

SIMULAÇÃO APLICADA AO DESPACHO DE CONTÊINERES DE IMPORTAÇÃO EM TERMINAIS PORTUÁRIOS

Martin Guillermo Cornejo Sarmiento
martin.cornejo8@gmail.com

Eugenio Kahn Epprecht
eke@puc-rio.br

Fernando Luiz Cyrino Oliveira
cyrino@puc-rio.br

Annibal Theophilo da Silva Rodrigues Junior
annibalrodriguesjr@yahoo.com.br

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC - Rio
Departamento de Engenharia Industrial
Rua Marquês de São Vicente, 225, Gávea, CEP 22451-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

RESUMO

Neste processo, a retirada dos contêineres dos clientes é agendada em uma das seis janelas de tempo (cada formada de seis pilhas de cinco contêineres) de duas horas ao longo do dia, sem a hora exata especificada. São propostas duas disciplinas de filas, assim procura-se determinar a mais adequada para conseguir o despacho eficiente dos contêineres em cada janela programada, no sentido de menor tempo médio de espera e atendimento das carretas. Para tal fim, identificaram-se e avaliaram-se comparativamente os valores dos indicadores de desempenho envolvidos no processo. Os resultados dos indicadores, obtidos por simulação, revelaram a conveniência da disciplina *Shortest Processing Time* (SPT), em comparação com a disciplina *First Come, First Served* (FCFS). Por fim, foi estimada a probabilidade de despacho da totalidade dos contêineres antes ou depois do fim da janela de tempo programada, usando a porcentagem de processos replicados e seus tempos de duração.

PALAVRAS CHAVE. Simulação de eventos discretos, Disciplinas de filas ou atendimento, Empilhamento de contêineres.

Tópicos: SIM – Simulação, L&T – Logística e Transportes.

ABSTRACT

The withdrawal of customers' containers is scheduled in one of the six allowable time windows (containers could be stacked in six stacks five containers high) of two hours throughout the day. The exact time is not specified. The most appropriate queueing discipline (two was proposed) was searched in order to achieve the more efficient delivery of customers' containers every scheduled time windows (less waiting and service times). Therefore, identifying and evaluating comparatively the performance indicators involved into the containers delivery was necessary for this purpose. The outcome indicators obtained through simulation revealed the convenience of using the queueing discipline called *Shortest Processing Time* (SPT), that was compared with *First Come, First Served* (FCFS) discipline. Finally, the probability to achieve the delivery of all customers' containers was estimated (before or after the final of the scheduled time window). This is computed using the percent of replicated processes and their duration.

KEYWORDS. Discrete event simulation. Queueing disciplines. Container stacking.

Paper topics: SIM – Simulation, L&T – Logistics and Transport.

1. Introdução

A introdução e o desenvolvimento do contêiner como meio de unitização e ganho de eficiência na movimentação de cargas trouxe um sério desafio para o planejamento da atividade portuária. A unitização da carga geral por meio de contêineres causou uma verdadeira revolução no transporte de cargas, trazendo redução de custos e diversas facilidades através de maior conforto, segurança e padronização na movimentação da carga. Equipamentos padrão de manuseio também passaram a ser utilizados para a movimentação e estocagem de contêineres, reduzindo custos pela padronização de processos. A introdução de contêineres aumentou, portanto, a produtividade tanto dos terminais quanto dos navios ([Lacerda 2004], [Ludovico 2007], [Lee *et al.* 2008], [Pizzolato *et al.* 2010]).

Os terminais de contêineres representam um elo cada vez mais expressivo na cadeia de suprimentos dos mais diversos setores produtivos. Estatísticas, como a movimentação de contêineres portuários por países entre os anos 2000-2014 [Banco Mundial 2015] e no Brasil entre os anos 2007-2015 [ABRATEC 2015], apontam um crescimento expressivo no mundo e no Brasil, ao longo dos últimos anos, de transporte de cargas em contêineres, justificando a grande quantidade de estudos acadêmicos de logística nestes terminais. Para atender a estes desafios de crescimento, níveis de eficiência operacional e a busca permanente de eventuais folgas de instalação devem ser perseguidos nas operações, através de processos decisórios de caráter diário e um planejamento eficaz de médio e longo prazo ([Van Hee e Wijbrands 1988], [Hartmann 2004], [Moorthy e Teo 2006] [Cordeau *et al.* 2007], [Vacca *et al.* 2007], [Bearzotti *et al.* 2013]).

Decisões operacionais em caráter diário, associadas a uma dinâmica única e complexa, tornam a gestão de terminais de contêineres singular em relação a outros integrantes da logística de armazenagem/movimentação de cargas. Os problemas típicos nos terminais, exaustivamente estudados, e as linhas de pesquisa desenvolvidas para resolvê-los têm sido propostas na literatura, assim, alguns autores apresentam contribuições expressivas sob a forma de *surveys* em gestão de instalações de contêineres ([Steenken *et al.* 2004], [Murty *et al.* 2005], [Günther e Kim 2006], [Crainic and Kim 2007], [Stahlbock; Voß 2008]). O uso de simulação nestes trabalhos citados é uma constante, dados os níveis de incerteza presentes nas operações dos terminais. Um dos processos que contribui para essa complexidade é o de chegadas de carretas para retirada de contêineres de importação. Assim, neste contexto, estão envolvidas decisões relativas às estratégias operacionais, tais como o estabelecimento do melhor layout de pátio, empilhamento de contêineres, geometria e estrutura das pilhas, e movimentação de contêineres, entre outras ([Castilho e Daganzo 1993], [Kim e Kim 1999], [Vis e De Koster 2003], [Dekker *et al.* 2006], [Borgman *et al.* 2010], [Roy e De Koster 2012]). Para fins de gestão e controle de cada um destes processos operacionais, diversos indicadores-chave são utilizados para quantificar o desempenho relativo de cada processo. Murty *et al.* (2005) apresentam uma descrição bastante detalhada de indicadores para cada um dos processos produtivos envolvidos num terminal de contêineres.

