



Proceedings of the XXVII Iberian Latin American Congress on
Computational Methods in Engineering
September 3 to 6, 2006 - Belém, Pará - BRAZIL.

ASSESSING PERFORMANCE OF CONTAINER TERMINALS: A COLORED PETRI NETS APPROACH

Bruno de Athayde Prata
João Bosco Furtado Arruda
Giovanni Cordeiro Barroso

bruno@glen.ufc.br

barruda@glen.ufc.br

gcb@fisica.ufc.br

Transport Infrastructure and Energy Logistics Research Group - GLEN, Federal University of Ceará, Ceará, Brazil.

Abstract. *This work reports a research which aims to propose a mathematical model, based on Discrete Events Theory, to assess performance of container terminals. Using colored Petri nets, the model has as the principal decision variable the goods transit time in the port area searching for the implications of that variable in the operational fleet size of transportation equipments. The model was applied to the case of the Port of Pecém. In the accomplished surveys, the logic of the system operations was described and data about the transport operational times in the terminal were gathered. Software CPNtools, editor and simulator of colored Petri nets, was used for the implementation, simulation and analysis of the proposed model. Analysis made possible to observe that the model works, in an acceptable way, as a reflection of the reality modeled but also that it requires some adjustments for a real-world better representation. Scenarios were analysed to evaluate the operational efficiency of the studied port in terms of containers flows to and from shipment. As conclusion, one can observe that the colored Petri nets are a feasible and useful technique for modeling, simulation and analysis of port terminal operations, mainly those related to container movements.*

Keywords: *Port logistics, colored Petri nets, port evaluation techniques.*

1. INTRODUÇÃO

O atraso na modernização do sistema portuário tem comprometido o ingente esforço do Brasil para melhorar a competitividade dos seus produtos e conseguir *superávits* em sua balança comercial. Nesta conjuntura, para atingir altos níveis de eficiência operacional, um planejamento rígido das atividades logísticas deve ser realizado nos terminais portuários nacionais, de modo a reduzir ao máximo os custos logísticos e os tempos de permanência das embarcações.

De acordo com Santos e Martins (1998) *apud* Souza (2002), em uma pesquisa realizada pela Confederação Nacional dos Transportes, constatou-se que o Brasil perde cerca de US\$ 5 bilhões anuais decorrentes de todas as ineficiências de seus portos. Deste modo, a avaliação de desempenho mostra-se fundamental para orientar políticas operacionais efetivas em um terminal portuário, e deve prover um diagnóstico dos problemas encontrados na sua operação.

O objetivo deste artigo é reportar a elaboração de um modelo de avaliação de desempenho operacional em pátios portuários, baseado nas redes de Petri coloridas, tendo como principal variável de decisão o tempo total de deslocamento das cargas unitizadas em um porto e suas implicações no tamanho da frota dos equipamentos de transporte utilizados. Este modelo foi aplicado ao caso do Terminal Portuário do Pecém, Ceará.

O artigo está dividido em cinco seções, sendo a primeira esta introdução do trabalho. A segunda seção descreve o estado da arte sobre terminais portuários de cargas unitizadas, com foco na avaliação de desempenho operacional. Na terceira seção, são apresentadas as redes de Petri coloridas. A quarta seção apresenta o modelo de avaliação de desempenho operacional de terminais portuários de carga unitizada baseado em redes de Petri coloridas, assim como delinea e discute os resultados obtidos na análise do modelo e na simulação de cenários. Por fim, na quinta seção, são apresentadas as principais conclusões acerca do trabalho, bem como sugestões e recomendações para estudos futuros.

2. A OPERAÇÃO DE TERMINAIS PORTUÁRIOS DE CARGA UNITIZADA

Conforme o exposto por Yun e Choi (1999), um Sistema Terminal de Contêineres (STC) é composto de três subsistemas: entradas, pátios de contêineres e berços. Os equipamentos de movimentação neste sistema são basicamente portêineres, transtêineres, tratores de terminal, empilhadeiras e carretas.

