

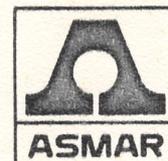
VII CONGRESO PANAMERICANO
DE INGENIERIA NAVAL,
TRANSPORTE MARITIMO E
INGENIERIA PORTUARIA

Viña del Mar (Chile), 19-24 de Octubre, 1981.

Convoca:



Organiza:



DIMENSIONAMENTO DE TERMINAL MARÍTIMO E SISTEMA DE
TRANSPORTE TERRESTRE PARA ESPORTAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO

VALDAIR JOSÉ TONON
MESTRANDO EM TRANSPORTE
EPUSP - BRASIL

MARCO ANTONIO BRINATI
PROFESSOR DOUTOR - EPUSP
BRASIL

DIMENSIONAMENTO DE TERMINAL MARÍTIMO E SISTEMA DE
TRANSPORTE TERRESTRE PARA EXPORTAÇÃO DE MINÉRIO
DE FERRO

Valdair José Tonon
Marco Antonio Brinati

1. OBJETIVO

Como o terminal marítimo age como interface entre dois modos de transportes com características diferentes, estuda-se o mesmo através de um modelo de fila, com a variação de alguns parâmetros dos componentes do sistema: o transporte marítimo, o transporte ferroviário e o terminal. Com os resultados da fila tem-se condições de analisar os efeitos sobre a operação e economia do sistema, e conseqüentemente fornecer valores para o dimensionamento do terminal.

2. COMPONENTES DO SISTEMA

a) Transporte Marítimo

As chegadas dos navios no terminal constituem um processo aleatório que pode ser representado por uma distribuição probabilística do tipo Poisson.

A demanda anual de exportação é fixada, e também é conhecida a frequência dos tamanhos dos navios que serão atendidos pelo terminal.

b) Transporte Ferroviário

O transporte ferroviário influi sobre os tempos de atendimento dos navios através da sua capacidade de transporte anual, ou melhor, pela velocidade de alimentação (V_u) do produto para o terminal. Por hipótese esta velocidade é tomada como constante em cada alternativa estudada, baseado nos aspectos de que a ferrovia é exclusiva para o transporte de um único produto, com um único local de origem, e um de destino.

c) Terminal Marítimo

As facilidades portuárias compreendem as seguintes partes:

- número de berços: 1
- área de estoque, com capacidade: E_m
- equipamento de carregamento dos navios, com taxa de embarque conhecida: (V'_q)

Assim este sistema compõem-se dos seguintes parâmetros:

- a) distribuição de Poisson para as chegadas dos navios no terminal, com média λ ,
- b) tamanhos dos navios i , $i = 1, \dots, m$, com a respectiva frequência (p_i), e os tempos fixos para atracação e desatracação,
- c) equipamento de carga dos navios, com taxa de embarque V'_ℓ ,
- d) estoque máximo do terminal, E_m ,
- e) Taxa de alimentação do terminal através da ferrovia V_u .

3. RESOLUÇÃO DO PROBLEMA

A resolução do problema é através de um processo de fila do tipo M/G/1, mas cuja distribuição dos tempos de atendimento não é conhecida"

Nesta fila o processo se apresenta de acordo com a seguinte equação:

$$X_{n+1} = \begin{cases} X_n - 1 + Y_n & ; \quad X_n > 0 \\ Y_n & \quad X_n = 0 \end{cases}$$

onde:

- X_{n+1} - representa o estado no fim do atendimento do elemento $n+1$
- X_n - idem para o elemento n
- Y_n - número de elementos que chegam durante o atendimento do elemento $n+1$

As probabilidades de transição ficam assim definidas:

$$P_{0j} = P \{X_{n+1} = j / X_n = 0\} = P \{j \text{ chegadas durante o atendimento do elemento } n+1\}$$

$$P_{ij} = P \{X_{n+1} = j / X_n = i\} = P \{(j+i-1) \text{ chegadas durante o atendimento do elemento } n+1\}$$

$a_j = P \{j \text{ chegadas durante o atendimento de 1 elemento}\}$

$$a_j = \frac{(\lambda v)^j \cdot e^{-\lambda v}}{j!} ; \quad j \geq i-1 ; \quad i = 0, 1, 2, \dots$$

$g(v) =$ distribuição dos tempos de atendimento

Com a matriz (P) de transição, chega-se a distribuição estacionária através da relação $\Pi = \Pi P$, onde $\sum \Pi_j = 1$.