O problema de despacho de contêineres baseado em políticas de atendimento e utilizando equipamentos de acesso lateral foi estudado por Rodrigues Junior (2009), mas aplicado ao caso específico de um terminal brasileiro de contêineres. Encontra-se também, na bibliografia pesquisada, o trabalho de Sgouridis e Angelides (2002) relacionado à retirada de contêineres de importação, mas que difere deste artigo por não operar com *reach stackers* e não envolver pré-segregação de contêineres, acessando-os em diversos endereços no pátio via equipamentos de acesso vertical. Kozan e Casey (2007) abordam a otimização, mais complexa, de um modelo de simulação de um terminal multimodal de contêineres (exportação e importação) utilizando equipamentos de acesso vertical e lateral.

Os objetivos do trabalho são dois. Em primeiro lugar, comparar duas disciplinas de sequenciamento do despacho para determinar a que resulta no melhor desempenho, tanto no sentido de tornar menos provável a operação de despacho exceder o limite de tempo da janela, como no sentido de menor tempo médio de espera e atendimento das carretas; e em segundo lugar, estimar a probabilidade de despachar, dentro de uma janela de tempo (sem ultrapassá-la) e

fora dela, a totalidade de contêineres programados para aquela janela, considerando a disciplina de fila mais adequada.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma: a Seção 2 aborda o processo de despacho de contêineres. A Seção 3 apresenta as variáveis e parâmetros do modelo de simulação. A Seção 4 aborda o modelo de simulação deste trabalho. A Seção 5 apresenta a análise de resultados dos indicadores de desempenho. As conclusões gerais desse trabalho são apresentadas na Seção 6.

2. O processo de despacho de contêineres

2.1. Delimitações do ambiente e premissas operacionais

Neste trabalho, o processo estudado utiliza unicamente equipamento de acesso lateral *reach stacker*. Operações com esse equipamento são realizadas, principalmente, em uma grande quantidade de terminais de menor porte por terem a vantagem de serem mais baratos e possuírem maior mobilidade que os equipamentos de acesso vertical. Em contrapartida, apresentam a desvantagem de exigirem maior quantidade de movimentos improdutivos para acesso aos contêineres desejados devido ao acesso lateral às pilhas.

Desconsiderando janelas de tempo na retirada de contêineres de importação, os clientes poderiam pré-agendar a retirada de seus contêineres à medida de sua liberação pelos órgãos aduaneiros. A instalação não imporá limitação de clientes a serem atendidos por faixa de horário (janela de tempo) e a retirada ocasional seria flutuante ao longo do dia, ocasionando má utilização de recursos pelos níveis de utilização flutuantes e imprevisibilidade operacional, em última análise. Vis *et al.* (2005) e Murty *et al.* (2005) abordam o atendimento em janelas de tempo, na entrega de contêineres de exportação ou a retirada de contêineres de importação, destacando que o pré-agendamento em intervalos de tempo favorece o planejamento operacional nos terminais, e que regras de decisão simples e “*online*” para registrar estes agendamentos devem ser desenvolvidas, com fins de minimizar os tempos de espera das carretas e a congestão nas vias. Assim, neste trabalho, procura-se avaliar os impactos do uso de janelas de tempo no processo aqui estudado.

A seguir, são definidas as políticas operacionais do processo estudado, incluídas as características operacionais dos equipamentos *reach stackers*. Estabelece-se que:

a) o cliente importador pré-agenda a retirada de seus contêineres antecipadamente, com prazo-limite até o dia anterior ao da retirada efetiva prevista, dentre diversas janelas de tempo predeterminadas (seis intervalos de tempo de duas horas cada, segundo a Figura 1);

b) deverão ser segregados, na noite anterior à da entrega programada em área específica, os contêineres a serem entregues nas diversas janelas de tempo do dia seguinte;

c) em cada janela de tempo podem ser agendados no máximo 30 contêineres, em seis pilhas, com cinco contêineres cada;

d) a carreta deverá chegar à instalação antes do término da janela de tempo de duas horas na qual esteja previamente agendada e deverá ser garantido o seu atendimento dentro dessa janela de tempo;

e) o acesso às pilhas será realizado pelos dois lados, de forma a que se possa obter o melhor desempenho do *reach stacker*;

f) em uma das extremidades da área alocada ao empilhamento dos contêineres será disponibilizada uma área *buffer*, compatível com a área correspondente à de uma janela de tempo (capaz de abrigar até trinta contêineres), para a movimentação de contêineres não desejados. Em busca de eficiência, esta área *buffer* será móvel, acompanhando a janela ativa, ocupando o lugar da última janela recém-atendida, conforme ilustrado na Figura 1; e

(g) destina-se apenas um equipamento *reach stacker* para a operação. Esse equipamento possui capacidade para trasladar apenas um contêiner e empilhá-lo na (ou retirá-lo da) pilha alocada no lado extremo direito ou esquerdo da estrutura de contêineres (acesso lateral).

