

UTILIZAÇÃO DE MODELOS DE FILAS E DE SIMULAÇÃO NO PLANEJAMENTO DE TERMINAIS MARÍTIMOS DE CONTÊINERES

Antonio Galvão Novaes
Vanina Macowski Durski Silva
Hobed Rosa

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção
Universidade Federal de Santa Catarina

RESUMO

Modelos de filas têm sido muito usados para estimar tempos médios de espera de navios nos portos, mas, à medida que o manuseio dos diversos tipos de carga foi se especializando (petróleo, minério, grãos, contêineres, etc.), a modelagem matemática se tornou mais complexa, principalmente para o transporte marítimo em contêineres. Hoje, a simulação é utilizada com bastante frequência devido às inter-relações entre navios, cais, equipamentos de transbordo, e retro-porto. No entanto, o planejamento desses terminais contempla horizontes de vinte, trinta anos, prazos esses em que se tornam duvidosas as especificações dos valores adequados para as principais variáveis do problema. Discutimos neste trabalho vantagens e desvantagens do uso de modelos de filas e simulação em estudos desse tipo, e sugerindo possíveis alternativas metodológicas para solucionar o problema.

ABSTRACT

Queuing models have been extensively used to estimate ship average waiting times at ports, but, as long as the handling of the different types of cargo have been treated in a specialized way (oil, ore, grains, container, etc.), the associated mathematical modeling became more complex, mainly with regard to the container maritime transportation. Today, simulation is widely used due to the interrelations among ships, quay, loading/unloading equipment, and backyard. But the planning of such terminals implies horizons of twenty, thirty years, for which the specification of adequate values for the main variables of the problem becomes nebulous. We discuss in this paper advantages and disadvantages of using queuing and simulation models in studies of this type, and suggest possible alternatives to solve the problem.

1. INTRODUÇÃO

Portos são importantes pontos de transferência de carga no comércio internacional. Antigamente, em razão do porte restrito dos navios, do maior número de operadores marítimos, e da quantidade expressiva de consignatários, o processo de chegadas dos navios no porto mostrava forte aleatoriedade e independência estatística entre eventos. Assim, o intervalo entre chegadas de navios era quase sempre regido por distribuições exponenciais negativas. Por outro lado, a variedade de tipos de carga, com quantidades e taxas de embarque/desembarque bastante diversas, fazia com que os tempos de permanência dos navios nos portos também fossem regidos por distribuições exponenciais negativas. Todos esses fatores favoreciam a utilização da fila $M/M/c$ para analisar e estimar os tempos de espera dos navios num porto, para a qual o tratamento matemático é mais simples (Saaty, 1961; Page, 1972; Novaes, 1975; Fogliatti e Mattos, 2007). Com a evolução observada no transporte marítimo internacional, e conseqüentemente nos portos, essa característica, no que se refere à escolha do modelo de filas mais apropriado, mudou acentuadamente. Isso porque as operações portuárias de hoje apresentam grau de complexidade bem maior (Günther e Kim, 2005; Kim e Günther, 2007; Shuldt e Werner, 2007). De fato, há fatores que geram tempos de espera dos navios e que não são computados nos modelos de filas tradicionais. Por exemplo, muito embora o número de berços (representado por c nas nossas análises) seja um elemento fundamental nos modelos de filas, muitas vezes um navio de maior porte não pode atracar de imediato, embora teoricamente haja um berço disponível, porque o comprimento de seu casco é maior do que a extensão disponível ao longo do cais. Assim, a disciplina de atendimento dos

navios já não é mais *FIFO* (*first in - first out*), e os modelos clássicos já não se aplicam (Fogliatti e Mattos, 2007). Há também casos em que os contêineres para embarque não são corretamente estivados junto ao berço, ou quando há acúmulo de contêineres desembarcados junto ao navio, ocasionando esperas imprevistas. Muito embora os portos modernos tenham procurado sanar tais deficiências, o planejamento de um novo terminal ou a expansão de um terminal existente exige, muitas vezes, um maior detalhamento do processo de análise.

Uma forma de contornar essas limitações é utilizar modelos de simulação, envolvendo o navio, o cais e o processo de transferência de contêineres entre o navio e o pátio de armazenagem (Kozan, 1997; Kia e Ghotb, 2002; Shabayek e Yeung, 2002; Huang *et al.*, 2007). A utilização da simulação na análise de terminais portuários de contêineres se justifica no estudo de situações presentes, onde são levantados todos os parâmetros que regem a operação portuária, permitindo assim uma melhor representação das condições atuais no dimensionamento do porto. No entanto, como o planejamento portuário deve cobrir horizontes longos (20 anos, ou mais), fica muito difícil definir, com razoável precisão, as práticas reais vigentes em prazos muito longínquos, bem como os parâmetros futuros do processo ao se estruturar os modelos de simulação. O que ocorre na prática é a definição de um cenário atual, que incorpora as melhorias apontadas pelo modelo, e repetindo tal cenário para os horizontes futuros, adotam-se as ampliações de capacidade do terminal de forma a acompanhar a evolução da demanda projetada. Com isso, a simulação de situações futuras com horizontes muito longos está sujeita a erros apreciáveis em função da precariedade dos dados. Assim, seu uso se justifica em análises de viabilidade econômica para prazos relativamente curtos. Argumentamos, neste artigo, que é melhor especificar metas operacionais para serem alcançadas pelos administradores do porto em horizontes pré-definidos, metas essas baseadas nas práticas bem sucedidas observadas em portos internacionais equivalentes, num processo de *benchmarking*. O objetivo deste trabalho é justamente discutir tais aspectos e formalizar uma aplicação parcial focada no Tecon do porto de Rio Grande, RS.