O número médio de elementos no sistema é dado por:

$$L = \sum j \cdot P_j ; \quad \text{onde } P_j = \Pi_j \text{ na fila M/G/1.}$$

Com L determina-se os tempos de espera dos elementos no sistema.

Adaptando a fila M/G/1 para o caso em que há uma aleatoriedade quanto ao nível do estoque, e que depende do processo de chegada, a distribuição dos tempos de atendimento precisa ser determinado a partir de duas distribuições, o comprimento da fila e o nível do estoque.

Como comprimento da fila e o nível do estoque não são variáveis aleatórias independentes, o processo de fila será caracterizado por uma função conjunta $F(j, E)$, que mede a probabilidade do comprimento da fila ser igual a j , e o nível do estoque ser menor ou igual a E , imediatamente após a saída de um navio do terminal.

Brinati (2) desenvolveu as equações de $F(j, E)$, e estabeleceu as relações entre os estágios consecutivos, e consequentemente a solução para a determinação da distribuição estacionária, isto é,

$$F^{n+1}(j, E) = F^n(j, E) = F(j, E)$$

Utilizando parâmetros adimensionais, para as capacidades do estoque e dos navios, e para as taxas de alimentação e embarque, pode-se estudar o processo de uma maneira mais geral do que com valores específicos.

São eles:

$$\alpha_i = \frac{C_i}{E_m} ; \quad \bar{\alpha} = \frac{\bar{C}}{E_m}$$

$$\beta = \frac{V_u}{V_\ell}$$

onde: C_i - DWT do navio i
 \bar{C} - DWT médio do conjunto dos navios
 E_m - estoque máximo
 V_u, V_ℓ - taxas de alimentação e embarque respectivamente

O índice de congestionamento do sistema é definido por:

$$\rho_i = \frac{\lambda C_i}{V_u}, \text{ para o navio com DWT}_i$$

$$\bar{\rho} = \frac{\lambda \bar{C}}{V_u} = \frac{\lambda}{V_u} \sum p_i \cdot C_i, \text{ para todo o processo}$$

Então $\bar{\rho}$ indica a razão entre o valor esperado de carga a ser retirado do terminal por unidade de tempo e o valor da máxima quantidade de carga que pode ser transportada para o estoque na mesma unidade de tempo.

Em virtude dos tempos fixos necessários à atracação e de atracação (o tempo para deslustramento não foi considerado, pois este evento acontece simultaneamente com o tempo de embarque), é necessário fazer uma correção na taxa de embarque, levando em conta estes fatores através da seguinte relação:

$$V_\ell = \frac{V_\ell' \cdot \eta_\ell}{1 + \frac{V_\ell' \cdot \eta_\ell \cdot \bar{T}}{C}}$$

onde: V_ℓ - valor corrigido da taxa de embarque
 V_ℓ' - valor nominal da capacidade de embarque do equipamento
 η_ℓ - eficiência do equipamento
 \bar{T} - tempo fixo médio para qualquer tamanho de navio
 \bar{C} - tamanho do navio médio que utilizará o terminal

Em função da capacidade de estoque e da aleatoriedade da chegada dos navios, a taxa de carregamento durante o atendimento de um navio terá a seguinte variação:

i) será constante e igual a V_ℓ se no início do carregamento o estoque E for maior ou igual a $\frac{C_i (V_\ell - V_u)}{V_\ell}$

ii) em caso contrário, terá valor V_l até terminar o estoque, e depois continuará com a taxa V_u .