As tarefas básicas na operação de um STC consistem no recebimento, entrega, carregamento e descarregamento de contêineres. Estas operações ocorrem simultaneamente e interativamente (Yun e Choi, 1999):

- (i) Operação de recebimento: transportar contêineres para exportação, trazidos por caminhões ou trens vindos de fora do porto, até os equipamentos de movimentação vertical;
- (ii) Operação de entrega: erguer contêineres para importação através de equipamentos de movimentação vertical, colocando-os em caminhões ou trens estacionados no pátio de contêineres que levarão as cargas para fora do porto;
- (iii) Operação de carregamento: erguer contêineres para exportação através de equipamentos de movimentação vertical, colocando-os em tratores de terminal localizados no pátio de contêineres e transportando-os até o berço, onde serão embarcados através de equipamentos de embarque e desembarque;

(iv) Operação de descarregamento: descer contêineres para importação do navio, através de equipamentos de embarque e desembarque, colocando-os em tratores de terminal com a finalidade de transportar as cargas até o pátio de contêineres.

A estrutura operacional de um típico STC é ilustrada na Figura 1:

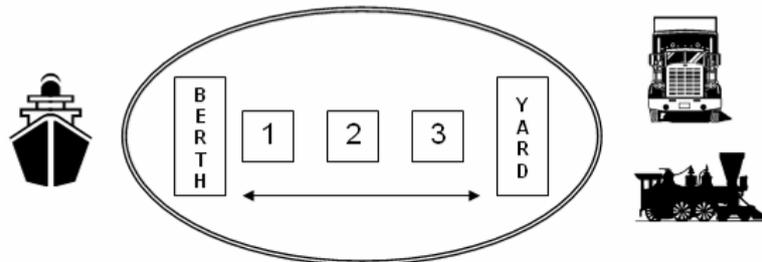


Figura 1 - Estrutura operacional de um típico terminal de contêineres.

Fonte - Prata (2006).

Conforme o apresentado na figura acima, existem três tipos de equipamentos empregados na movimentação de cargas entre o berço e o pátio (ou armazém). São eles:

1 Equipamentos de embarque e desembarque:

Para colocação e retirada de cargas unitizadas nos navios são necessários equipamentos de grande porte como, por exemplo, portêineres, guindastes móveis sobre pneus, guindastes de bordo, dentre outros;

2. Equipamentos de manuseio:

Os equipamentos de embarque e desembarque colocam as cargas unitizadas em veículos que as transportarão para o pátio. Estes veículos podem ser caminhões ou tratores de terminal;

3. Equipamentos de movimentação vertical:

Os caminhões ou tratores de terminal transportam os contêineres até o pátio, onde estas serão armazenadas na forma de pilhas. Para realizar tal armazenagem, são requeridos equipamentos de movimentação vertical ou empilhamento, dentre os quais pode-se citar os transtêineres, as empilhadeiras e os *reach stackers*.

3. REDES DE PETRI COLORIDAS

As redes de Petri são um tipo de grafo bipartido, dirigido e ponderado, que consegue captar a dinâmica de Sistemas a Eventos Discretos (SED). De acordo com Cardoso e Valette (1997), uma rede de Petri ordinária é uma quádrupla $PN = \langle P, T, Pre, post \rangle$, formada por um conjunto finito P de lugares de dimensão n ; um conjunto finito T de transições de dimensão m ; uma aplicação de entrada $Pre: P \times T \rightarrow \mathbb{N}$ e por uma aplicação de saída $Post: P \times T \rightarrow \mathbb{N}$. A cada lugar é associado um número inteiro não-negativo denominado ficha.

Modelos com restrições de tempo podem ser desenvolvidos via redes de Petri, conforme pode se consultar em Berthomieu e Diaz (1991). Sistemas de manufatura, de transportes e de telecomunicações são alguns dos exemplos de aplicação da metodologia em questão.

Uma grande limitação das redes de Petri ordinárias, também denominadas redes lugar-transição, é o fato de que elas demandam uma grande quantidade de lugares e de transições

para representar sistemas complexos (como os *sistemas reais*). Na medida em que a rede se expande, a visão geral do sistema modelado, por parte do analista, começa a ser comprometida, e a análise do sistema modelado, por parte do computador, começa a ser dificultada.