2. EVOLUÇÃO E TENDÊNCIAS DO TRANSPORTE EM CONTÊINERES

É notória a importância dos contêineres para a economia mundial e para um país fortemente voltado à exportação como o Brasil. Atualmente o transporte em contêineres constitui 90% da movimentação internacional de carga geral (Henesey, 2004). Com o advento da globalização, o cenário internacional do transporte em contêineres mudou drasticamente. A expansão do número de companhias de navegação disputando o mercado, o aumento apreciável do porte de navios porta-contêineres, e a entrada de novos portos com tecnologia e operações avançadas, fez com que o propósito dos gestores passasse a ser o desenvolvimento de estratégias que atraíssem novos clientes e melhorassem a satisfação dos mesmos, levando a uma melhor posição competitiva do terminal perante competidores nacionais e internacionais.

No caso brasileiro, a situação não é diferente. Dados da Câmara Brasileira de Contêineres, conforme indicado na Tabela 1, mostram a movimentação de contêineres no Brasil nos últimos anos. No total da movimentação, observou-se um incremento médio de 4,8% ao ano, no período de 2005 a 2008, bastante expressivo quando se considera a evolução média do PIB de 3,9 % ao ano, no mesmo período. E, apesar da crise mundial, esse valor tende a crescer nos próximos anos. Ao mesmo tempo em que cresce a movimentação de contêineres, cresce o número e o porte dos navios porta-contêineres em construção, indicando para um futuro próximo, a construção de navios com capacidade para 10.000 *TEU's* (Ircha, 2001,

Notteboom, 2004). A Figura 1 apresenta a evolução do número destes navios de grande porte no mundo.

Tabela 1: Comparativo da Movimentação de Contêineres no Brasil

Portos	2005	2006	2007	2008
Santos	2.267.921	2.456.927	2.532.900	2.674.975
Itajaí	696.108	607.936	681.868	693.580
Paranaguá	461.844	487.724	595.261	604.690
Rio Grande	675.516	664.126	605.558	582.253
Rio de Janeiro	325.380	399.597	390.022	424.745
Manaus	77.806	79.559	175.934	340.973
Sepetiba	187.402	256.924	227.050	278.612
Total	5.962.292	6.290.253	6.498.432	6.861.160

Fonte: Câmara Brasileira de Contêineres

O crescimento da containerização, aliado aos navios gigantes que estão sendo construídos, tem criado diversos problemas para os portos, como, por exemplo, maiores exigências em terminais e infra-estrutura. Segundo Jeffery (1999), a movimentação acima de 50.000 TEU's por ano num terminal de contêineres já passa a requerer um sistema de informação moderno para gerenciar a operação portuária. Deste modo, alguns fatores adicionais devem ser considerados no momento de se planejar as operações futuras do terminal, como o *layout* do mesmo, incluindo o pátio, os acessos internos, a forma de deslocamento (caminhões, *straddle-carriers*, etc.), os guindastes necessários, e o sistema de *TI* (Tecnologia da Informação), objetivando reduzir ao máximo o tempo de retenção dos navios.

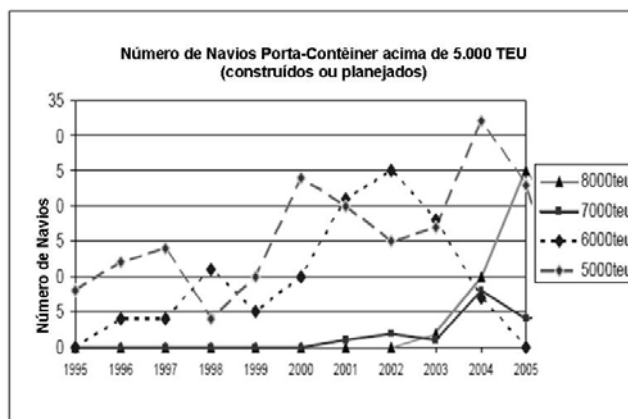


Figura 1: Evolução da construção de navios porta-contêineres. Fonte: Henesey (2004)

Um aspecto importante nessa nova situação é a mudança observada na estrutura institucional, onde as autoridades portuárias têm transferido a gestão direta dos terminais de contêineres a empresas privadas. Com isso, está se alastrando no mundo a instalação de *RFID* (identificação por rádio frequência) nos contêineres, possibilitando a rápida identificação e a redução dos tempos de movimentação e de controle dos mesmos (Kiziltoprak *et al.*, 2007). Tendo em vista o fato de que a massa metálica dos contêineres pode interferir e, até mesmo, bloquear a troca de mensagens por rádio, impedindo a intercomunicação com caixas mais distantes, já se estuda internacionalmente a utilização de *RFID* com dupla frequência, sendo que uma delas apóia a formação de uma rede local que interliga os contêineres dispostos no pátio e no cais (Kim e Younghwan, 2009).

Essa evolução é de difícil concretização em terminais públicos operados pelo governo, pois a operação adequada do terminal dependerá, nessa situação avançada, de uma forte integração com as empresas de navegação. Sem isso, o acesso livre ao porto, com navios contendo contêineres adequadamente equipados, juntamente com outras embarcações levando contêineres convencionais, certamente eliminará ou reduzirá sensivelmente as vantagens do uso dessa nova tecnologia.

