, de forma a se poder ter maior controle sobre todos os parâmetros inseridos e ser executado em um software comercial amigável como o Solver, aplicativo do *MS Excel*.

Foi modelado um terminal portuário exclusivo para a exportação de minério de ferro, para um horizonte de planejamento de cinco anos. Foi considerado apenas o sistema de embarque, normalmente o que requer mais investimentos no terminal³.

Foram definidas cinco configurações de sistemas de embarque. Para calcular a CE associada a elas, foi considerado um valor fixo de HO_{max} a partir das seguintes premissas:

- MP: 5% do tempo do ano;
- SP: 5% do tempo do ano;
- Tempo de parada por quebras (manutenção corretiva): 10% do tempo do ano;
- Índice de utilização (horas efetivamente operadas / horas disponíveis): 55%;
- Eficiência da operação (EF): 70%.

A tabela abaixo aponta as características das configurações e as CE com as premissas apontadas:

³ A abordagem para definir a evolução ideal da capacidade para o sistema de descarga é exatamente idêntica, já que na prática os dois sistemas operam de forma praticamente independente.

Tabela 1: Configurações de terminais definidas

Config.	Berços	TN por berço [tph]	TN total [tph]	CE [t/ano]
1	1	7.000	7.000	20.066.970
2	1	8.000	8.000	22.933.680
3	2	4.000	8.000	22.933.680
4	1	10.000	10.000	28.667.100
5	2	6.000	12.000	34.400.520

Os valores de investimento foram obtidos com buscas em notícias e consultas a especialistas do setor. Há muita relutância em fornecer tais dados, pois os valores podem efetivamente variar muito em função do arranjo geral e das especificidades do porto.

Os custos operacionais (CO) fixos foram aproximados em 2% do valor total do investimento (berços, CNs e esteiras), e os custos variáveis em 0,5 US\$/t para cada trecho de CN ou esteira, independente da capacidade⁴.

Os valores empregados são mostrados na Tabela 2, a seguir.

Tabela 2: Custos e investimentos associados aos equipamentos e berços

Equip./ Berço	TN [tph]	Investimento [US\$ MM]	CO fixo [US\$ MM/ano]	CO variável [US\$/t]
Berço	N/d	60	1,2	0
Berço 2	N/d	30	0,6	0
CN	4.000	8	0,16	0,5
CN	6.000	12	0,24	0,5
CN	7.000	14	0,28	0,5
CN	8.000	16	0,32	0,5
CN	10.000	20	0,4	0,5
CN	16.000	32	0,64	0,5
Esteiras	4.000	12	0,24	0,5
Esteiras	6.000	18	0,36	0,5
Esteiras	7.000	21	0,42	0,5
Esteiras	8.000	24	0,48	0,5
Esteiras	10.000	30	0,6	0,5

Com base nesta tabela foram compostos os investimentos e custos associados às configurações e às mudanças entre elas

⁴ Valores arbitrados com base na experiência dos autores, em ordem de grandeza compatível com os demais parâmetros do problema. Uma definição mais precisa exigiria estudos de engenharia particulares a cada caso.

(aproximado como a diferença entre os investimentos necessários para cada configuração ou zero, quando a diferença for negativa). Os custos são mostrados na Tabela 3 e os investimentos na Tabela 4.

Tabela 3: Investimento total e custos operacionais de cada configuração

Configuração	Investimento [US\$ MM]	CO fixo [US\$ MM/ano]	CO variável [US\$/t]
1	95	1,9	1
2	100	2	1
3	130	2,6	2
4	110	2,2	1
5	150	3	2

Tabela 4: Investimento associado às mudanças de configuração [US\$ MM]

Config. final Config. inicial	1	2	3	4	5
1	0	5	35	15	55
2	0	0	30	10	50
3	0	0	0	0	20
4	0	0	20	0	40
5	0	0	0	0	0

Neste exemplo não foram definidas mudanças de configurações não permitidas, isto é, $p_{jk} = 0$, onde $k \in \{j, \dots\}$.

A demanda foi definida com os seguintes valores:

Tabela 5: Demanda considerada

Ano	1	2	3	4	5
Demanda [Mt]	15	18	20	26	30

Quanto maior a diferença entre a demanda e a capacidade, para cada par (ano, configuração), menor é o tempo de fila e o demurrage incorrido. Cabe ressaltar que é tecnicamente possível movimentar certa demanda levemente superior à capacidade efetiva calculada, já que a definição desta considera uma reserva de 5% do tempo total do ano com o berço livre (comprometimento máximo de 95%).