Os sistemas reais, muitas vezes, apresentam processos semelhantes que ocorrem paralelamente ou concorrentemente, diferindo entre si apenas pelos seus insumos e produtos. Nas redes de Petri coloridas, a quantidade de lugares, de transições e de arcos é, geralmente, sensivelmente reduzida pela adição de estruturas de dados às fichas.

De acordo com Jensen (1992), uma representação mais compacta de uma rede de Petri é obtida através da associação de um conjunto de dados (denominados *cores* da ficha) a cada ficha. O conceito de *cor* é análogo ao conceito de *tipo*, comum nas linguagens de programação.

Conforme Desrochers e Al-Jaar (1995), uma rede de Petri colorida é um grafo bipartido dirigido representado por uma quintupla:

$$\text{CPN} = \langle P, T, C, I, O \rangle$$

3.1

em que:

- P é um conjunto finito de lugares de dimensão n ;
- T é um conjunto finito de transições de dimensão m ;
- C são os conjuntos de cores associados com os lugares e com as transições de modo que:

$$C(p_i) = \{a_{i1}, \dots, a_{i u_i}\}, u_i = |C(p_i)|, i = 1, \dots, n.$$

$$C(t_j) = \{b_{j1}, \dots, b_{j v_j}\}, v_j = |C(t_j)|, j = 1, \dots, m.$$

Os símbolos a 's e b 's representam as cores associadas.

- I é uma aplicação de entrada $C(p) \times C(t) \rightarrow \mathbb{N}$ (inteiros não-negativos) correspondendo ao conjunto de cores direcionadas dos arcos de P para T .
- O é uma aplicação de saída $C(t) \times C(p) \rightarrow \mathbb{N}$ (inteiros não-negativos) correspondendo ao conjunto de cores direcionadas dos arcos de T para P .

Note que $O(p, t) = O^T(t, p)$.

A associação de dados às fichas torna o modelo mais compacto, mas, em contrapartida, se paga um preço: a complexidade das funções de precedência. Nas redes de Petri lugar-transição, associam-se aos arcos *Pre* e *Post* valores inteiros, enquanto que, nas redes de Petri coloridas, funções complexas são associadas aos arcos.

4. PROPOSIÇÃO DO MODELO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Apresentação do modelo

A concepção geral do modelo de redes de Petri coloridas, a ser aplicado em qualquer terminal portuário de cargas unitizadas, consiste na definição dos estados, a serem representados por *lugares*, dos eventos, a serem representados por *transições*, e das informações adicionais do modelo, a serem representadas por *cores* (tipos de dados).

(i) Lugares

Devem representar estados tais como: (a) contêineres armazenados no pátio; (b) equipamentos livres para uso, como empilhadeiras, *reach satckers*, *stradle carriers*, transtêineres, guindastes ou portêineres; (c) contêineres sendo movimentados por equipamentos; e (d) contêineres dispostos nas embarcações.

(ii) Transições

Devem representar eventos tais como: (a) ações de movimentação, remoção e transporte de contêineres; e (b) retorno dos equipamentos após cada operação.

(iii) Cores

Devem armazenar informações tais como: (a) identificação dos contêineres; e (b) localização dos contêineres no pátio e nas pilhas de células unitizadas.