No intuito de buscar soluções para esses problemas, alguns trabalhos têm sido realizados para desenvolver sistemas voltados à gestão colaborativa entre os agentes que atuam nos terminais de contêineres (Won e Kim, 2007; Schuldt e Werner, 2007). De fato, o desenvolvimento das tecnologias de *software* tem aumentado a capacidade e o nível de desempenho de muitos portos, muitas vezes contornando a necessidade de grandes investimentos voltados à expansão da infra-estrutura dos terminais, ou à aquisição de equipamentos. Pode-se dizer, assim, que sistemas computacionais modernos no planejamento e na operação portuária, serão fatores determinantes nas tendências futuras de competição entre terminais de contêineres (Huybrechts *et al.*, 2002).

3. REVISÃO DAS APLICAÇÕES DE MODELOS DE FILAS E DE SIMULAÇÃO

Nesta seção serão sucintamente discutidos alguns artigos disponíveis na literatura sobre aplicações de modelos de filas e de simulação voltados à análise de terminais marítimos de contêineres.

O texto de Weille e Ray (1968), publicado sob a forma de *working paper* do Banco Mundial, é um dos primeiros trabalhos sobre teoria de filas aplicados à determinação do número ótimo de berços em portos. Muito embora não trate especificamente de terminais de contêineres, porque na época essa modalidade de transporte ainda não tinha a demanda como nos dias de hoje, os autores discutiram a questão da especialização de terminais e apresentaram desenvolvimentos metodológicos robustos. Taborga (1969), Noritake (1978) e Noritake e Kimura (1983) desenvolveram modelo de filas para determinação do número ótimo de berços num terminal portuário. Apesar de o trabalho não focalizar especificamente terminais de contêineres, os desenvolvimentos apresentados pelos autores, envolvendo as filas $M/M/c$ e $M/E_k/c$, e seus exemplos práticos são de real interesse. Kia e Ghotb (2002) utilizam simulação para avaliar o desempenho operacional de um terminal de contêineres em relação às suas técnicas de manipulação e seu impacto na capacidade da instalação. São investigados e comparados estatisticamente dois diferentes sistemas de operação (o existente e o proposto).

Shabayek e Yeung (2002) aplicaram um modelo de simulação ao terminal de contêineres de Kwai Chung, Hong Kong, pois, segundo os autores, a aplicação de modelo de filas subestima os tempos de espera dos navios e não permite avaliar detalhadamente os efeitos das variáveis no desempenho de um porto. Afirmam que as operações de um terminal portuário são como um emaranhado de filas, sendo geralmente difícil a obtenção de uma boa solução ao problema por meio de modelos matemáticos. Desse modo, os autores optaram em aplicar o *software* de simulação *Witness* em função dos seguintes argumentos: a) pode simular situações em que alguns navios estão compartilhando berços com outros; b) a simulação é flexível e pode se adaptar às situações reais variadas; c) é capaz de representar a realidade através de animação gráfica, o que facilita o melhor entendimento das operações portuárias.

Huang *et al.* (2007) fazem uma comparação entre o uso de modelos de filas e de simulação, aplicados ao planejamento de terminais portuários de contêineres. Mostram que o modelo de filas clássico tende a subestimar os resultados, uma vez que os navios não são classificados por tamanho e comprimento, situação em que se separam os berços por tipo de embarcação. A separação dos berços por porte de navio pode ocorrer em portos com grande movimento, freqüentados por navios convencionais e por navios de grande capacidade, esses últimos exigindo atendimento preferencial. Utilizando-se de dados reais para realizar tal classificação, os autores estudaram dois cenários (com classificação plena e sem classificação), empregando separadamente a simulação e o método analítico tradicional. Seus resultados indicaram que os modelos sem classificação prioritária subestimam os resultados, enquanto a classificação conduz à superestimação desses resultados. As duas situações constituem condições extremas.

Aplicando a simulação, os autores estimaram os tempos médios de espera dos navios para situações intermediárias. Associando o modelo de fila apropriado com a simulação, os autores conseguiram resultados melhores para representação das situações reais. Segundo os autores, a escolha do modelo adequado de filas deve ser baseada na natureza da carga, nas características de chegada dos navios (se é ou não um navio com atendimento preferencial), capacidade de manipulação de contêineres, e nas características do terminal, entre outras. No caso analisado por Huang *et al.* (2007), o modelo de fila adotado é o $M/E_3/c$, mas a escolha do tipo de modelo depende de cada caso específico.

4. MODELOS DE FILAS

Não pretendemos cobrir nesta seção os modelos de filas de forma abrangente, mas tão somente os tópicos de interesse específico à nossa aplicação. Por outro lado, não serão desenvolvidas as fórmulas utilizadas, sendo apenas indicadas as principais referências.

4.1. Modelos clássicos de filas

Dentre os modelos de filas, o mais simples é o $M/M/1$. Neste modelo o tempo entre chegadas sucessivas é regido por uma distribuição exponencial negativa. O tempo de atendimento, por sua vez, segue uma distribuição exponencial (Novaes, 1975; Fogliatti e Mattos, 2007). Admite-se a fila regida pela regra *FIFO* (atendimento na ordem de chegada) e admite-se também que não há desistências nesse processo. Sendo c o número de posições de atendimento em paralelo, λ a taxa de chegada, e μ a taxa de atendimento, a taxa de ocupação ou utilização do sistema é dada por $\rho = \lambda/c\mu$ e deve ser menor do que 1 (um) para que o tamanho da fila, na situação de regime, seja finito. Para esse modelo é relativamente fácil obter fórmulas matemáticas exatas para as principais medidas de desempenho do sistema: tamanho médio da fila L_q ; tempo médio de espera na fila W_q ; tempo médio no sistema W (Page, 1972; Novaes, 1975). Para o modelo $M/M/c$ a relação entre o tempo médio na fila e o tempo médio de atendimento é bastante sensível ao valor adotado de ρ , dado um número de postos c . Novaes (1975) apresenta uma série de curvas que ilustram o comportamento desta relação para diversos valores de c .