O modelo formulado considera que a retirada de um contêiner específico de uma estrutura (conjunto de pilhas de contêineres de uma determinada zona, que pode ser de uma área da janela de tempo ou de sua área *buffer* contígua) exige que todos os contêineres anteriores e os superiores a este sejam retirados (contêineres indesejados). Nenhuma pilha deverá ser criada até que a anterior esteja plenamente ocupada, isto é, preenchida até a quinta altura. Devem-se movimentar e empilhar os contêineres indesejados (movimentos improdutivos) do lado da estrutura (direita ou esquerda) onde se encontra o contêiner desejado (área da janela de tempo ou área *buffer*) para o mesmo lado correspondente da estrutura de transferência (área *buffer* ou área da janela de tempo, respectivamente), a menos que tal lado já esteja cheio. Assim, tem-se o mínimo deslocamento do *reach stacker* (veja a Figura 1).

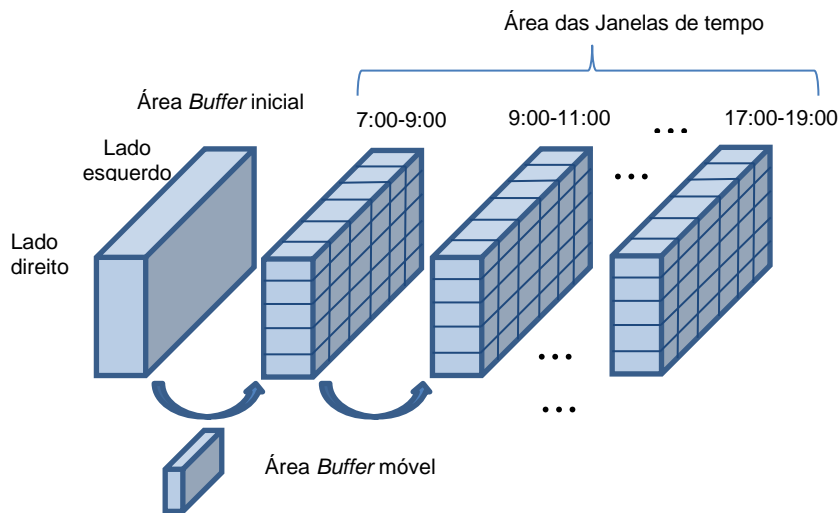


Figura 1. Estrutura de contêineres das seis janelas de tempo e a área *buffer*

2.2. Disciplinas de filas ou atendimento consideradas

O tempo requerido para acessar e despachar determinado contêiner (tempo de atendimento) é proporcional ao número de movimentações necessárias, isto é, o número de contêineres que precisam ser deslocados para se chegar a ele. Considerando isso, analisamos aqui o desempenho do processo de atendimento de acordo com duas disciplinas de fila: *Shortest Processing Time* (SPT) e *First Come, First Served* (FCFS).

No processo estudado, a disciplina do mínimo tempo de processamento (SPT) traduz-se em atender primeiro a carreta (dentre as que já tiverem chegado) cujo respectivo contêiner requiera o menor número de movimentações.

3. Variáveis e parâmetros do modelo de simulação

3.1. Processo de chegada

No caso da variável que representa a taxa de chegadas, a suposição mais usual é que as chegadas dos clientes sejam geradas ao longo do tempo de acordo com um processo de Poisson. No trabalho de Campos (2012), especificamente relacionado à Teoria de Filas no acesso rodoviário aos terminais para a entrega de contêineres, foi considerada a distribuição Poisson baseada em testes de aderência de dados coletados em um terminal portuário no Brasil. No entanto, no processo aqui estudado, a suposição de chegadas segundo um processo de Poisson não é válida, pelo fato de que há um número fixo de carretas (trinta) alocadas em janelas de tempo e, assim, os eventos de chegadas em cada uma das janelas de tempo não são independentes.

Adotamos, então, dois modelos de chegadas, que, embora envolvam algumas suposições que só possam ser consideradas corretas em aproximação, representam cenários extremos em termos da distribuição das chegadas no tempo. Um deles é considerar que os instantes das chegadas sigam uma distribuição uniforme dentro da janela de tempo. Representando o início da janela de tempo como $t = 0$ e o seu término como $t = 120$ (em minutos), o instante de chegada de cada carreta é uma variável aleatória $T (T \sim U[0,120])$.

O outro cenário considera que as chegadas se concentrem mais no início da janela e, dado que os motoristas das carretas têm independência entre si, desconhecendo o deslocamento dos demais, supõe-se que as chegadas se distribuam aproximadamente segundo um processo de Poisson; apenas, a taxa de chegadas deve ser tal que a probabilidade de que a 30ª chegada ocorra em $T > 120$ (ou equivalentemente a probabilidade de não chegarem as 30 carretas antes do fim da janela de 120 minutos) seja muito pequena. As diferenças em relação a um processo de Poisson são: após a 30ª chegada, nenhuma outra carreta chega; o processo se interrompe, os tempos entre as chegadas, porém, seguem uma distribuição exponencial, de acordo com um processo de Poisson; e, caso o número de chegadas até $T = 120$ seja inferior a 30, a corrida é descartada. Isso, porém só deverá ocorrer com probabilidade muito pequena, de modo que o número de corridas descartadas é muito pequeno, e as estimativas obtidas não diferirão muito das que seriam obtidas a partir de um processo de Poisson (em que todas as chegadas não estariam restritas para acontecer dentro das duas horas de janela). Para escolher o valor do parâmetro (λ) desta distribuição considerada Poisson, ou seu recíproco, o valor esperado do tempo entre chegadas das carretas (clientes), na Tabela 1 é mostrada a relação entre quatro possíveis valores ($1/\lambda = \{4; 3,5; 3; 2,5\}$ minutos/ chegada) e a probabilidade de não chegarem as 30 carretas antes do fim da janela de 120 minutos. Assim, adotou-se $1/\lambda = 2,5$ minutos/ chegada (opção 4) por gerar uma probabilidade menor que 1%.

