

Uma metodologia para o dimensionamento de frota de rebocadores em terminais portuários

Diana Schein¹, Milton Luiz Paiva de Lima²

¹ Mestranda do curso de Engenharia Oceânica- FURG, Rio Grande, RS - dianaschein@yahoo.com.br

² Depto. Materiais e Construção – FURG, Rio Grande,RS - milton@dmc.furg.br

RESUMO: Este trabalho apresenta uma metodologia para o dimensionamento de frota de rebocadores em terminais portuários, procurando chegar ao número adequado de rebocadores para atender as necessidades de um porto, de modo a obter economia e satisfação dos clientes. Para tanto, são analisados dados de entrada e saída de navios, juntamente com o número de operações e solicitações de rebocadores. São utilizadas técnicas de modelagem de filas para dimensionar a frota ideal.

PALAVRAS-CHAVE: rebocadores, navios, Teoria de Filas.

ABSTRACT: This paper presents a methodology for scaling of the fleet of tugboats in port terminals, trying to get adequate number of tugs to meet the needs of a port to obtain economy and customer satisfaction. To do so, are analyzed data of the arrival and exit of ships, along with the number of operations and demands of tugs. Queue modeling techniques are used to size the ideal fleet.

KEYWORDS: tugs, ships, Queues Theory.

1. INTRODUÇÃO

Pode-se dizer que os portos atuam como elos de uma Cadeia Logística, pois eles são os pontos de integração entre os modais de transporte terrestre e marítimo, com a função adicional de amortecer o impacto do fluxo de cargas no sistema viário local, através da armazenagem e da distribuição física.

O desenvolvimento portuário é visto como um importante elemento estratégico para o crescimento econômico. Portanto, atualmente, muito se tem focado a busca de melhorias nos sistemas portuários, aumentando assim, a eficiência no transporte de cargas, requisito fundamental para a competitividade. Neste contexto, é importante considerar o papel dos rebocadores na atracação e desatracação de navios nos terminais portuários.

Assim sendo, este trabalho apresenta uma metodologia para o dimensionamento de frota de rebocadores em terminais portuários procurando chegar ao número adequado de rebocadores para atender as necessidades de um porto, de modo a obter economia e satisfação dos clientes. Para tanto, são analisados dados de entrada e saída de navios, juntamente com o número de operações e solicitações de rebocadores. São utilizadas técnicas de modelagem de filas para dimensionar a frota ideal.

2. A PROBLEMÁTICA DOS REBOCADORES EM UM PORTO

Um rebocador é um barco projetado para empurrar, puxar e rebocar barcas ou navios em manobras delicadas (como atracação/desatracação). Eles são caracterizados por ter pequeno porte, motores potentes e alta capacidade de manobra. Por isso, eles são usados com a finalidade de auxiliar a manobra de grandes navios.

As características mais importantes de um rebocador é a sua potência, que deve estar adequada às diversas tonelagens dos navios e a força de tração estática (bollard pull¹). Outros aspectos que podem ser considerados para se estabelecer a capacidade de manobra de um rebocador são: estabilidade; deslocamento; *tipo de propulsão*; *posição do(s) propulsor(es)*; *posição do gato, cabeço ou guincho (ponto de aplicação da força de tração)*.

Segundo ref. [1], gato é um gancho de metal preso na extremidade do cabo ou corrente do guindaste e ao qual é engatado o laço do estropo, da funda etc., auxiliando no içamento de pesos e fixação das amarras na movimentação da lingada. Cabeço é uma estrutura de ferro maciço, encravada no cais ou aos pares, junto à amurada da embarcação, destinada a agüentar as voltas dos cabos de amarração.

Segundo Frago e Cajaty [5], a combinação de todas as variáveis citadas acima que vão definir não apenas a “manobrabilidade” do rebocador, como a melhor posição para utilizá-lo durante a manobra, suas limitações e principais qualidades. Essa questão influencia fortemente os custos logísticos, uma vez que o setor portuário movimenta milhões de dólares. É por este motivo que as empresas do setor, nos últimos anos, vêm investindo na melhoria de suas frotas.