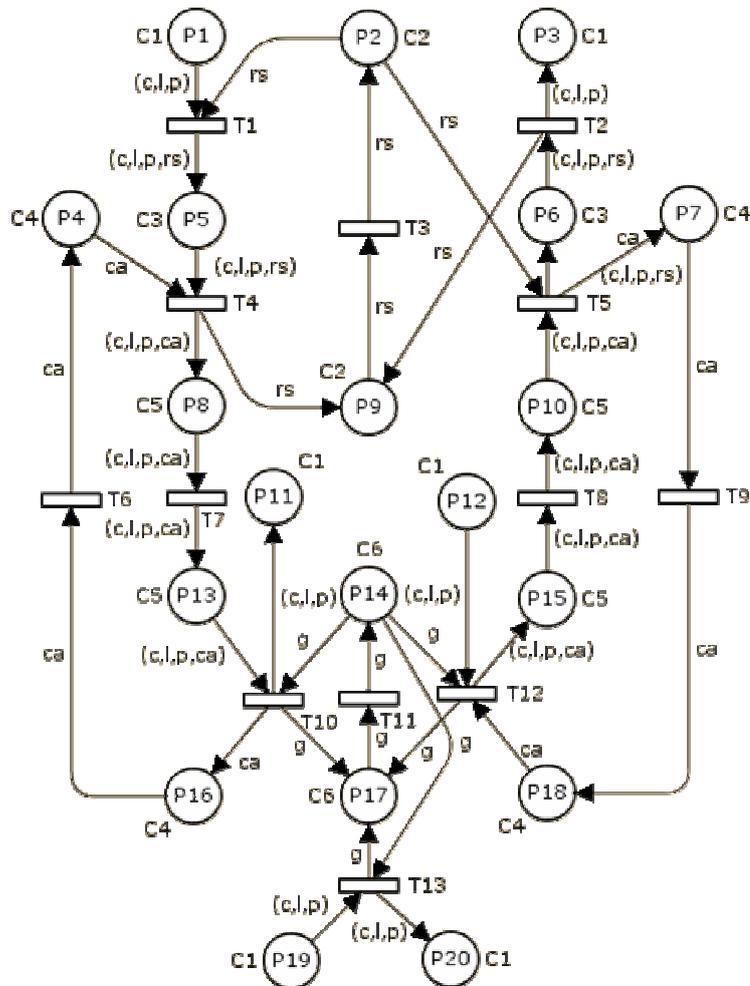


Figura 2 - Operação de contêineres do Terminal Portuário do Pecém modelada por uma rede de Petri colorida.
Fonte - Prata (2006).

Nas Tabelas 1, 2, 3 e 4 são descritos, respectivamente, os lugares, as transições, as cores e as variáveis do modelo proposto.

Tabela 1: Legenda dos lugares da rede apresentada na Figura 2.

Lugar	Descrição
P1	Contêineres, no pátio, a serem embarcados.
P2	<i>Reach stacker</i> disponível para manuseio de contêineres.
P3	Contêineres, no pátio, a serem desembarcados.
P4	Caminhão, no pátio, disponível para transporte de contêineres.
P5	Contêiner a ser embarcado, em trânsito, no <i>reach stacker</i> .
P6	Contêiner a ser desembarcado, em trânsito, no <i>reach stacker</i> .
P7	Caminhão, no pátio, pronto para retornar ao píer.
P8	Contêiner a ser embarcado, em trânsito, no caminhão.
P9	<i>Reach stacker</i> pronto para manobra.
P10	Contêiner a ser desembarcado, em trânsito, no caminhão.
P11	Contêiner embarcado no navio.
P12	Contêiner, no navio, a ser desembarcado.
P13	Caminhão, no píer, carregando contêiner para embarque.
P14	Guindaste disponível.
P15	Caminhão, no píer, carregando contêiner para desembarque.
P16	Caminhão, no píer, pronto para retornar ao pátio.
P17	Guindaste, após carga ou descarga, pronto para manobra.
P18	Caminhão, no píer, pronto para receber contêiner.
P19	Contêiner, no navio, a ser removido.
P20	Contêiner removido.

Tabela 2: Legenda das transições da rede apresentada na Figura 2.

Transição	Descrição	TA (s)	TB (s)
T1	<i>Reach stacker</i> erguendo contêiner.	10	36
T2	<i>Reach stacker</i> colocando contêiner no pátio.	27	92
T3	<i>Reach stacker</i> retornando à posição de manuseio de contêineres.	8	57
T4	<i>Reach stacker</i> colocando contêiner no caminhão.	27	92
T5	<i>Reach stacker</i> retirando contêiner do caminhão.	27	92
T6	Caminhão descarregando transitando do píer para o pátio.	153	181
T7	Caminhão transportando contêiner do pátio para o píer.	143	176
T8	Caminhão transportando contêiner do píer para o pátio.	153	181
T9	Caminhão descarregando transitando do pátio para o píer.	143	176
T10	Guindaste retirando contêiner do caminhão e colocando-o no navio.	179	260
T11	Guindaste retornando à posição de manuseio de contêineres.	0	0
T12	Guindaste retirando contêiner do navio e colocando-o no caminhão.	107	356
T13	Remoção de contêineres.	183	370

Em que: TA – tempo mínimo de disparo da transição; e TB – tempo máximo de disparo da transição.