Tabela 1. Relação entre a média do tempo entre chegadas (suposição distribuição exponencial) e a probabilidade de não chegarem as 30 carretas antes do fim da janela de 120 minutos

X: Número de clientes que chegam antes do fim da janela de 120 minutos ~ Poisson (λt^*)			Opções			
X = {0, 1, 2, 3, ...}			1	2	3	4
Parâmetros	Unidade	Distribuição da variável				
Média do tempo entre chegadas dos clientes ($1/\lambda$)	minutos/chegada	Exponencial (λ)	4,0	3,5	3,0	2,5
Média da chegada dos clientes (λ , em 1 minuto)	chegadas/minuto	Poisson (λ)	0,25	0,29	0,33	0,4
Janela de chegada dos clientes (t^*)	Minutos	-	120	120	120	120
Média da chegada dos clientes (em uma janela (t^*))	chegadas/janela	Poisson (λt^*)	30	34,29	40	48
Probabilidade que X seja menor que 30 ($P(X < 30)$)	Porcentagem	-	47,57%	20,95%	4,32%	0,22%

3.2. Tempo de movimentação

O tempo do atendimento, neste caso estudado, dependerá basicamente do tempo de movimentação dos contêineres, utilizando um único atendente (um único equipamento *reach stacker*) no despacho aos clientes. O tempo de movimentação de um contêiner corresponderá à sua retirada de uma pilha e colocação sobre uma carreta (movimentação produtiva da área de janela de tempo ou área *buffer* para carga na carreta) ou à sua retirada de uma pilha e colocação sobre outra pilha (movimentação improdutiva da área de janela de tempo para a área *buffer*, ou vice-versa).

Rodrigues Junior (2009) estimou que o tempo de movimentação de um contêiner (tempo de um movimento produtivo ou improdutivo) é normalmente distribuído, com média de 2,5 minutos e desvio-padrão de 0,1667 minutos. Esses valores foram levantados pelo autor citado através de entrevista realizada com a Área de Operações da uma instalação portuária no Brasil, e serão os valores que utilizaremos neste trabalho.

4. Modelo de simulação

A chegada de carretas e a movimentação de contêineres foram simuladas, tendo sido desenvolvido um programa em *Matlab*, específico para este fim. Foi suposta uma demanda, máxima disponível, de 30 contêineres a serem retirados por janela de tempo. Esse programa tem as seguintes funções principais:

a) o embaralhamento (*shuffling*) das carretas, quanto à ordem de chegadas, que deve ser aleatória;

b) o embaralhamento dos contêineres e sua disposição aleatória nas seis pilhas de cinco contêineres cada;

c) toda a movimentação lógica da estrutura de pilhas, simulando a operação do *reach stacker*, o que requer avaliar no caso da disciplina FCFS os movimentos necessários para retirar os contêineres correspondentes às carretas na mesma ordem de chegada dessas. No caso da disciplina SPT, seleciona-se o contêiner que represente menor movimentação dentre as correspondentes carretas tidas na fila. Nesta parte precisa-se de:

c1) geração aleatória dos tempos de chegada das carretas dos clientes, garantindo que as chegadas dos 30 clientes estejam dentro do intervalo de tempo definido para cada janela. Foram estabelecidas duas suposições em relação a esta variável (ver Seção 3.1): o instante de chegada dos clientes terá uma distribuição uniforme ($U[0,120]$) ou o tempo entre chegadas dos clientes terá uma distribuição exponencial com valor esperado de 2,5 minutos/cliente;

c2) geração aleatória dos tempos de movimentação de cada contêiner, incluindo tantos os movimentos não produtivos (para liberar acesso ao contêiner desejado) como o movimento produtivo do contêiner desejado. Segundo dados históricos, mencionados na Seção 3.2, esta variável terá uma distribuição normal ($N(2,5; 0,1667)$).

Para melhor entendimento, examinamos um exemplo da operação de montagem/desmontagem de pilhas. O exemplo corresponde à disciplina FCFS. A Figura 2 apresenta a estrutura inicial de pilhas, numa determinada janela de tempo, e a estrutura final junto com sua área *buffer* correspondente após dois atendimentos de contêineres. Observa-se a chegada da primeira carreta, numerada e identificada como 22, cujo contêiner correspondente está presente em uma área de janela de tempo (Janela Original), na posição (altura 4, pilha 3). Visualiza-se que, pelo lado direito são necessárias dezessete movimentações para obtê-lo, enquanto pelo esquerdo são necessárias apenas doze. Escolhe-se então o acesso pelo lado esquerdo porque proporciona a movimentação mínima, desfazendo-se a Janela Original e montando-se os onze contêineres não desejados na Área *Buffer* 1 em ordem inversa ao do desmonte efetuado, ficando assim com as seguintes estruturas Janela Modificada 1 e Área *Buffer* 1. A segunda chegada corresponde à carreta numerada 27. O correspondente contêiner localiza-se na Área *Buffer* 1 (altura 1, pilha 3). Seleciona-se o lado direito com quatro movimentações improdutivas (contêineres numerados 10, 24, 11 e 3) e a produtiva (contêiner numerado 27). Observe-se que o lado direito da Janela Modificada 1 para o qual se deve transferir os contêineres indesejados encontra-se cheio. Assim sendo, transferem-se estes, excepcionalmente, para o lado esquerdo desta. Finalmente, a Janela Modificada 2 e a Área *Buffer* 2 representam a migração total de contêineres após os dois acessos (contêineres numerados 22 e 27). Assim, a sequência de atendimento continua até completar os 30 contêineres despachados.