2.1. Classificação dos rebocadores

Em relação ao tipo de propulsão, os rebocadores podem ser classificados como: *rebocadores com propulsão convencional* ou *rebocadores com propulsão azimutal ou cicloidal*.

Considerando-se o tipo de propulsão combinado com outros aspectos como: posição dos propulsores e posição do ponto de aplicação da força de tração, os rebocadores com propulsão azimutal ou cicloidal podem ser subdivididos em duas categorias: *rebocadores azimutais ou cicloidais com propulsão a vante* ou *rebocadores azimutais ou cicloidais com propulsão a ré*;

Os rebocadores com propulsão convencional são rebocadores de concepção mais antiga ainda em atividade, encontrados em muitos portos. Eles podem ser dotados de um ou mais hélices, sempre fixos. São rebocadores com capacidade de manobra mais limitada em relação aos azimutais, menos potentes, na faixa dos 1500hp a 4000 hp (os maiores), bollard pull (tração estática) na faixa de 25 a 45 Toneladas. A sua utilização requer atenção constante nas situações que possam comprometer sua estabilidade.

Os rebocadores com propulsão azimutal ou cicloidal são rebocadores muito mais eficientes, se comparados com os de propulsão convencional, porque tem ótima capacidade de manobra. Eles podem rebocar em qualquer direção, devido ao seu sistema de propulsão, geralmente são dois Thrusters (hélices direcionais), por isso podem girar em 360° no eixo, os cabos de reboque podem ser conectados tanto na proa quanto na popa, pois utilizam guinchos de tração.

Devido a este sistema de propulsão, esses rebocadores não precisam de leme para governar. Possuem motores potentes e econômicos, com ótima tração estática. São preferidos,

¹ Medida que afere a capacidade máxima de um rebocador para puxar ou empurrar um navio. A capacidade desta embarcação é determinada para se estabelecer a quantidade de rebocadores necessária para atracar ou desatracar um navio de milhares de toneladas.

pela facilidade de manobra, porém são bem mais caros que os convencionais. Comumente observa-se essas embarcações navegando de popa ou mesmo de lado, fato este que se deve a boa integração entre propulsão e direção.

A Figura 1 apresenta, de forma esquemática, a visão de um rebocador e suas principais partes.