Na fila $M/D/c$, o tempo de serviço é constante e também há c múltiplos postos de atendimento. Apesar de aparentemente simples e de ser tratada matematicamente, este modelo apresenta dificuldades intrínsecas no que se refere aos erros de arredondamento (Page, 1972). A fila $D/M/c$, onde o intervalo entre chegadas é constante, é tratada de maneira similar à anterior. Seu tratamento matemático também é difícil, mas algumas relações exatas podem ser

obtidas. Page (1975) traz duas tabelas para vários valores de c para a fila $D/M/c$, com resultados numéricos para o tempo médio de espera e para a probabilidade de um usuário não ter que esperar pelo serviço. Por último, dentre os modelos clássicos, consta a fila $D/D/c$. Por ser um caso muito particular, normalmente não é comentada. Nessa fila, se ρ é controlado de modo que o sistema não se sobrecarregue, não se verificará a formação de filas, ou seja, o tempo de espera é nulo.

Conforme mencionado, a evolução dos navios porta-contêineres tem levado a variações acentuadas no comprimento dos navios (Huang *et al.*, 2007), o que pode ocasionar tipos de esperas não contempladas nos modelos de filas *FIFO* (Fogliatti e Mattos, 2007). Por exemplo, um navio de maior porte pode chegar ao porto e ser obrigado a esperar mesmo havendo um berço vago, porque o espaço disponível no cais é menor do que seu comprimento. Nessas condições, o tempo de espera real é maior do que o valor estimado pela fila clássica, com disciplina *FIFO*. É essa situação que ocorre no *TECON* de Rio Grande, conforme será visto mais adiante.

4.2 Aproximações a partir dos modelos clássicos

Em grande parte das aplicações práticas os quatro modelos clássicos de fila não aderem perfeitamente à realidade, que costuma não respeitar as restrições impostas por esses modelos. Nesse sentido, tais modelos podem ser vistos como casos extremos e servirem como limitantes aos problemas reais (Page, 1972). Uma forma interessante de estimar os tempos médios de espera nas filas é empregar interpolações estabelecidas de forma inteligente, que permitem boas aproximações, evitando, por outro lado, maiores complexidades no tratamento matemático. Uma aproximação bastante eficaz foi desenvolvida por Page (1972). Tendo em vista a larga aplicação da distribuição de Erlang em problemas práticos, Page se apoiou nessa distribuição ao desenvolver o seu método.

Erlang, que foi um dos pioneiros no estudo das filas, desenvolveu a distribuição que leva o seu nome e cuja função densidade de probabilidade é dada por

$$f(t) = \lambda^k t^{k-1} e^{-\lambda t} / (k-1)!, \quad (t \geq 0, \quad k = 1, 2, \dots, \infty) \quad (1)$$

onde t é a variável aleatória, λ é a taxa de chegadas, sendo k a ordem da distribuição (Saaty, 1961; Novaes, 1975). A distribuição de Erlang de ordem k é representada por E_k e pode ser interpretada como sendo equivalente à soma de k variáveis aleatórias regidas por distribuições exponenciais de médias iguais à $E[t]/k$, onde $E[t]$ é o valor esperado de t (Novaes, 1975). Essa distribuição pode ser tratada matematicamente e normalmente é utilizada nas aplicações como aproximações para filas regidas por distribuições genéricas G .

O caso mais geral é a fila $G/G/c$, onde os intervalos entre chegadas e o tempo de atendimento são regidos por uma distribuição genérica qualquer. Mesmo para os casos mais simples, as dificuldades matemáticas para a obtenção de resultados exatos ou, mesmo aproximações satisfatórias para obtenção das medidas de desempenho do sistema, são consideravelmente apreciáveis (Novaes, 1975; Fogliatti e Mattos, 2007). Um caso particular de interesse é a fila $M/G/1$, para a qual a equação de Pollaczek-Khintchine (Novaes, 1975)

$$W_q = \frac{E[T]}{2} \frac{\rho}{1-\rho} [1 + CV^2(T)] \quad (2)$$

pode ser usada para estimar o tempo médio de espera, onde $E[T]$ e $CV(T)$ são a expectância e o coeficiente de variação do tempo de atendimento T (Novaes, 1975). Fogliatti e Mattos (p. 204-206, 2007), por sua vez, apresentam vários resultados aproximados e limites inferiores e superiores para as medidas de desempenho das filas $M/G/c$, $G/M/c$ e $G/G/1$.

Tendo em vista as dificuldades matemáticas para aplicar modelos de filas mais genéricos, e uma vez identificadas as distribuições de interesse passa-se a descrever a aproximação de Page (1972), que permite estimar o tempo médio de espera para a fila $E_k/E_l/c$. Esse autor parte de quatro formulações diferentes, a saber, $M/M/c$, $D/M/c$, $M/D/c$, $D/D/c$, e faz uma interpolação entre elas, usando como parâmetros os coeficientes de variação dos intervalos entre chegadas e os dos tempos de atendimento. Assim, conforme Page (1972, p.81), o tempo de espera é dado aproximadamente por:

$$W_q^{(E_k/E_l/c)} = (1 - v_a)(1 - v_s)W^{(D/D/c)} + (1 - v_a)v_sW^{(D/M/c)} + (1 - v_s)v_aW^{(M/D/c)} + v_av_sW^{(M/M/c)} \quad (3)$$

onde v_a e v_s são os quadrados dos coeficientes de variação dos intervalos entre chegadas e de atendimento respectivamente, dados por

$$v_a = (\sigma_a/E[t_a])^2 \quad \text{e} \quad v_s = (\sigma_s/E[t_s])^2 \quad (4)$$

onde σ e $E[\cdot]$ simbolizam o desvio padrão e a expectância, respectivamente. Na expressão (3), $W^{(fila)}$ exprime o tempo médio de espera na fila indicada entre parênteses. Noutros trabalhos, como Whitt (1983, 1993), se procurou desenvolver expressões aproximadas para o número médio de usuários no sistema para a fila $G/G/c$.