Tabela 3: Descrição das cores da rede apresentada na Figura 2.

Cor	Descrição
C1	Conjunto de cores relacionado ao contêiner.
C2	Conjunto de cores relacionado ao <i>reach stacker</i> .
C3	Conjunto de cores relacionado ao contêiner em trânsito no <i>reach stacker</i> .
C4	Conjunto de cores relacionado ao caminhão.
C5	Conjunto de cores relacionado contêiner em trânsito no caminhão.
C6	Conjunto de cores relacionado ao guindaste.

Tabela 4: Descrição das variáveis da rede apresentada na Figura 2.

Variável	Tipo	Descrição
c	Inteiro	Identificação do contêiner.
l	Inteiro	Localização do container no pátio ou no navio.
p	Inteiro	Posição do container na pilha do pátio ou do navio.
rs	Inteiro	Identificação do <i>reach stacker</i> .
ca	Inteiro	Identificação do caminhão.
g	Inteiro	Identificação do guindaste.

O modelo foi implementado no *software CPNTools*, ferramenta de domínio público desenvolvida pelo Departamento de Ciência da Computação da Universidade de Aarhus, Dinamarca. Tal modelo objetiva representar a dinâmica operacional da movimentação de contêineres no terminal portuário do Pecém.

A adição de cores busca incrementar a verossimilhança do modelo como instrumento refletor da realidade portuária, pois facilita a diferenciação das cargas e dos equipamentos do terminal supracitado. Os conjuntos de cores associados aos lugares especificam as variáveis que podem ser associadas a cada lugar. Por exemplo, no lugar P12, só podem ser armazenadas as variáveis “c”, “l” e “p”. A seguir, será feita uma descrição de todas as variáveis do modelo.

A variável “c” caracteriza o contêiner. O número associado a essa variável pode ser relacionado com um banco de dados que descreva minuciosamente as peculiaridades mais significativas da célula unitizada como, por exemplo, tipo de carga, dono da carga, data de entrada do contêiner no terminal, data prevista de saída da carga do terminal.

A variável “l” caracteriza a localização do contêiner no pátio. A carga a ser embarcada encontra-se numa quadra do pátio, assim como a carga a ser desembarcada destina-se a uma determinada quadra do pátio. Pode-se associar cada quadra do pátio a um valor inteiro.

A variável “p” caracteriza a posição do contêiner na pilha de armazenagem do pátio. Por exemplo, se $p=1$, o contêiner é o primeiro da pilha.

A variável “rs” caracteriza cada *reach stacker*. O número associado a essa variável pode ser relacionado com um banco de dados que descreva minuciosamente as peculiaridades mais significativas do equipamento como, por exemplo, características, dono e operador do equipamento. A variável “ca” caracteriza cada caminhão e a variável “g” caracteriza o guindaste. Deve-se proceder analogamente ao que foi proposto para a variável “rs”.

Essa diferenciação dos componentes do sistema traz os seguintes benefícios: (a) pode-se avaliar, individualmente, a eficiência de cada equipamento empregado na operação do terminal; e (b) pode-se mensurar o tempo em que cada contêiner foi manuseado.

4.2 Validação do modelo

De acordo com Shannon (1975), a validação é o processo de avaliação, para um nível aceitável de confiança do usuário, se qualquer inferência sobre o sistema, derivada de uma simulação, é correta.

Conforme Moldt e Kordon (2003), modelos e especificações podem ser validados via redes de Petri dos seguintes modos: (a) observação e inspeção das propriedades estáticas da rede, no caso de redes não executadas; (b) simulação e observação, inspeção de cobertura, avaliação de desempenho, julgamento, teste, correção e diagnóstico; (c) animação; e (d) geração e execução de código.

O modelo enfocado foi concebido gradualmente, passando por diversos ajustes até chegar à sua versão final. As visitas de reconhecimento ao Porto do Pecém foram imprescindíveis para esse processo, principalmente no que se refere à adição e remoção de lugares na rede. Os tempos aferidos *in loco* trouxeram uma maior compreensão do processo de passagem de estados do sistema, isto é, das ocorrências de eventos.