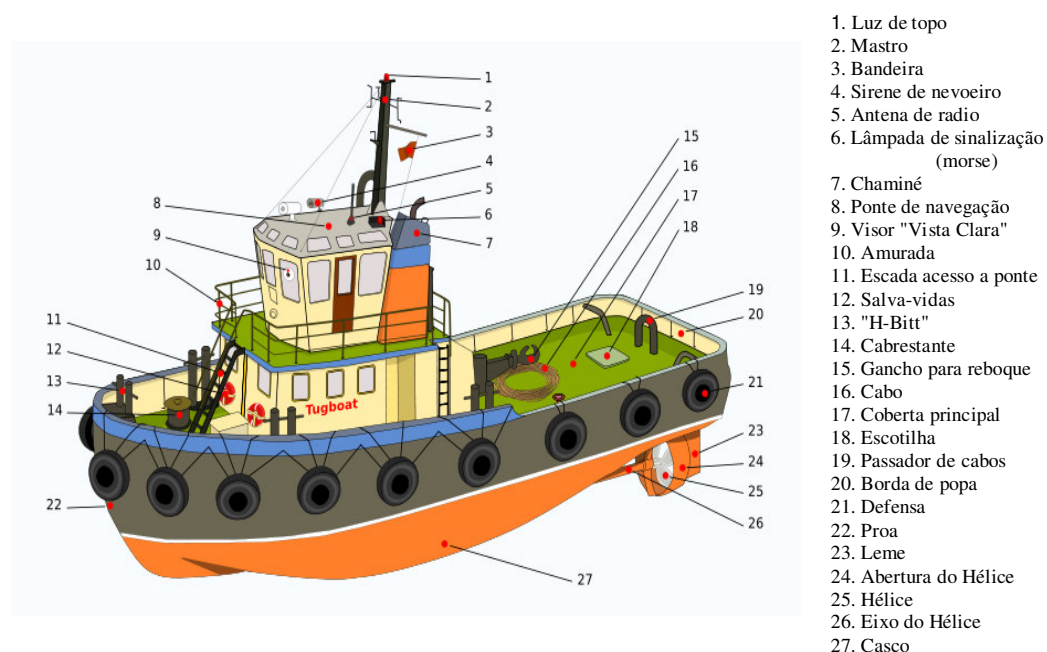


Fig. 1: Esquema de um rebocador

A seção a seguir, apresenta a técnica de Teoria de Filas, a qual será a metodologia a ser empregada para o dimensionamento de uma frota de rebocadores.

3. A TÉCNICA DE TEORIA DE FILAS

A Teoria de Filas é um setor da Pesquisa Operacional que utiliza conceitos de processos estocásticos e de matemática aplicada para analisar o fenômeno de formação de filas e suas características, segundo Novaes [4]. Esta teoria foi desenvolvida com o intuito de prever o comportamento das filas de modo que se possa dimensionar um determinado sistema segundo a demanda dos seus clientes, evitando desperdícios ou gargalos. No caso em tela, a Teoria de Filas será usada para dimensionar o número de rebocadores adequado para atender as necessidades de um determinado porto.

A utilização desses modelos às vezes pode exigir grandes simplificações para representar as situações reais. Mas, mesmo assim, há vantagens em desenvolver tais modelos, pois eles podem fornecer uma situação aproximada da situação real.

A modelagem de filas é aplicada em algumas áreas como linhas de produção, processamento de dados, transportes, etc.

Uma fila é caracterizada por um processo de chegadas de clientes (pessoas, veículos, navios, trens etc.) de uma determinada população a um sistema de atendimento formado por uma ou mais unidades de serviço (boxes de pedágio, berços de atracação de navios etc.). Usa-se também o termo “transação” ou “entidade” como sinônimo para cliente.

A Figura 2 representa um processo de filas tradicional.

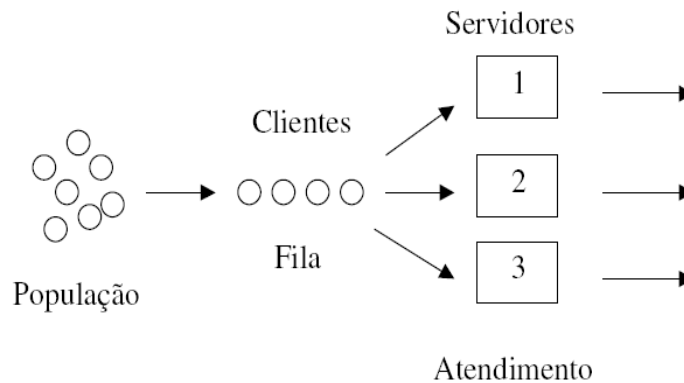


Fig. 2: Representação de um processo de filas

Quando a população é muito grande (infinita), a chegada de um novo cliente a uma fila não afeta a taxa de chegada de clientes subsequentes e neste caso diz-se que as chegadas são independentes. Mas, se a população é pequena, a chegada de um novo cliente afeta a taxa de chegada, e o efeito pode ser considerável.

Geralmente os processos de chegadas de uma fila admitem uma distribuição de frequência, tal como a distribuição Normal, de Poisson, Exponencial, etc. Pode ocorrer um tipo raro de processo de chegada que é o regular, ou seja, aquele em que não existe nenhuma variação entre os valores para os intervalos entre chegadas. O processo de chegada, em estudos de filas, pode ser quantificado através de duas variáveis aleatórias, quais sejam a taxa ou ritmo de chegada (λ) e o intervalo entre chegadas (IC).