4.3 Aproximações empíricas

Abordando a questão da operação de rebocadores em terminais portuários, Easa (1987) desenvolveu um modelo aproximado para predizer o comportamento do sistema, assumindo que a distribuição dos tempos de serviço nos berços e dos rebocadores segue uma distribuição qualquer. Utilizando um modelo binomial, é apresentada uma aproximação para a fila $G/G/c$, específica para tratar o problema em questão. Sakasegawa (1977), usando os resultados de Page (1972) e contornando as dificuldades inerentes à utilização de tabelas, propôs uma fórmula aproximada para a fila $GI/G/c$. Testes numéricos indicaram boa aderência das equações propostas aos resultados obtidos com métodos analíticos tradicionais.

Já Morrison e Martin (2007) abordaram a questão da fila $G/G/c$ em sistemas de manufatura. Problemas de *job-shop scheduling* e similares envolvem filas de materiais e produtos semi-acabados. Esses autores argumentam que as aproximações existentes para este modelo não refletem apropriadamente a realidade complexa do ambiente de manufatura. Propuseram então uma extensão às aproximações de Sakasegawa (1977), que é bastante utilizada hoje, e que reflete adequadamente a dinâmica de vários sistemas reais de manufatura, sendo dada por

$$E[W] \cong E[t_s] \left(\frac{v_a + v_s}{2} \right) \left(\frac{\rho^{-1+\sqrt{2c+2}}}{c(1-\rho)} \right) \quad (5)$$

onde $E[W]$ é o tempo médio de espera na fila. Nos estudos de filas é comum exprimir o tempo de espera através de uma variável adimensional dada por $E[q] = E[W]/E[t_s]$. Com o intuito de comparar a aproximação de Sakasegawa (1977), melhorada por Morrison e Martin (2007), com a formulação de Page (1972), calculamos os valores de $E[q]$ para a fila $E_2/E_2/c$, variando para isso ρ e c . Os resultados são apresentados na Figura 2.

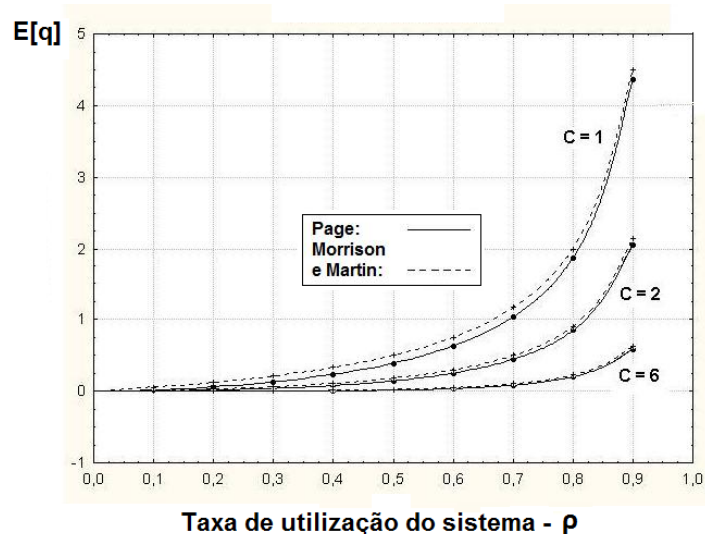


Figura 2: Comparação entre as aproximações de Page e de Morrison & Martin

onde é possível observar a boa aderência da aproximação de Morrison e Martin, de um lado, e a de Page, de outro. Nota-se também que a aderência entre as duas versões melhora para valores de ρ mais próximos da unidade, característica essa positiva para as aplicações, tendo em vista que as situações críticas são exatamente aquelas com níveis de utilização elevados.

5. APLICAÇÃO AO TECON DE RIO GRANDE

O Terminal de Contêineres (Tecon) do Porto de Rio Grande, RS possui um cais de 850 m de comprimento, totalizando 3 berços, com calado de 12,5m (40 pés) e 7 guindastes para carga/descarga de contêineres. Anteriormente, o Tecon possuía um cais para contêineres de 600m de comprimento, tendo sido inaugurada a extensão de 250m em Outubro de 2008. Durante 2008 o Tecon operou um total de 356.142 contêineres, equivalentes a 595.412 TEUs.

A Figura 3 mostra a função de repartição do comprimento dos navios porta-contêineres que operaram no Tecon de Rio Grande no ano de 2008. Há uma grande variedade de embarcações, com forte concentração na faixa de 168 a 280 metros. Navios Panamax e Post-Panamax, com comprimento na faixa de 265-272 metros e calado de 12,5m, são bastante freqüentes. O maior comprimento observado em 2008 foi de 294m. Dos navios porta-contêineres que freqüentaram o Tecon em 2008, 87,3% tinham comprimento na faixa 168-280m (faixa B, Figura 3). Somente 1,3% apresentaram comprimento maior do que 280m (faixa C, Figura 3). Navios pequenos, na faixa 113-168 metros, representaram 11,4% do total (faixa A, Figura 3).