Os tempos de fila foram estimados com base na teoria de filas, como expresso no item anterior, utilizando as seguintes premissas:

- Navio médio: 120.000 dwt (*deadweight*);
- Custo médio do navio parado (valor a partir do qual se estima o demurrage a ser pago): 30.000 US\$/dia para o período considerado.

Com estes valores, a demanda e as capacidades efetivas consideradas, a taxa de chegada no porto varia entre 0,014 e 0,029, e a taxa de serviço entre 0,021 e 0,036 navios/hora.

Foi também considerada a simplificação que o demurrage é pago sobre o tempo total de fila e que não há pagamento de despacho⁵. Ou seja, o total de demurrage pago é estimado a multiplicação do custo do navio parado (US\$/hora) pelo tempo total em fila (h). Obteve-se, para cada par (ano, configuração), um tempo médio de fila e demurrage total pago.

Tabela 6: Tempo médio de fila por ano e configuração [h/navio]

Configuração Ano	1	2	3	4	5
1	97	59	35	29	19
2	198	99	41	43	20
3	100.000	151	45	56	21
4	100.000	100.000	100.000	147	26
5	100.000	100.000	100.000	535	30

Note que para os casos em que o sistema tem $p > 1$, ou seja, a taxa de chegada é superior à taxa de serviço e a fila diverge, foi arbitrado um valor muito elevado (100.000 horas), de forma que tal opção jamais seja escolhida pelo algoritmo.

A cada número de horas médias em fila corresponde um demurrage total a ser pago.

Tabela 7: Demurrage total por ano e configuração [US\$ MM]

Configuração Ano	1	2	3	4	5
1	15	9	5	5	3
2	37	19	8	8	4
3	20.833	31	9	12	4
4	27.083	27.083	27.083	40	7
5	31.250	31.250	31.250	167	9

A atribuição de grandes valores de demurrage para os pares (ano, configuração) em que a taxa de chegada é superior à de serviço tornam estas soluções, na prática, inviáveis. Assim, não foi preciso criar mais restrições no modelo.

Assim, foram mostradas as três parcelas consideradas na função-objetivo do problema: custos operacionais, custos de demurrage e

investimentos associados à mudança. A cada ano, estas parcelas são somadas e é calculado o valor presente, considerando uma taxa de desconto de 10%.

O problema foi modelado e resolvido no MS Excel, utilizando o aplicativo Solver. A parametrização é mostrada na Figura 3:



Figura 3: Janela de parametrização do Solver para o modelo estudado

A “célula de destino” (função-objetivo) é o custo total trazido a valor presente, a ser minimizado. As “células variáveis” (variáveis) correspondem as 75 variáveis a_{ijk} . Os dez conjuntos de restrições expressas no quadro “submeter às restrições” correspondem às equações: (4), na linha 1; (6), na linha 2; (5), nas linhas 3 a 7; (9), na linha 8; (8), na linha 9; e (7), na linha 10.

A execução gerou o seguinte quadro com as variáveis de decisão:

Tabela 8: Variáveis de decisão para a solução ótima do problema

	Configuração inicial do período	Configuração final do período				
		1	2	3	4	5
Ano 0	Ano 0	1	0	0	0	0
	1	0	0	0	1	0
	2		0	0	0	0
	3			0	0	0
	4				0	0
Ano 1	1	0	0	0	0	0
	2		0	0	0	0
	3			0	0	0
	4				1	0
	5					0
Ano 2	1	0	0	0	0	0
	2		0	0	0	0
	3			0	0	0
	4				0	0
	5					0
Ano 3	1	0	0	0	0	0
	2		0	0	0	0
	3			0	0	0
	4				0	1
	5					0
Ano 4	1	0	0	0	0	0
	2		0	0	0	0
	3			0	0	0
	4				0	0
	5					1
Ano 5	1	0	0	0	0	0
	2		0	0	0	0
	3			0	0	0
	4				0	0
	5					1

Assim, o plano ótimo de investimentos, considerando que o terminal inicia na configuração 1 (ano 0), é:

- Ano 1: Investir na mudança da configuração 1 (1x7.000 tph) para a configuração 4 (1x10.000 tph);
- Ano 2: Permanecer com a configuração 4;

⁵ Prêmio por presteza.

- Ano 3: Investir na mudança da configuração 4 (1x10.000 tph) para a configuração 5 (2x6.000 tph);
- Ano 4: Permanecer na configuração 5;
- Ano 5: Permanecer na configuração 5;

A mudança da configuração 4 para a 5, na prática, é pouco viável – já que implicaria usar o sistema já adquirido de 10.000 tph com capacidade reduzida e adquirir outro de 6.000 tph.