No processo de atendimento também se lança mão de uma distribuição de probabilidades para descrever os valores médios. Neste caso, também é rara a existência prática do atendimento chamado regular. O processo de atendimento, em estudos de filas também pode ser quantificado através de duas variáveis aleatórias, que são a taxa ou ritmo de atendimento (μ) e o tempo ou duração do serviço ou atendimento (TA).

A seção a seguir, apresenta a metodologia a ser utilizada no dimensionamento da frota de rebocadores.

4. O USO DA MODELAGEM DE FILAS NO DIMENSIONAMENTO DE FROTA DE REBOCADORES

A metodologia utilizada neste artigo para dimensionar a frota ideal de rebocadores em um porto através do uso da modelagem de Filas, está baseada numa pesquisa realizada por Novaes [4].

Para tanto, é preciso fazer uma análise de demanda, ou seja, analisar as chegadas e saídas de navios durante certo período. A partir desses dados calcula-se o fluxo médio de navios/dia (λ). Com este fluxo médio é possível ajustar uma distribuição de Poisson através da fórmula de recorrência das frequências teóricas relativas, segundo ref. [6]:

$$P_n = \left(\frac{\lambda}{n}\right) P_{n-1} \quad (1)$$

onde P_n representa a probabilidade de “n” usuários chegarem ao sistema no intervalo de tempo considerado. A probabilidade na primeira iteração é dada por:

$$P_0 = e^{-\lambda} \quad (2)$$

Na seqüência, são analisados os tempos de atendimento de rebocadores, juntamente com o número mensal de operações e solicitações. Com isto, é possível chegar a uma média de operações por navio. O número de operações é maior que o número de solicitações, pois geralmente, as manobras requerem mais de um rebocador por navio. Também existem casos de mudança de posição, levando a um maior número de solicitações por navio.

Devido à natureza aleatória da operação, os tempos de atendimento são admitidos como sendo regidos por uma distribuição Exponencial. Assim, foi convencionado que as filas tenham chegado regidas pela distribuição de Poisson e o processo de atendimento tenha uma distribuição Exponencial, com “c” posições de atendimento (ref. [2]).

A partir de dados históricos disponíveis, faz-se uma projeção futura, dado este necessário para dimensionar a frota ideal de rebocadores à curto prazo. Esta projeção é calculada com base em uma análise de regressão linear.

$$y = ax + b \quad (3)$$

O modelo de Filas empregado neste estudo é do tipo M/M/C, onde C é o número de rebocadores em serviço. Esta nomenclatura mostra que o processo de entrada é regido por uma distribuição de Poisson e o processo de atendimento, por uma distribuição Exponencial.

O cálculo do tempo médio de espera dos navios no modelo é dado pela equação:

$$\omega_q = \frac{\pi_0 (\rho C)^c}{(1-\rho)^2 C! C} \cdot \frac{1}{\mu} \quad (4)$$

com:

$$\rho = \frac{\lambda}{C\mu} \quad (5)$$

e

$$\pi_0 = \frac{1}{\sum_{j=0}^{c-1} \frac{(C\rho)^j}{j!} + \frac{(C\rho)^c}{C!(1-\rho)}} \quad (6)$$

onde:

- λ é o fluxo médio de chegadas;
- μ é o ritmo médio de atendimento;
- C é o número de rebocadores.

Para encontrar a frota ideal, precisa-se saber, para efeitos de cálculo, o número de rebocadores, o custo operacional médio de um rebocador por dia, o custo por hora do navio típico que entra no porto e a média de entradas de navios por dia numa data futura.