O cálculo da distribuição estacionária é feito através de um programa de computador em linguagem FORTRAN, utilizando um processo numérico baseado no método de aproximações sucessivas.

Para se conseguir os resultados pelo programa é necessário estabelecer as seguintes condições:

a) estabelecer um critério de convergência no sentido de se obter uma boa aproximação da distribuição estacionária, isto é,

$$|F^n(j,x) - F^{n+1}(j,x)| \leq \epsilon_1$$

b) idem para o caso em que

$$1 - \sum_{j=1}^k F^n(j,1) \leq \epsilon_2$$

c) a função $F(j,x)$ é calculada para um conjunto de valores no intervalo $(0,1)$.

Uma vez determinada a distribuição estacionária, o valor esperado do comprimento da fila é determinado pela relação:

$$L = \sum_{j=0}^k (j,1),$$

onde: k representa um valor tal que a probabilidade de que haja mais que m navios no terminal é desprezível.

O cálculo de custo de espera dos navios é uma função de seu DWT, e portanto é necessário que se conheça o tempo médio de espera para cada tamanho de navio, cuja determinação é feita através das seguintes relações:

$$W = \frac{L}{\lambda}$$

$$L = Lq - F(0,1) + 1 \quad ; \quad Wq = \frac{Lq}{\lambda}$$

$\bar{t} = W - Wq$, - tempo médio geral de atendimento

$$K = \frac{\bar{t}}{C} = \frac{t_i}{C_i}$$

$$W_i = W_q + \bar{t}_i = W_q + i \cdot \bar{t}_1, \text{ para } C_i \text{ múltiplo de } C_1$$

W_i - tempo médio de permanência do navio de tamanho C_i no terminal.

4. APLICAÇÃO DO MODELO

Os dados utilizados para a aplicação do modelo aqui apresentado foram tomados como base o terminal da Ponta da Madeira (4), para a exportação do minério de ferro de Carajás.

- a) Demanda anual de minério de ferro exportado: 10 MTPA
- b) Tamanhos e frequências dos navios

faixa de DWT/10 ³	frequência (%)
10 - 30	4,95
30 - 50	19,27
50 - 70	7,93
70 - 90	10,04
90 - 110	4,80
110 - 130	19,70
130 - 150	18,34
150 - 170	9,73
170 - 190	5,24

- c) Capacidade média dos navios: $\bar{C} = 100600 \text{ t}$
- d) Número médio de navios por ano: $n = 104,64$
(admitindo que os navios serão carregados com 95% de sua capacidade)
- e) Média diária de chegadas de navios: $\lambda = 0,2867$
- f) Tabela dos tempos fixos (em horas) da ocupação e desocupação do berço

faixa de DWT.10 ³ atividades	10-30	30-50	50-70	70-90	90-110	110-130	130-150	150-170	170-190
1. Chegada de navios									
a. esperando maré	0,21	0,21	0,21	0,21	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44
b. manobras de atracação	1,50	1,50	1,50	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
2. Carregamento dos navios									
a. atraso inicial	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
b. troca de porões	1,13	1,20	1,27	1,33	1,40	1,46	1,53	1,59	1,66
c. acerto do trim	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
d. atraso final	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
3. Partida dos navios									
a. esperando maré	0,21	0,21	0,21	0,21	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44
b. das atracação	0,75	0,75	0,75	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
T O T A L	5,80	5,87	5,94	6,75	9,28	9,38	9,41	9,47	9,54

g) Tempo fixo médio: $\bar{T} = 8,01$ h

i) Custo de espera dos navios

A hipótese para o cálculo do custo de espera dos navios é de que o transporte marítimo é de responsabilidade de quem adquire o minério de ferro. Portanto a administração do porto indeniza os navios quando o tempo de espera ultrapassa o tempo concedido, ou recebe um prêmio em caso contrário.