4.1. Indicadores de desempenho considerados

a) o **Tempo excedente a 120 minutos (Te)**. Variável-chave, que indicará se a janela estipulada de duas horas é suficiente para garantir o atendimento às trinta carretas. É determinado pela diferença entre o instante de término de atendimento do último cliente e o limite da janela de 120 minutos;

b) o **Tempo de chegada total**. Intervalo de tempo entre o instante de início da janela até o instante da chegada do último cliente (carreta);

c) a **Quantidade de clientes cujo tempo de espera em fila (E) varia em faixas de 30**

minutos. Indica a distribuição dos 30 clientes de cada janela segundo seus tempos de espera em fila (E) em cinco faixas de 30 minutos ($E \leq 30$; $30 < E \leq 60$; até $E > 120$). Esta seria uma informação complementar ao **Tempo médio de espera em fila por carreta** e **Tamanho médio da fila**;

d) a **Quantidade média de movimentações para acessar um contêiner** e o **Tempo médio de atendimento por carreta** (sem incluir o tempo de espera em fila);

e) a **Quantidade de clientes cujo instante de fim de atendimento ultrapassa o fim da janela de tempo**, isto é, o número de clientes que foram atendidos após 120 minutos da janela, e finalmente; e

f) o **Tempo de ociosidade total do equipamento**, que considera os tempos vagos por janela do equipamento *reach stacker* no início de cada janela, entre clientes atendidos e quando o processo seja encerrado antes de completar as janelas de duas horas.

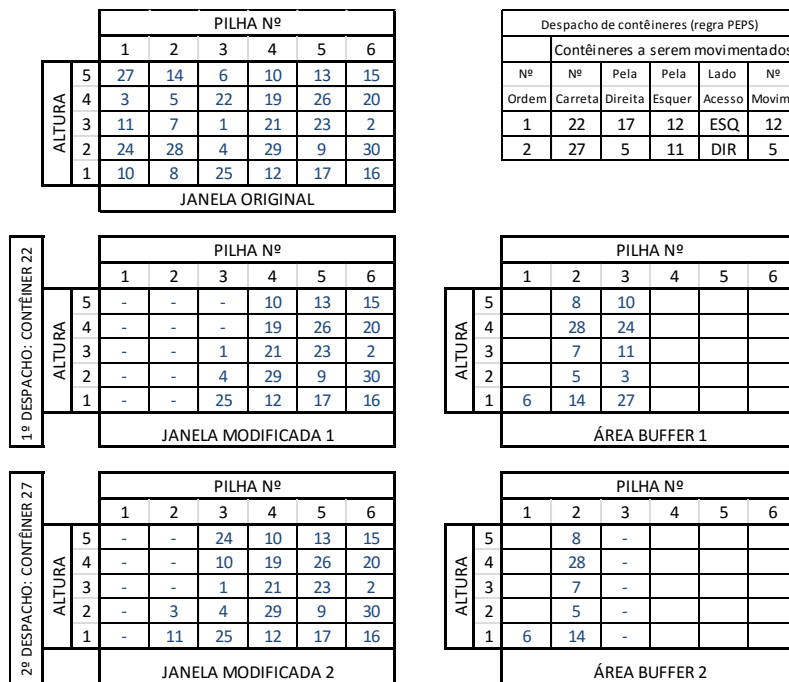


Figura 2. Lógica da movimentação da estrutura de pilhas – disciplina FCFS (exemplo para os dois primeiros despachos)

5. Análise de resultados

Utilizaram-se 500 replicações (uma replicação é um processo de atendimento a 30 clientes de uma janela), isso faz com que, pelo Teorema Central do Limite, a estimativa do valor médio de qualquer dos indicadores de desempenho considerados tenha precisão menor que 10% do seu desvio-padrão com 95% de confiança.

Na simulação executada, considerando dois cenários propostos, procura-se comparar e determinar qual é a disciplina de atendimento que melhor atende o objetivo de conseguir o despacho eficiente da totalidade dos contêineres programados por janela. São considerados os cenários A e B descritos na Tabela 2, eles são diferentes em relação à hipótese da distribuição de probabilidade das chegadas no tempo que foi explicada na Seção 3.1. Em cada cenário são analisadas as disciplinas de atendimento SPT e FCFS. Os parâmetros e as distribuições das variáveis de simulação foram definidos na Seção 3.

No intuito de encontrar uma comparação mais efetiva dos cenários avaliados na simulação executada nesta seção, utilizou-se, a mesma ordem de chegadas das carretas (clientes) e a mesma disposição inicial da estrutura de contêineres das 500 janelas de tempo replicadas, isto é, os dois conjuntos de números aleatórios gerados no programa de simulação, especificados

como (a) e (b) na Seção 4, foram os mesmos nos cenários e suas alternativas avaliadas. Entretanto, os dois conjuntos dos valores das variáveis do modelo de simulação gerados aleatoriamente, especificados como (c1) e (c2) na Seção 4, foram diferentes.