Com base nestes dados é possível verificar o número de rebocadores adequado para atender a demanda. Para tanto, calcula-se o custo total:

$$[\text{custo total}] = \text{custo operacional (rebocadores)} + \text{custo total de espera (navios)} \quad (7)$$

Sendo que, o custo total de espera é dado pela fórmula:

$$[\text{custo total de espera}] = \frac{\text{custo médio p/hora}}{(\text{navio})} * W_q * \frac{\text{média entradas (navios) p/}}{\text{dia (projeção futura)}} \quad (8)$$

Na seção a seguir, é apresentado um exemplo de aplicação da metodologia proposta, com dados de entradas e saídas de navios e tempos de atendimento e solicitações de rebocadores referentes ao porto do Rio Grande e outros dados simulados referentes à pesquisas anteriores.

5. UM EXEMPLO DE APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA

Para o cálculo do fluxo médio de chegadas teve-se que fazer uma análise das chegadas diárias. Na pesquisa considera-se para a análise de demanda, os dados de chegadas e saídas de navios durante o período de 1º de janeiro a 31 de junho de 2007, num total de 181 dias (6 meses).

No período considerado houve 1602 entradas ou saídas, levando a um fluxo médio de $\lambda = 8,85$ navios/dia. Com o fluxo médio pôde-se ajustar uma distribuição de Poisson através da fórmula de recorrência das frequências teóricas relativas segundo as equações (1) e (2). Os resultados da análise são apresentados na Tabela 1 e na Tabela 2:

Tabela 1: Análise das Chegadas de Navios no Porto de Rio Grande (2007)

No. Chegadas	Freq. Obs.	Freq. Relativa	Freq. Relat. Acum.	Freq. Rel. Teórica	Freq. Rel. Teórica Acum.	Freq. Teóricas
0	0	0,0000	0,0000	0,0001	0,0001	0,03
1	0	0,0000	0,0000	0,0013	0,0014	0,23
2	1	0,0055	0,0055	0,0056	0,0070	1,02
3	0	0,0000	0,0055	0,0166	0,0236	3,00
4	5	0,0276	0,0331	0,0366	0,0602	6,63
5	19	0,1050	0,1381	0,0649	0,1251	11,74
6	17	0,0939	0,2320	0,0957	0,2208	17,32
7	22	0,1215	0,3536	0,1210	0,3418	21,89
8	21	0,1160	0,4696	0,1338	0,4756	24,22
9	25	0,1381	0,6077	0,1338	0,6094	24,22
10	19	0,1050	0,7127	0,1184	0,7278	21,44
11	17	0,0939	0,8066	0,0953	0,8231	17,25
12	15	0,0829	0,8895	0,0703	0,8934	12,72
13	9	0,0497	0,9392	0,0478	0,9412	8,66
14	6	0,0331	0,9724	0,0302	0,9715	5,47
15	3	0,0166	0,9890	0,0178	0,9893	3,23
16	1	0,0055	0,9945	0,0099	0,9992	1,79
17	1	0,0055	1,0000	0,0051	1,0043	0,93
TOTAL	181	1,0000	-	-	-	-

(*) Número de dias em que se observam “n” chegadas.

Tabela 2: Cálculo do fluxo médio.

No. Chegadas	Freq. Obs.	Col.1 x Col. 2
0	0	0
1	0	0
2	1	2
3	0	0
4	5	20
5	19	95
6	17	102
7	22	154
8	21	168
9	25	225
10	19	190
11	17	187
12	15	180
13	9	117
14	6	84
15	3	45
16	1	16
17	1	17
TOTAL	181	1602

Fluxo Médio = $1602 / 181 = 8,85$

Na Figura 3 são apresentadas as frequências teóricas e as frequências observadas e na Figura 4, as frequências acumuladas.