A) Tempo concedido

1. Navios com DWT 120000 t - tempo concedido: 3 dias + 3h

2. Navios com DET 120000 t - tempo concedido: 3 dias + 3 horas + $\frac{\Delta DWT}{5000}$ h ; com ΔDWT acima de 120000 t

B) Multas

1. primeiros 50000 t - US\$ 0,10/t/dia

2. seguintes 70000 t - US\$ 0,06/t/dia

3. diferença acima de 120000 t - US\$ 0,05/t/dia

C) Prêmios - metade do valor das multas

faixa de DWT.10 ³ atividades	10-30	30-50	50-70	70-90	90-110	110-130	130-150	150-170	170-190
1. Chegada de navios									
a. esperando maré	0,21	0,21	0,21	0,21	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44
b. manobras de atracação	1,50	1,50	1,50	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
2. Carregamento dos navios									
a. atraso inicial	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
b. troca de porões	1,13	1,20	1,27	1,33	1,40	1,46	1,53	1,59	1,66
c. acerto do trim	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
d. atraso final	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
3. Partida dos navios									
a. esperando maré	0,21	0,21	0,21	0,21	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44
b. das atracação	0,75	0,75	0,75	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
T O T A L	5,80	5,87	5,94	6,75	9,28	9,38	9,41	9,47	9,54

g) Tempo fixo médio: $\bar{T} = 8,01$ h

i) Custo de espera dos navios

A hipótese para o cálculo do custo de espera dos navios é de que o transporte marítimo é de responsabilidade de quem adquire o minério de ferro. Portanto a administração do porto indeniza os navios quando o tempo de espera ultrapassa o tempo concedido, ou recebe um prêmio em caso contrário.

A) Tempo concedido

1. Navios com DWT 120000 t - tempo concedido: 3 dias + 3h

2. Navios com DET 120000 t - tempo concedido: 3 dias + 3 horas + $\frac{\Delta DWT}{5000}$ h ; com ΔDWT acima de 120000 t

B) Multas

1. primeiros 50000 t - US\$ 0,10/t/dia

2. seguintes 70000 t - US\$ 0,06/t/dia

3. diferença acima de 120000 t - US\$ 0,05/t/dia

C) Prêmios - metade do valor das multas

j) Critério de convergência (Ítem 11, pg.5)

1. $\epsilon_1 = 3.10^{-5}$
2. $\epsilon_2 = 5.10^{-4}$
3. nº de divisões do intervalo (0,1) : 100

k) Transporte ferroviário

A capacidade do transporte ferroviário deve ser maior que a demanda, para não se ter o congestionamento do terminal.

Assim estudamos quatro alternativas de capacidade de transporte, que são as seguintes:

1. $\beta_1 = 0,20$ - $CT_f = 12\ 050\ 680\ t$ - $\bar{\rho} = 0,87$
2. $\beta_2 = 0,225$ - $CT_f = 13\ 151\ 470\ t$ - $\bar{\rho} = 0,80$
3. $\beta_3 = 0,25$ - $CT_f = 15\ 063\ 350\ t$ - $\bar{\rho} = 0,70$
4. $\beta_4 = 0,30$ - $CT_f = 18\ 076\ 020\ t$ - $\bar{\rho} = 0,58$

As composições ferroviárias constarão de 4 locomotivas e 160 vagões, com uma carga total de 13760 t.

- preço da locomotiva U-23-C-GE: US\$ 413 467,00
- preço do vagão de 90 t : US\$ 41 347,00

Este equipamento foi considerado com uma vida útil de 25 anos, com valor residual de 10%, e a uma taxa de juros anual de 15%.

Por se tratar de um estudo dirigido para a operacionalidade do terminal, foi conveniente apreciar os custos ferroviários somente os relativos ao material rodante necessários para atender a capacidade de transporte acima dos 10 MTPA, considerando que a via permanente assim como as instalações fixas ao longo do percurso atendem, de uma maneira geral, estes acréscimos da capacidade de transporte.