A análise do processo de chegadas dos navios porta-contêineres no Tecon de Rio Grande mostrou que obedece nitidamente um processo de Poisson, como pode ser visto através da Figura 4. O intervalo médio entre chegadas de navios foi de 10,3 horas. Para análise da fila de espera dos navios foi necessário dividir o ano de 2008 em dois períodos, visto que em Outubro foi inaugurada a extensão de 250 m do cais. Para o período de Janeiro a Setembro de 2008 observou-se que o tempo de atendimento dos navios (atracação) obedeceu a uma distribuição de Erlang, com $k=5$, como pode ser observado na Figura 5. Para o período de

Outubro a Dezembro de 2008 observou-se também que o tempo de atendimento dos navios (atracação) obedeceu a uma distribuição Erlang, com $k = 5$, com tempo médio de 15,9 horas.

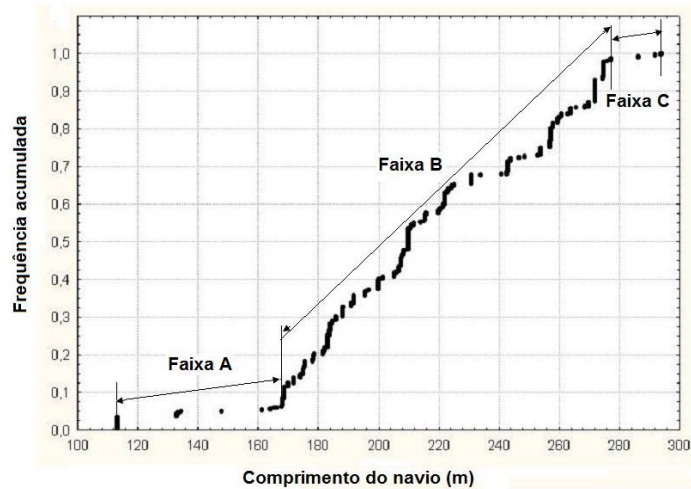


Figura 3: Função de distribuição do comprimento dos navios

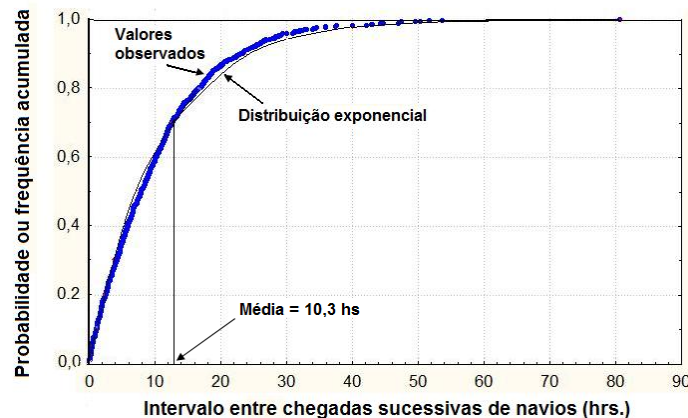


Figura 4: Distribuição do intervalo entre chegadas de navios

A seguir é estimado o tempo médio de espera dos navios até a atracação, para isso utilizando a expressão (5):

(i) Período Janeiro-Setembro de 2008

Nesse período o cais tinha 600m de extensão, correspondente a dois berços ($c = 2$), com intervalo médio entre chegadas $E[t_a] = 6,99$ horas e tempo médio de atendimento $E[t_s] = 13,83$ horas, levando a $\lambda = 1/E[t_a] = 0,1431$ e $\mu = 1/E[t_s] = 0,0723$. Tem-se $\rho = \lambda/c\mu = 0,990$, que é uma taxa de utilização muito alta, levando a tempos de espera bastante elevados. No entanto, o tempo de espera médio na fila observado para esse período foi de 10,14 horas por navio, muito abaixo do cálculo teórico. Ao se olhar a distribuição de comprimentos de navios mostrada na Figura 3, nota-se que é possível atracarem simultaneamente dois navios da faixa A e um da faixa B. Ou seja, nesses casos ter-se-iam 3 berços. A título de ilustração, o tempo de espera foi recalculado para $c = 3$, levando a $\rho = 0,659$ e tempo de espera médio de 3,8 horas, bastante inferior ao valor observado. A conclusão óbvia é que se chega é que, na média, o valor de c está entre 2 e 3, não se podendo utilizar então os modelos de fila que admitem c inteiro.

(ii) Período Outubro-Dezembro de 2008

Repetindo os cálculos para este período, com $c = 3$, obtivemos $\rho = 0,505$ e tempo de espera estimado de 1,84 horas, quando o valor observado foi de 18,1 horas, cerca de 10 vezes maior.