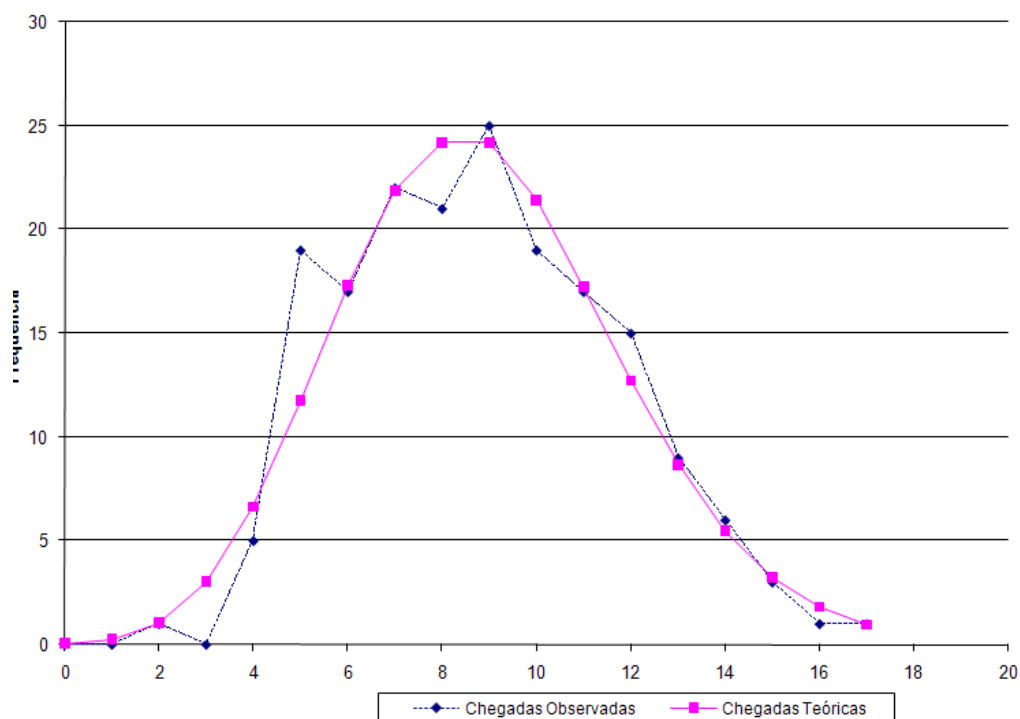


Fig. 3: Distribuição das chegadas de navios no Porto do Rio Grande

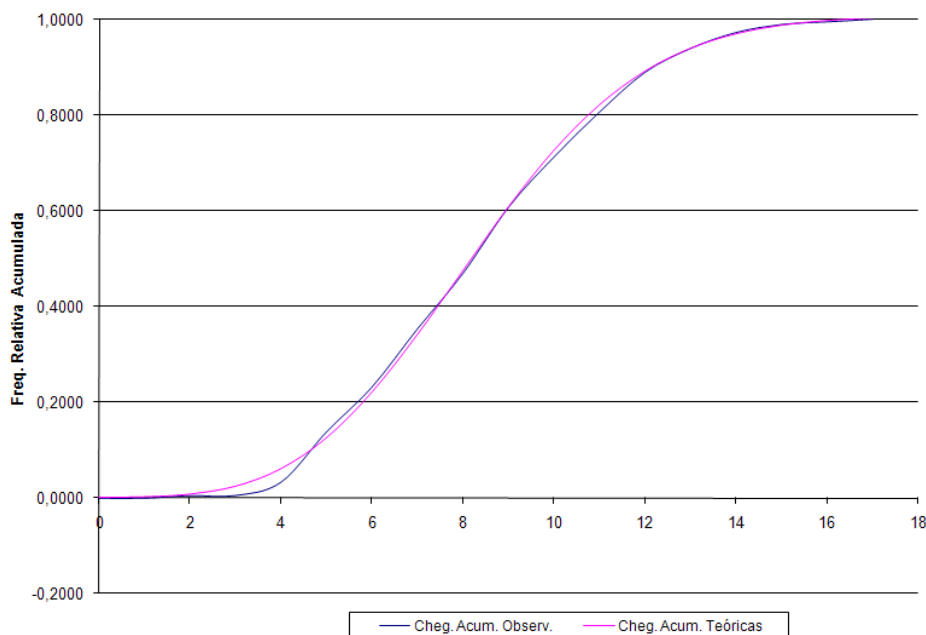


Fig. 4: Distribuição Acumulada de chegadas de navios no Porto do Rio Grande

Não se dispunham de dados sobre tempos de atendimento individualizados dos rebocadores, somente do número de operações e solicitações que, no exemplo em questão, cobrem seis meses, de janeiro a junho de 2007. Estes dados são fornecidos na Tabela 3 e são referentes ao estudo de quinze rebocadores. Observou-se, para o período considerado, uma média de 2,32 operações por navio ou 1,16 operações por entrada ou saída de embarcação.

O tempo médio de atendimento por rebocador e por operação é de 1,15 horas. Sendo admitido um período útil de 20 horas por dia, tem-se uma capacidade média de atendimento de 17,39 operações por rebocador e por dia.

Tabela 3: Utilização de rebocadores no porto de Rio Grande

	Janeiro 2007	Fevereiro 2007	Março 2007	Abril 2007	Maió 2007	Junho 2007	Total
A. Número de Operações	546	505	533	639	766	726	3715
B. Movimento de Navios							
Entradas	238	245	245	273	301	300	1602
Saídas	238	232	249	267	302	303	1591
TOTAL	476	477	494	540	603	603	3193