Os custos de manutenção não foram considerados, pois admitiu-se que eles fossem uma função exclusiva da carga efetivamente transportada, e esta é a mesma para todas as alternativas.

1) Terminal

1) Terminal

1. nº de berços: 1
2. velocidade de carregamento - $V' = 16000$ t/h
3. eficiência do equipamento - $\eta_l = 95\%$
4. velocidade corrigida de taxa de embarque: $V_l = 6878,24$ t/h
5. área de estocagem para 400000 t de minério

5. RESULTADOS

β	L	W	M	F	T
0,20	1,471	5,13	1,70	2,33	4,03
0,225	0,693	2,35	-0,28	3,43	3,15
0,25	0,362	1,26	-0,78	5,39	4,61
0,30	0,234	0,82	-0,97	8,54	7,57

L - comprimento médio da fila

W - tempo médio de espera em dias

M - custo de espera em US\$. 10^6 (o valor negativo representa o prêmio recebido pela administração do terminal)

F - custo do acréscimo de investimento anual do transporte ferroviário, em US\$. 10^6

T - valor resultante das duas parcelas, em US\$. 10^6

6. CONCLUSÕES

- a) O modelo é sensível a uma variação do tamanho do estoque através do parâmetro α , que possuindo uma estrutura de custo, incorpora-se a tabela acima, fornecendo resultados mais significativos para a avaliação do sistema.
- b) Como pode ser visto na figura 1, a variação do tamanho do estoque influi no comprimento da fila, e consequentemente nos custos de espera dos navios.

- c) Com um valor de estoque, pode-se levantar um gráfico (Fig. 2) de β x US\$ anuais, no sentido de avaliar a melhor configuração do transporte ferroviário, ou para o equipamento de embarque.
- d) Analogamente, fixando um valor de $\bar{\beta}$, tem-se um gráfico α x US\$ anuais, e assim avaliar sobre a capacidade de estocagem.