Ao longo dos estágios da modelagem foram realizadas diversas simulações, sob a forma de animação, com o intuito de observar o funcionamento do modelo. Essas simulações possibilitaram a detecção de falhas e incoerências no modelo. A seguir, são analisadas as propriedades comportamentais da rede modelada.

(i) Reiniciabilidade

A rede não é reiniciável, pois não existe nenhuma marcação a ser alcançada que permita o retorno à marcação inicial.

A não verificação desta propriedade corrobora com os princípios empregados na modelagem proposta. As fichas representam, em essência, equipamentos e contêineres. Se os contêineres vão sendo removidos da embarcação para o pátio ou vice-versa, não é desejável que o sistema volte ao seu estado inicial. Se isso ocorresse, todos os contêineres retornariam para seus lugares de origem (navio ou pátio), o que seria um absurdo.

(ii) Vivacidade

A rede não é viva, pois no término da operação de embarque e desembarque, o sistema entra em bloqueio.

Como se partiu da premissa de que o sistema pararia de operar a partir do momento que toda carga fosse manuseada, a ausência da vivacidade é coerente com os princípios empregados no processo de modelagem.

(iii) Limitação

A limitação depende da marcação da rede. A verificação da limitação é de suma importância para a constatação da coerência do modelo, pois, a partir da análise dessa propriedade, pode-se avaliar se existe algum erro na rede que está produzindo ou excluindo fichas de modo não condizente com o modelo idealizado. Verificou-se a limitabilidade na rede modelada no software *CPNtools* e viu-se que ela era coerente com as marcações utilizadas.

4.3 Simulação, análise e discussão dos resultados obtidos.

Com base nos dados da operação do navio Urca, que foi atendido no porto do Pecém no dia 12 de janeiro de 2006, foi realizada uma simulação computacional, denominada cenário 1, com o intuito de avaliar o desempenho do sistema. Foram considerados como dados de entrada do cenário inicial: (a) 47 contêineres a serem desembarcados; (b) 31 contêineres a serem embarcados; (c) 2 *reach stackers*; e (d) 10 caminhões.

A operação do Porto do Pecém é de responsabilidade de empresas privadas, não tendo sido possível a obtenção de dados relativos aos planos de embarque e desembarque de contêineres. Deste modo, foram atribuídos valores unitários às variáveis “c”, “l” e “p”, já que estas não afetam na simulação propriamente dita.

Admitiu-se que o tempo de ocorrência dos eventos fosse equivalente à média entre o tempo mínimo e o tempo máximo de disparo das transições. É oportuno lembrar que estes

tempos estão ilustrados na Tabela 2. O sistema real movimentou, em média, treze contêineres por hora, enquanto, no modelo, o porto movimentou, em média, 15,2 contêineres por hora.

O tempo de operação do Urca, na data supracitada, foi de 6 horas, e, em contrapartida, o tempo de operação obtido pelo modelo foi de 5,11 horas. Essa discrepância de 14,8%, entre o tempo real e o tempo simulado, pode ser justificada pelos seguintes fatores: (a) não foram consideradas as operações de retirada e recolocação das tampas dos porões da embarcação; (b) não foi modelada a atividade de movimentação do guindaste; não foram considerados outros tipos de paralisações.

Os tempos de retirada e de recolocação da tampa de um porão do navio, somados, tendem ao valor de três minutos; já o tempo de movimentação do *Mobile Harbor Crane* aproxima-se de oito minutos. Pode-se perceber que as interrupções consomem parcelas significativas do tempo de operação.

O modelo representa uma operação ideal, em que não ocorrem interrupções. A movimentação de contêineres no Terminal Portuário do Pecém não é contínua, devido à ocorrência de paralisações. O modelo, portanto, não representa fielmente a realidade; contudo, a modelagem é válida no sentido de avaliar o desempenho do porto no que se refere à quantidade de contêineres a serem movimentados e às frotas de equipamentos alocadas.

A seguir, apresenta-se um exemplo de como aplicar o modelo proposto na análise de eficiência do terminal, assim como no dimensionamento de frotas.