A seguir, é apresentada a Figura 5, referente à análise de regressão linear.

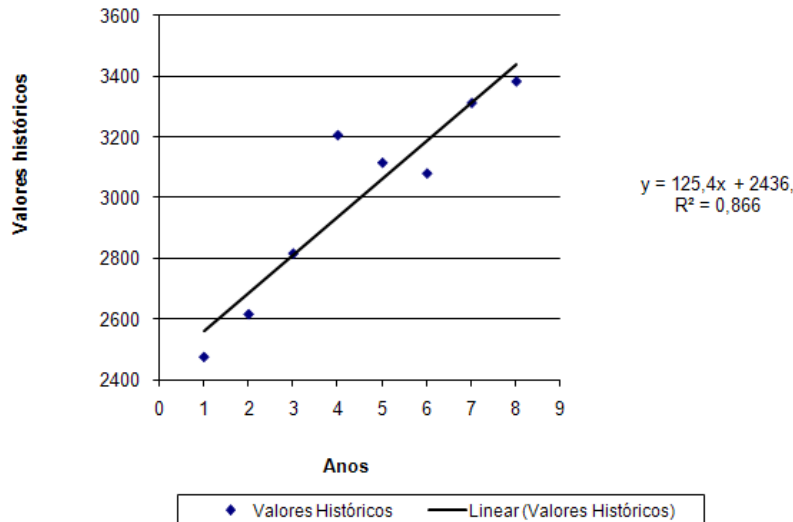


Figura 5: Dados históricos sobre entrada de navios

Na Tabela 4 são apresentados os dados históricos de entradas de navios no porto de Rio Grande para os diversos anos, juntamente com as projeções futuras (até 2015) calculadas a partir da fórmula da regressão linear dada acima. Foi obtido um $R^2 = 0,86$ (coeficiente de correlação entre as variáveis anos e valores históricos de entradas de navios). Fazendo o teste para verificar a correlação das variáveis ao nível de 5% de significância, constatou-se que a correlação é significativa.

Tabela 4: Movimento anual de navios no porto de Rio Grande (Quantidade de navios entrados)

Ano	Valores Históricos	Projeções
2000	2476	-
2001	2617	-
2002	2817	-
2003	3207	-
2004	3116	-
2005	3081	-
2006	3313	-
2007	3384	-
2008	-	3566
2009	-	3691
2010	-	3817
2011	-	3942
2012	-	4068
2013	-	4193
2014	-	4318
2015	-	4444

Considerando-se como referência o horizonte de 2011, ter-se-á um total de $2 \cdot 3942 = 7884$ entradas e saídas naquele ano. Esse valor conduz a uma média diária de 21,6 entradas ou saídas por dia. Assim, no problema em estudo, tem-se $\lambda = 21,6$ e $\mu = 17,39$.