Tabela 2. Descrição de cenários da simulação executada

Características	Unidade de medida	Cenários Propostos			
		A		B	
Disciplina de atendimento	-	SPT	FCFS	SPT	FCFS
Tempo entre chegadas* ou Instante de chegada**	minutos/chegada* ou minutos**	Exponencial (λ)*		Uniforme [0, 120]**	
Média		2,5	2,5	60	60
Tempo de movimentação		Normal ($N(\mu, \sigma)$)			
Distribuição	minutos/contêiner				
Média (μ)		2,5	2,5	2,5	2,5
Desvio-padrão (σ)		0,1667	0,1667	0,1667	0,1667
Janela de trabalho (despacho)	minutos	120	120	120	120
Janela de chegada de clientes	minutos	120	120	120	120

A Tabela 3 apresenta os resultados dos indicadores correspondentes à simulação executada. Observa-se que, avaliando de forma global os indicadores, a disciplina de atendimento SPT apresenta, em ambos os cenários, um desempenho bastante superior ao FCFS. Por exemplo, em relação ao cenário B, na disciplina SPT cerca de 28 dos clientes (93%), em média, esperariam em fila para ser atendidos no máximo uma hora, enquanto na disciplina FCFS aproximadamente 8 clientes (26,9%) esperariam no máximo uma hora. A Figura 3 mostra a comparação dessa porcentagem média de carretas atendidas e de seus tempos de espera em fila (E), em faixas de 30 minutos, para ambos os cenários. Complementando esse indicador, ainda comparando as disciplinas SPT e FCFS no cenário B, em média, tem-se: o Tempo médio de espera em fila/carreta de 21,6 e 89,0 minutos; e, o Tempo médio de atendimento/carreta de 4,2 e 8,0 minutos, respectivamente. Desta forma, evidenciou-se o melhor desempenho da disciplina SPT relativo ao nível de serviço e satisfação dos clientes associados ao tempo de espera em fila e ao tempo de atendimento.

Tabela 3. Resultados dos indicadores de desempenho da simulação executada: comparação das disciplinas SPT e FCFS nos cenários A e B

Cenários		A				B			
Tempo entre chegadas* ou instante de chegadas**		Exponencial ($1/\lambda = 2,5$)*				Uniforme [0, 120]**			
Disciplina de atendimento		SPT		FCFS		SPT		FCFS	
Indicadores de desempenho/Média (\bar{x}) e Desvio-padrão (s)		\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s
Quantidade de clientes	Tamanho médio da fila	8,3	1,8	11,4	1,0	5,0	1,1	9,7	1,2
	Tempo de espera em fila (E) \leq 30 min	17,9	3,7	2,8	1,4	22,2	2,7	3,3	1,9
	30 min < Tempo de espera em fila (E) \leq 60 min	8,7	3,1	3,7	1,9	5,7	2,4	4,8	2,9
	60 min < Tempo de espera em fila (E) \leq 90 min	3,2	1,9	4,3	2,5	1,7	1,3	6,2	3,9
	90 min < Tempo de espera em fila (E) \leq 120 min	0,3	0,5	5,3	2,8	0,4	0,6	7,7	4,8
	Tempo de espera em fila (E) > 120 min	0,0	0,0	13,9	5,5	0,0	0,1	8,0	7,1
Tempo (minutos)	Fim de atendimento ultrapassa o fim da janela	0,2	0,9	20,3	2,5	4,8	2,5	20,5	2,5
	Tempo médio de espera em fila/carreta	28,7	5,7	108,4	20,5	21,6	4,6	89,0	19,8
	Tempo médio de atendimento/carreta	3,6	0,2	8,0	0,9	4,2	0,2	8,0	0,9
	Tempo de chegada total	74,8	13,2	75,4	13,5	116,1	3,4	116,3	3,8
	Tempo de ociosidade total	13,6	6,7	2,7	2,7	4,3	3,9	4,1	4,0
	Tempo excedente a 120 minutos (Te)	-10,6	7,8	122,9	28,0	10,7	6,4	124,3	28,3
Quantidade média de movimentações/contêiner		1,4	0,1	3,2	0,4	1,7	0,1	3,2	0,4

Da mesma forma, confirmando a superioridade da disciplina SPT, a Figura 4 mostra a comparação da porcentagem de processos replicados e de seus tempos de duração, utilizando o Tempo excedente a 120 minutos (Te), em faixas de 30 minutos, correspondente às disciplinas SPT e FCFS nos dois cenários A e B. Por exemplo, no caso do cenário A, a porcentagem de processos replicados que completam o atendimento às 30 carretas antes do fim da janela de tempo de duas horas ($Te \leq 0$) é de 92,2% no caso da disciplina SPT e apenas 0,2% na disciplina

FCFS. A porcentagem de processos com durações no máximo 180 minutos ($T_e \leq 60$) é de 100,0% na disciplina SPT e apenas 1,0% na disciplina FCFS.

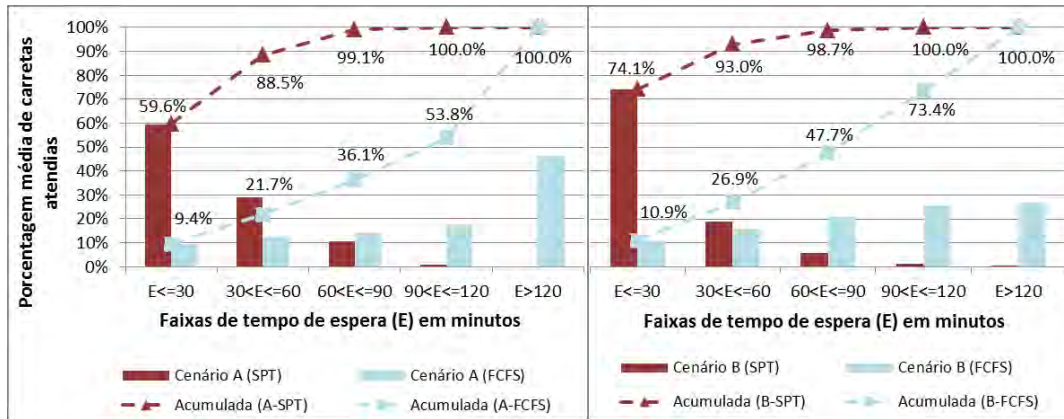


Figura 3. Comparação da porcentagem média de carretas atendidas e de seus tempos de espera em fila (E), em faixas de 30 minutos, segundo as disciplinas SPT e FCFS (cenários A e B)