Por taxa de utilização entende-se a razão entre o tempo em que um recurso passa sendo efetivamente usado e o tempo total de operação do sistema. Na Tabela 5, são ilustradas as taxas de utilização dos equipamentos no cenário 1.

Tabela 5 - Taxas de utilização dos equipamentos empregados para o cenário 1.

Equipamento	Tempo de operação (h)	Taxa de utilização (%)
<i>Reach satcker</i> 1	4,79	88,3
<i>Reach satcker</i> 2	4,78	85,8
Caminhão 1	3,58	61,4
Caminhão 2	4,50	79,1
Caminhão 3	4,70	89,1
Caminhão 4	5,00	82,9
Caminhão 5	4,69	88,7
Caminhão 6	4,89	88,0
Caminhão 7	5,13	95,1
Caminhão 8	5,08	94,7
Caminhão 9	4,84	96,4
Caminhão 10	4,63	79,3
Guindaste 1	5,30	97,0

Com base nas taxas de utilização apresentadas na Tabela 5, pode-se ressaltar que o guindaste é o equipamento que governa a operação do terminal. Esse resultado corrobora com o modelo proposto, pois condiz com a realidade observada nas visitas de campo.

Os caminhões, apesar de apresentarem altas taxas de utilização, possuem, neste cenário, ociosidade acentuada. Na animação do modelo, pode-se perceber que os caminhões passam a maior parte do tempo à espera de atendimento de outros equipamentos do que efetivamente em operação. Essa característica do modelo também condiz com a realidade observada nas visitas de campo. A frota de dez caminhões foi bastante elevada para a operação do Urca, implicando numa operação extremamente ineficiente. Cenários foram simulados reduzindo-se, paulatinamente, o número de caminhões alocados. Na Tabela 6 são ilustrados os resultados destas simulações.

Tabela 6 - Análise de sensibilidade da variável quantidade de caminhões no desempenho do sistema.

Frota de caminhões	Tempo de operação (h)	Variação no tempo de total de operação (%)
10	5,14	0
8	5,14	0
6	5,14	0
4	5,14	0
2	6,83	32,8

Com base nos resultados obtidos pelo modelo, pode-se constatar que uma frota composta por apenas quatro caminhões seria suficiente para a operação analisada, como se depreende do fato de que o tempo total de operação do sistema não varia utilizando-se quatro, seis, oito ou dez caminhões.

6. CONCLUSÕES

Este artigo derivou de uma pesquisa cuja finalidade era o desenvolvimento de um modelo de avaliação de desempenho operacional de terminais portuários de carga unitizada, enfocando as operações de embarque e desembarque de contêineres em navios. A modelagem proposta apresenta diversos aspectos relevantes, dentre os quais podem ser destacados:

- (i) Através da modelagem efetuada obteve-se uma maior compreensão da dinâmica da operação de um terminal portuário de carga unitizada, em que a operação do sistema portuário pôde ser acompanhada a cada instante;
- (ii) A aplicação ao caso do Terminal Portuário do Pecém mostra que o modelo proposto pode ser empregado no dimensionamento e caracterização de frotas de equipamentos de movimentação e transporte, trazendo ganhos à produtividade portuária;
- (iii) O modelo desenvolvido não se restringe à operação de contêineres, podendo também ser empregado na simulação operacional do manuseio de outros tipos de carga unitizada; e
- (iv) A modelagem pode ser aplicada, após ajustes, a qualquer terminal portuário de carga unitizada.

No que diz respeito à aplicabilidade do modelo, podem ser feitos os seguintes comentários. O *software CPNTools* - editor de redes de Petri coloridas, utilizado nesta monografia - possui uma interface orientada a objetos bastante amigável e de manuseio simples para usuários correntes de microcomputadores. Tal fato torna plenamente plausível o emprego do modelo desenvolvido no planejamento da operação de terminais portuários. Para que tal utilização se concretize, basta a realização de um treinamento do corpo técnico do terminal para que este possa realizar, com autonomia, simulações, de modo a subsidiar a tomada de decisão na gestão operacional do porto.