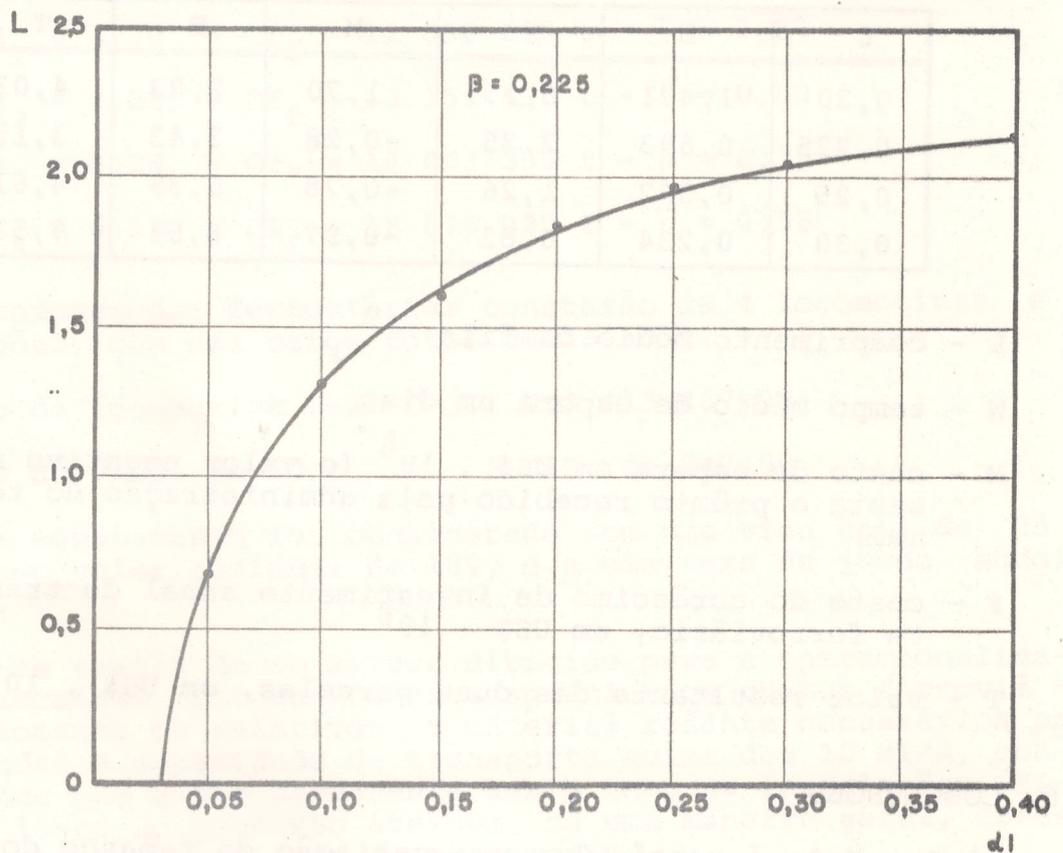


FIGURA 1 - COMPRIMENTO DE FILA X CAPACIDADE DE ESTOQUE

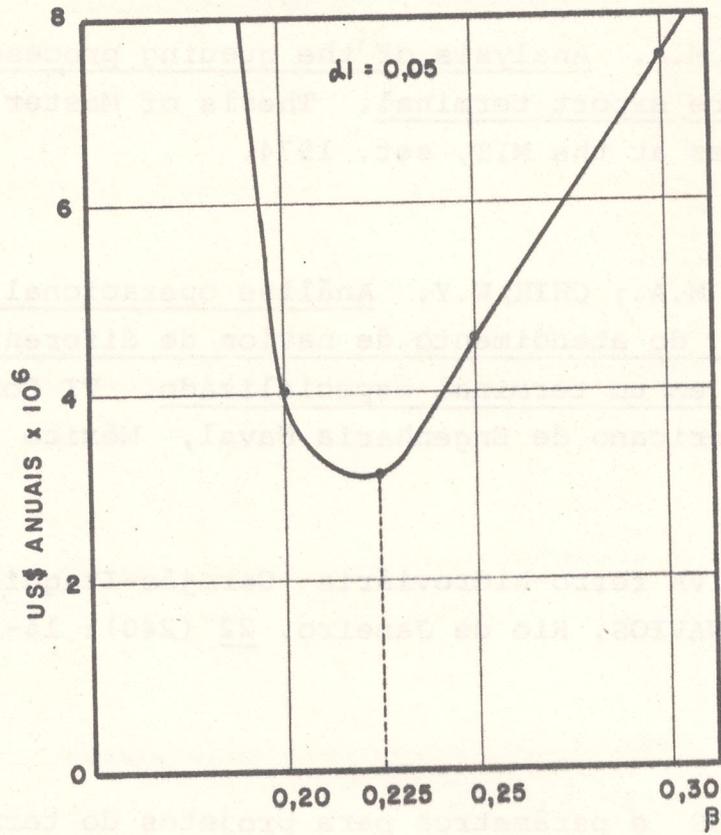


FIGURA. 2- SOMA DOS CUSTOS DE ESPERA DOS NAVIOS COM O ACRESCIMO DO INVEST. ANUAL DO TRANSP. FERROVIÁRIO X CAPACIDADE DE TRANSPORTE FERROVIÁRIO

BIBLIOGRAFIA

1. BRINATI, M.A. Analysis of the queuing process at an offshore export terminal. Thesis of Master of Sciences at the MIT, set. 1974.
2. BRINATI, M.A.; CHIH, W.Y. Análise operacional e econômica do atendimento de navios de diferentes tamanhos em um terminal especializado. VI Congresso Pan Americano de Engenharia Naval, México 1979.
3. ALTERNATIVA ferro-hidroviária Carajás-Itaqui, PORTOS E NAVIOS, Rio de Janeiro, 22 (240): 14-17, ago. 1979.
4. CRITÉRIOS e parâmetros para projetos do terminal de Ponta da Madeira. Amazônia Mineração S/A. dez. 1978.