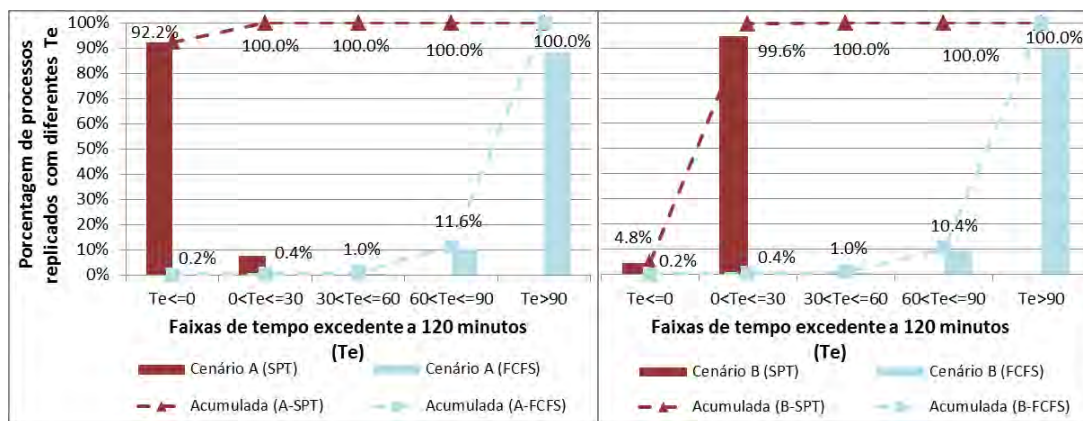


Figura 4. Comparação da porcentagem de processos replicados e de seus tempos de duração (tempos excedente a 120 minutos (T_e), em faixas de 30 minutos) segundo as disciplinas SPT e FCFS (cenários A e B)

O melhor desempenho da disciplina SPT em comparação com a disciplina FCFS, em ambos cenários, torna-se notório também nos outros valores das variáveis apresentadas na Tabela 3. Assim, mantendo o foco no processo regido pela disciplina SPT e na variável Tempo excedente a 120 minutos (T_e), que efetivamente importa para a avaliação da factibilidade de despachar os 30 contêineres dentro de cada janela de tempo programada, note-se que a janela não é ultrapassada no cenário A, em média, por -10,6 (o processo encerra, em média, 10,6 minutos antes de completar a janela de tempo de duas horas) com desvio-padrão de 7,8 minutos, e é ultrapassada no cenário B, em média, por 10,7 minutos com desvio-padrão de 6,4 minutos. Adicionalmente, a Tabela 4 mostra a porcentagem dos processos replicados segundo seus tempos de duração, em faixas de cinco minutos de T_e , nos cenários A e B. Os valores de T_e estão representados nos gráficos da Figura 5. A decisão de sugerir condições ou restrições adicionais poderia considerar as probabilidades de ultrapassar o limite de duas horas. Essas probabilidades de atendimento antes ou depois do fim da janela de tempo podem ser estimadas utilizando as porcentagens acumuladas mostradas na Tabela 4. Por exemplo, a estimativa da probabilidade de atendimento às 30 carretas antes do fim da janela ($T_e \leq 0$) é de 0,922 e 0,048, e a estimativa da probabilidade de que a duração do processo seja menor ou igual a 130 minutos ($T_e \leq 10$) é de 0,986 e 0,460 para os cenários A e B respectivamente.

Tabela 4. Porcentagem de processos replicados e seus tempos de duração (em faixas de 5 minutos de T_e (tempo excedente a 120 minutos)) com disciplina SPT nos cenários A e B

Te: Tempo excedente à janela (T_e = tempo de duração do processo -120), em minutos						
Cenários	Cenário A (SPT)			Cenário B (SPT)		
Chegadas no tempo	Exponencial ($1/\lambda = 2,5$)			Uniforme [0, 120]		
Faixas de horário de T_e	Quantidade de processos	Porcentagem de processos	Porcentagem acumulada de processos	Quantidade de processos	Porcentagem de processos	Porcentagem acumulada de processos
$T_e \leq 0$	461	92,2%	92,2%	24	4,8%	4,8%
$0 < T_e \leq 5$	24	4,8%	97,0%	63	12,6%	17,4%
$5 < T_e \leq 10$	8	1,6%	98,6%	143	28,6%	46,0%
$10 < T_e \leq 15$	5	1,0%	99,6%	157	31,4%	77,4%
$15 < T_e \leq 20$	2	0,4%	100%	68	13,6%	91,0%
$T_e > 20$	0	0,0%	100%	45	9,0%	100%
Total (replicações)	500	100%		500	100%	