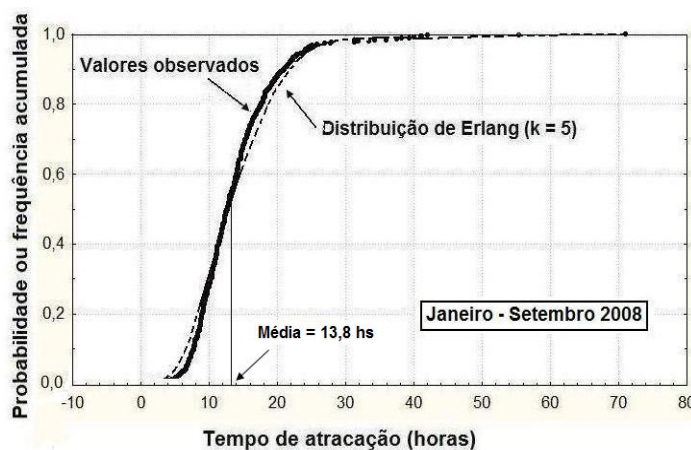


Figura 5: Distribuição do tempo de atendimento (Jan-Set, 2008)

6. ANÁLISE CRÍTICA E CONCLUSÕES

O ajuste da fila $M / E_k / c$ aos dados operacionais do Tecon de Rio Grande está de acordo com o relatado na literatura, especialmente Huang *et al.* (2007), que identificaram uma fila $M / E_3 / c$ para seu estudo de caso. Causa aparente surpresa o fato de se observar um modelo do tipo $M / E_5 / c$ para o Tecon. Isso ocorre porque o terminal de contêineres do porto é escalado por praticamente todas as linhas regulares de navegação que freqüentam a Costa Leste da América do Sul. Como regra geral, todas as linhas escalam todos os portos apenas uma vez por viagem redonda. A única exceção é Santos. O ponto final é, na grande maioria dos casos, Buenos Aires. Na maioria dos casos, Rio Grande é escalado no sentido *northbound*, isto é, depois de o navio ter operado em Buenos Aires e Montevideu. Assim sendo, os navios chegam a Rio Grande sempre muito leves. Em outras palavras, não há descarga ou carregamento em grandes quantidades de contêineres, como ocorre em portos terminais (Rotterdam, por exemplo), ou *hub ports*, cujo fluxo de contêineres por navio varia mais amplamente, justificando um valor menor de k .

Ocorre que as atividades de transbordo de contêineres entre navios (*transshipment*) no Tecon vêm experimentando um crescimento muito acelerado nos últimos anos. Em 1999 somente 629 contêineres foram transferidos entre navios, passando a um total de 33.570 *transshipments* em 2003, e tendendo a aumentar apreciavelmente, tudo fazendo crer que Rio Grande pode se transformar num *hub port* no futuro. Se isso ocorrer, de pouco valerão as informações atuais para dimensionar as condições operacionais futuras do terminal.

Mas o ponto importante a considerar na análise é a não observância da disciplina FIFO no atendimento real dos navios, devido à variação do comprimento dos navios que aportam no Tecon, o que pode ocasionar tipos de esperas não contemplados no modelo de filas. Por exemplo, um navio de maior porte pode chegar ao porto e ser obrigado a esperar mesmo havendo um berço vago, porque o espaço disponível no cais é menor do que seu comprimento. Isso distorce a avaliação através de um modelo de fila clássico, o que leva

muitos pesquisadores a se valerem da simulação (Legatto e Mazza, 2001; Shabayek e Yeung, 2002; Hartmann, 2004; Huang *et al.*, 2007). Mas a simulação requer dados detalhados e de boa qualidade para produzir resultados confiáveis, o que constitui um problema no caso brasileiro. Além disso, é preciso ter uma previsão bem estruturada da evolução da demanda e das alterações na estrutura geral do terminal, envolvendo aspectos tecnológicos, institucionais, de investimento em infra-estrutura, etc.

Tendo em vista todas essas incertezas, nossa conclusão é que o enfoque que se afigura como mais correto é definir cenários bem estruturados para a evolução do terminal, considerando os vários horizontes do projeto. Para cada cenário, buscar portos bem sucedidos no panorama internacional que possam servir de referência (*benchmarking*) para o caso em análise. A partir dessa análise, definir metas para serem cumpridas pelos administradores do porto, inclusive tempo médio de espera dos navios, que hoje deve ser muito baixo. De fato, o Tecon Rio Grande já opera com diversos armadores no regime de *time slot* (janela de atracação), pelo qual é garantida a atracação imediata, e tal medida tende a se alastrar rapidamente, mudando radicalmente o nível de desempenho do porto. Mas, por ser um porto público, continuará sendo freqüentado por navios de menor porte, o que gera conflitos de utilização do cais.

No que se refere à movimentação de contêineres, a forma clássica de avaliação é comparar a “prancha” do terminal, com a de portos de referência. No caso do Tecon a prancha média era de 21 contêineres por hora, por navio, em 2003 e passou para 29 em 2008 (aumento de 38%). Uma meta adequada, com base na prática internacional, seria de, pelo menos, 35 movimentos por hora, e possivelmente níveis mais altos. Os modelos de fila e de simulação podem ser úteis para horizontes de curto prazo, desde que se disponha de dados adequados e consistentes, o que nem sempre é verificado nas aplicações reais. Conclui-se que os modelos de filas e de simulação são úteis para apoiar análises de curto prazo, mas assim mesmo dependendo da disponibilidade de dados adequados e consistentes. No planejamento a longo prazo, tais ferramentas podem ajudar a entender melhor as variáveis do problema e suas inter-relações, mas a análise deve se basear centralmente na avaliação das melhores práticas internacionais presentes e futuras (*benchmarking*), sob pena de se chegar a resultados não confiáveis.