O modelo apresenta algumas limitações intrínsecas ou que decorreram de simplificações no escopo da pesquisa, dentre as quais podem ser ressaltadas:

- (i) Não foram consideradas, no modelo, as atividades de manuseio das tampas dos porões das embarcações, as atividades de preparação dos guindastes nem, tampouco, outros tipos de paralisações;
- (ii) O trabalho restringiu-se a modelar as operações entre o pátio e o píer, relativas ao embarque e desembarque de contêineres. Outros segmentos da atividade portuária, tais como

entrada e saída de cargas no terminal, via ramais rodoviários e ferroviários, inspeções alfandegárias, armazenagem de cargas em depósitos e movimentação de grãos sólidos e líquidos, não foram contemplados;

(iii) Não foi feita uma avaliação econômica dos cenários de operação, fator extremamente importante para a escolha do melhor cenário operacional; e

(iv) O modelo é determinístico, ou seja, as incertezas não são consideradas.

Assim, uma pesquisa complementar ao trabalho reportado seria uma modelagem do Terminal Portuário do Pecém baseada nas redes de Petri estocásticas. O ajuste de funções de densidade de probabilidade às transições poderia gerar um incremento substancial de verossimilhança da realidade modelada. Um maior volume de dados é requerido para uma melhor compreensão da natureza probabilística das operações de um porto.

Também, o conhecimento acerca do processo de chegada de navios é de suma relevância para o cálculo da taxa de ocupação; portanto, pretende-se agregar essa atividade ao modelo desenvolvido nesse trabalho.

Devem ser adicionadas ao modelo as atividades de retirada e recolocação das tampas dos porões das embarcações e de movimentação dos guindastes, assim como de outros tipos de interrupções das atividades de manuseio de contêineres.

Uma definição da composição de custos de operação dos equipamentos do Porto do Pecém é de suma importância para estudos de simulação voltados para a gestão contínua do terminal. Sendo assim, está sendo proposto um estudo que objetive conhecer a composição de custos operacionais do terminal supramencionado.

Finalmente, partindo-se da premissa de que o atual processo operacional no âmbito das cargas unitizadas do Porto do Pecém não é satisfatório, este processo pode ser modificado através de controle. A modificação do comportamento de um sistema pode ser realizada pela restrição do seu funcionamento a um subconjunto do conjunto de eventos passíveis de ocorrência no sistema não controlado. Os conceitos da Teoria do Controle Supervisório (TCS) podem ser aplicados no planejamento e no controle das atividades portuárias, evitando a ocorrência de situações indesejáveis como, por exemplo, acidentes, congestionamentos e elevados tempos de espera.

REFERÊNCIAS

Berthomieu, B., & Diaz, M. (1991), Modeling and Verification of Time Dependent Systems Using Time Petri Nets. In IEEE Transactions on Software Engineering, Vol. 17, n. 3, pp. 259-273.

Cardoso, J., & Valette, R. (1997), *Redes de Petri*. Editora UFSC. Florianópolis.

Desrochers, A.A. e Al-Jaar, R.Y. (1995) *Applications of Petri nets in manufacturing systems*. IEEE Press. United States of America.

Jensen, K. (1992) *Coloured Petri nets: basic concepts, analysis methods and practical use – Volume 1: basic concepts*. Springer-Verlag. Denmark.

Moldt, D. e Kordon, F. (2003) *Systems engineering and validation*. Petri nets for systems engineering – a guide to modeling, verification and applications. Springer-Verlag Press. Germany.

Prata, B.A. (2006), *Avaliação de desempenho operacional de terminais portuários de carga unitizada: uma aplicação das redes de Petri coloridas*. Fortaleza.

Shannon, R. E. (1975) *Systems simulation: the art and science*. Prentice-Hall, New Jersey.

Souza, F.A.F. (2002), *Elaboração de um modelo de localização de cargas unitizadas agroindustriais em pátios portuários: Aplicação ao caso do terminal Portuário do Pecém*. Dissertação de Mestrado. Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza.

Yun, W.Y. e Choi, Y.S. (1999), *A simulation model for container-terminal operation analysis using an object-oriented approach*. *International Journal of Production Economics*, v. 59, pp. 221-230.