Tal transição poderia ser evitada tornando mais real o investimento necessário, associado à aquisição de um sistema de 6.000 tph, impondo uma restrição $p_{45} = 0$, ou ainda eliminando as variáveis de decisão $a_{i45}, \forall i \in \{1, \dots, I\}$.

O fluxo de caixa da solução ótima (com custos e investimentos) é mostrado na Tabela 9:

Tabela 9: Fluxo de caixa dos custos anuais e investimentos

Ano	0	1	2	3	4	5	Perp.
Investimento	95,0	15,0	-	-	40,0	-	-
Custo operacional	-	16,9	20,2	22,2	55,0	63,0	630
Custo de demurrage	-	15,1	8,0	11,6	7,1	9,4	94,4
Total	95,0	47,0	28,2	33,8	62,1	72,4	724

O custo total trazido a valor presente da solução ótima é US\$ 753,71 milhões.

Para exemplo de comparação, uma solução em que a configuração 5 fosse atingida já no ano 1 e mantida até o fim do período teria custo total à valor presente de US\$ 782,32 milhões.

6. Considerações finais

O artigo discute o problema de estabelecer um plano de investimento num terminal portuário de granéis sólidos, mostrando as diversas facetas que devem ser estudadas.

Na opinião dos autores, sua maior contribuição é congrega, em um único modelo, e da forma correta, os principais fatores que devem ser considerados na elaboração de um plano de investimento em um terminal portuário, seja um investimento *greenfield* (como proposto na aplicação), seja na expansão de um terminal existente.

O modelo procura ainda trazer avanços, em certos pontos, sobre o de análise operacional proposto por Novaes (1975). A despeito do pioneirismo, o autor aborda um porto não-especializado como Santos, considera custos de navios parados ao invés de custos de demurrage no cálculo do valor das filas de navios e limita-se apenas ao investimento em

berços, itens em que este e aquele estudo se diferenciam.

Guiando-se pelo modelo proposto, um projeto conceitual de um terminal e as expansões ao longo do tempo torna-se mais claro, com atividades mais bem definidas. Os esforços são concentrados na correta parametrização do modelo, ou seja, no levantamento ou estimativa dos dados de entrada e elaboração das configurações permitidas para o terminal. Outra vantagem é a segurança da escolha da solução ótima. Quando se avalia as diferentes opções de evolução da capacidade “manualmente”, corre-se o risco de não avaliar um conjunto de alternativas interessantes devido à grande quantidade de soluções viáveis.

Há duas grandes dificuldades no modelo apresentado. Em primeiro lugar, a parametrização com valores corretos, que depende da realização de estudos de engenharia e de mercado atualizados e projeções seguras. Na verdade, a definição de valores reais para investimentos, custos operacionais dos terminais, custos de operação dos navios, a projeção da demanda e as demais parametrizações justificam, cada um, a realização de longos estudos.

Além disso, a complexidade de resolução do problema. Um modelo de programação inteira tem solução computacionalmente complexa se o problema é grande. Como o problema deve considerar um horizonte infinito de decisão, é possível que haja uma solução mais adequada com o uso de programação dinâmica. O uso de tal técnica poderia ser testado no futuro.

A aplicação simplificada, modelada no Solver, está disponível sob pedido (david.goldberg@usp.br).

7. Referências bibliográficas

Adan, Ivo, e Resing, Jacques (2002), “Queueing Theory.”, Eindhoven, Eindhoven University of Technology.

Alfredini, P. (2005), “Obras e gestão de portos e costas.”, São Paulo, Edgard Blücher.

Ballou, R. H. (2006), “Gerenciamento da cadeia de suprimentos.”, São Paulo, Bookman.

Colin, Emerson C. (2007), “Pesquisa Operacional: 170 Aplicações em Estratégia, Finanças, Logística, Produção, Marketing e Vendas.” Rio de Janeiro, LTC.

Companhia Vale do Rio Doce (2007). “Indicadores operacionais portuários (interno).”, GAOPG, Vitória, GAOPG.

COPPEAD (2007), "Análise e Avaliação de Portos Brasileiros". Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Jeong, Ki-Young, e Phillips, Don T. (2001), "Operational Efficiency and Effectiveness Measurement.", IJOPM, Volume 21, Number.11, pages 1404-1416.

Ljungberg, Örjan (1998), "Measurement of Overall Equipment Effectiveness as a Basis for TPM Activities.", IJOPM, Volume 18, Number 5, pages 495-507.

MDIC (2007), "AliceWeb (estatísticas de exportação e importação de produtos no Brasil)"<http://aliceweb.desenvolvimento.gov.br/>

Novaes, Antônio G. N. (1975), "Pesquisa operacional e transportes: modelos probabilísticos.", São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, páginas 127-136.