Na Tabela 5 são apresentados os cálculos dos tempos de espera dos navios para os diversos valores de C.

Tabela 5: Cálculo do tempo médio de atendimento

Nº de rebocadores (C)	ρ	π_0	ω_q (horas)
1	>1	-	-
2	0,621	0,2338	0,71876
3	0,414	0,281	0,10016
4	0,311	0,2871	0,01735
5	0,248	0,2892	0,00287
6	0,207	0,2878	0,00045
7	0,177	0,2897	0,00006

O custo operacional médio de um rebocador é de aproximadamente U\$\$ 6.500,00/dia, ou cerca de U\$\$ 271,00/hora. O custo médio diário de um navio é de aproximadamente U\$\$ 32.500,00/dia, ou cerca de U\$\$ 1.354,00/hora.

Para o horizonte de 2011 tem-se a projeção futura de 3942 entradas de navio, ou seja, 10,8 entradas por dia. Considerando-se os dados de espera calculados através do modelo de filas indicados na tabela 5, tem-se:

Tabela 6: Custo total de rebocadores.

Nº de rebocadores	Custo operacional dos rebocadores (U\$\$/dia)	Custo total de espera dos navios (U\$\$/dia)	Custo total (U\$\$/dia)
2	13.000	10.510,57	23.510,57
3	19.500	1.464,66	20.964,66
4	26.000	253,71	26.253,71
5	32.500	41,97	32.541,97
6	39.000	6,58	39.006,58
7	45.500	0,91	45.500,91

Vê-se, portanto que, para um período útil de 20 horas por dia, a frota de três rebocadores é a mais adequada, pois tem menor custo.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho abordou a questão do uso da Teoria de Filas, modelo matemático muito usado dentro da área da pesquisa operacional, no dimensionamento da frota ideal de rebocadores para atender o porto do Rio Grande. Para tanto, foi aplicado o modelo de Fila conhecido como M/M/C, onde as chegadas regidas pela distribuição de Poisson e o processo de atendimento por uma distribuição Exponencial, com “C” número de rebocadores. A aplicação dessa metodologia levou à conclusão de que o tamanho de frota mais indicado para a situação em análise é de três rebocadores.

7. REFERÊNCIAS

1. DICIONÁRIO ON LINE. Disponível em <<http://www.portogente.com.br/texto.php?cod=295>> Acesso em 13.08.2008.
2. DUARTE, Karina Pires. *Análise operacional do complexo portuário de Rio Grande usando Teoria de Filas*. Rio Grande, 2007. Tese (Mestrado), Universidade Federal de Rio Grande, Engenharia Oceânica.
3. ENCICLOPÉDIA BARSÁ. Rio de Janeiro: Encyclopaedia Britannica Editores, 1964. Vol. 11. Disponível em < <http://pt.wikipedia.org/wiki/Rebocador>> Acesso em 12.08.2008.
4. NOVAES, Antônio Galvão Naclério. *Pesquisa operacional e transportes: modelos probabilísticos*. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, E. da Universidade de São Paulo, 1975.
5. SILVA, Otávio Augusto Fragoso Alves da; CAJATY, Marcello Campello. *Rebocadores Portuários*. Rio de Janeiro: Conselho Nacional de Praticagem, 2002.
6. ZAVALONI, G. Adequação de Projetos Portuários à Moderna Tecnologia Naval: Aspectos Técnicos e Operacionais. In: NOVAES, Antônio Galvão. *Pesquisa Operacional e Transportes: Modelos Probabilísticos*. São Paulo: Editora. Mc Graw-Hill do Brasil Ltda, 1970.