Agradecimento

Esta pesquisa foi apoiada financeiramente pelo CNPq/Fapesc, Projeto 1.0810-00684.0/684 (Pronex) e pela Capes/DFG (Alemanha), Projeto Bragecrim nº 2.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Câmara Brasileira de Contêineres. Movimentação de Contêineres no Brasil. Disponível em <http://www.cbcccontainer.org/cbc/index.php?option=com_content&task=view&id=53&Itemid=104>. Acesso em 15 de maio de 2009.
- Easa, S. M. (1987) Approximation queueing models for analyzing harbor terminal operations. *Transportation Research Part B*, v. 21, n. 4, p. 269-286.
- Günther, H.O.e Kim, K. H. (eds.) (2005) *Container terminals and automated transport systems*. Springer, Berlin.
- Fogliatti, M. C. e N. M. C. Mattos (2007) *Teoria de Filas*. Interciência, Rio de Janeiro.
- Hartmann, S. (2004) Generating scenarios for simulation and optimization of container terminal logistics. *OR Spectrum*, v. 26, p. 171-192.
- Henesey, L. E. (2004) *Enhancing container terminal performance: a multi agent systems approach*. Department of Systems and Software Engineering School of Engineering Blekinge Institute of Technology Karlshamn, Sweden.
- Huang, W. C.; T. C. Kuo e S. C. Wu (2007) A comparison of analytical methods and simulation for container terminal planning. *Journal of Chinese Institute of Industrial Engineers*, v. 24, n. 3, p. 200-209.

- Huybrechts, M.; Meersman, H.; Van De Voorde, E.; Van Hooydonk, E.; Verbeke, A.; Winkelmans. (2002) *Port competitiveness: an economic and legal analysis of the factors determining the competitiveness of seaports*. Editions De Boeck, Antwerp.
- Ircha, M.C. (2001) Serving Tomorrow's Mega-Size Container Ships: The Canadian Solution. *International Journal of Maritime Economics*, v. 3, 2001, p. 318-332
- Jeffery, K. (1999) *Recent Developments in Information Technology for Container Terminals*. Cargo Systems Report. IIR Publications, London.
- Kia, A. e S. F. Ghotb (2002) Investigation of port capacity under a new approach by computer simulation. *Computers & Industrial Engineering*, v. 42, p. 533-540.
- Kim, K.H. e Günther, H.O.(eds.) (2007) *Container terminals and cargo systems*. Springer, Berlin.
- Kim, J. e Y. YOUNGHWAN (2009) Tag-to-Tag Mesh Network Using Dual-Radio RFID for Port Logistics, 2nd *International Conference on Dynamics in Logistics*, Bremen, August 2009.
- Kiziltoprak, T.; R. Schumann; A. Hahn e J. Behrens (2007) Distributed Process Control by Smart Containers. In: Haasis, H.D.; Kreowski, H.J. e Scholz-Reiter, B. (eds.) *Dynamics in Logistics*, p. Berlin, Springer, p. 321-328.
- Kozan, E. (1997) Comparison of analytical and simulation planning models of seaport container terminals. *Transportation Planning and Technology*, v. 20, p. 235-248.
- Legato, P. e R. M. Mazza (2001) Berth planning and resources optimization at a container terminal via discrete event simulation. *European Journal of Operational Research*, v. 133, p. 537-547.
- Morrison, J. R. e D. P. Martin (2007) Practical extensions to cycle time approximations for G/G/m-queue with applications. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, v. 4, p. 523-532.
- Noritake, M. (1978) A study on optimum number of berths in public wharf. *Proceedings of the Japanese Society of Civil Engineers*, v. 278, p. 113-122.
- Noritake, M. e S. Kimura (1983) Optimum number and capacity of seaport berths. *Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering*, v. 109, p. 323-329.
- Notteboom, T.E. (2004) Container shipping and ports: an overview. *Review of Network Economics*, v. 3, n. 2, p. 86-106.
- Novaes, A. G. N. (1975) *Pesquisa operacional e transportes: modelos probabilísticos*. McGraw-Hill do Brasil, São Paulo.
- Page, E. (1972) *Queueing Theory in OR*. Butterworths, London.
- Saaty, T.L. (1961) *Elements of Queueing Theory*, McGraw-Hill, New York.
- Sakasegawa, H. (1977) An approximation formula $L_q \cong \alpha \cdot \rho^\beta / (1 - \rho)$. *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*, part A, v. 29, n. 1, p. 67-75.
- Shabayek, A. A. e W.W. Yeung (2002) A simulation model for the Kwai Chung container terminals in Hong Kong. *European Journal of Operational Research*, v. 140, p. 1-11.
- Shuldt, A. e S. Werner (2007) Towards Autonomous Logistics: Conceptual, Spatial and Temporal Criteria for Container Cooperation, In: Haasis, H.D.; Kreowski, H.J. e Scholz-Reiter, B. (eds.) *Dynamics in Logistics*, Berlin, Springer, p. 313-320.
- Taborga, P.N. (1969) Determination of an optimal policy for seaport growth and development. Research Report R69-43, School of Engineering. Massachusetts Institute of Technology, July, 1969.
- Weille, J. e A. Ray (1968) The optimum number of berths of a port. International bank for reconstruction and development. *Economics Department Working*, paper n. 29.
- Whitt, W. (1983) The queueing network analyzer. *The bell system technical journal*, v. 62, n. 9, 1983.
- Whitt, W. (1993) Approximations for the GI/G/m queue. *Production and Operations Management*, v. 2, n. 2, p. 114-161.
- Won, S.H. e Kim, K.H. (2007) A Framework for Integrating Planning Activities in Container Terminals, In: Haasis, H.D.; Kreowski, H.J. e Scholz-Reiter, B. (eds.) *Dynamics in Logistics*, Springer, Berlin, p. 295-303.

Endereço dos autores:

PPGEP - Universidade Federal de Santa Catarina

88040-900, Florianópolis, SC

Tel.: (48) 3721 7081

e-mail: novaes@deps.ufsc.br, vaninadurski@gmail.com, obbdy@yahoo.com