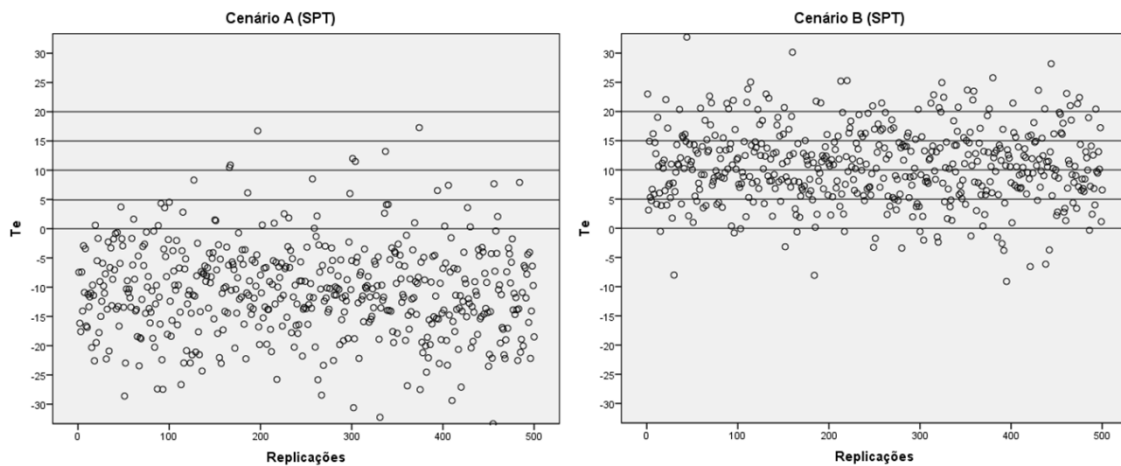


Figura 5. Comparação dos tempos de duração dos processos replicados (tempo excedente a 120 minutos, T_e) com disciplina SPT nos cenários A e B

6. Conclusão

A simulação é utilizada como ferramenta de análise do processo devido à sua natureza dinâmica e aleatória, uma vez que a operação em estudo, por exemplo, envolve a movimentação de pilhas de contêineres (formadas aleatoriamente) e chegada das carretas com ordenamento aleatório.

O possível efeito negativo do aumento do tempo de espera gerado pelo reordenamento de atendimentos nas filas, independente da ordem de chegada, produzida pela disciplina SPT em relação ao FCFS, é mais do que compensado pela redução drástica das movimentações improdutivas na disciplina SPT, de forma que, pelo contrário, o que se observa é uma redução dos tempos médios de espera em fila e de atendimento dos clientes, além de valores dos outros indicadores de desempenho consideravelmente mais promissórios. Com a disciplina SPT torna-se muito menos provável que a operação de despacho exceda o limite de duas horas da janela de tempo. Esta significativa superioridade é razão suficiente para que no processo estudado seja preferida a disciplina de atendimento SPT, e nas suas perspectivas de atingir os objetivos de atendimento.

Mesmo que o indicador Tempo excedente a 120 minutos (T_e) correspondente à disciplina SPT, em média, apresente valor negativo no cenário A da simulação executada, nenhum dos cenários consegue garantir o atendimento da totalidade dos clientes por janela, tendo 92,2% e 4,8% dos processos replicados que acabaram antes do fim das janelas programadas. As duas hipóteses consideradas, pela incerteza das chegadas, representam cenários extremos em

termos da distribuição das chegadas no tempo. Por um lado, com resultados dos indicadores de desempenho mais favoráveis, a hipótese de que as chegadas se distribuam aproximadamente segundo um processo de Poisson; e por outro lado, a hipótese de que os instantes das chegadas sigam uma distribuição uniforme dentro da janela de chegada. Em vista disso, uma proposta poderia ser considerar uma folga de minutos entre as janelas de tempo, de tal forma que nesse tempo, as últimas carretas que cheguem sejam atendidas dentro da janela definida de 120 minutos. Por exemplo, caso esta folga seja de 30 minutos, deve-se estabelecer janelas de 90 minutos para as chegadas dos clientes (carretas), mas de 120 minutos para o trabalho de despacho como foi definida nas premissas operacionais. Assim, na primeira janela de trabalho de 7:00-9:00 horas, os clientes poderão chegar entre as 7:00-8:30 horas; na próxima janela de trabalho de 9:00-11:00 horas, os clientes poderão chegar entre as 9:00-10:30 horas, e assim por diante.

As operações com *reach stackers* são realizadas em uma grande quantidade de terminais de menor porte, e pretende-se, com pesquisas deste tipo, que sua ineficiência relativa frente aos equipamentos de acesso vertical de maior custo, possa ser, de certa forma, compensada com um ganho de produtividade pela modelagem e adoção de processos mais eficientes. Assim, a aplicabilidade deste trabalho é ampla, em termos de instalações passíveis de utilizá-lo. As instalações, com processos similares ao descrito aqui, devem avaliar se os ganhos com sua implantação justificam os custos de controle associados à disciplina SPT, por envolver decisões a cada acesso pela formação de fila.

Agradecimentos

À CAPES pelo apoio financeiro recebido.

Referências

- ABRATEC (Associação Brasileira dos Terminais de Contêineres de Uso Público). Estatísticas: movimentação de contêineres. Disponível em: <<http://www.abratec-terminais.org.br/estatisticas>>. Acesso em 07 de Maio de 2016.
- Banco Mundial (*The World Bank*). *Data: Container port traffic (TEU: 20 foot equivalent units)*. Disponível em: <<http://data.worldbank.org/indicator/IS.SHP.GOOD.TU/countries>>. Acesso em 07 de Maio de 2016.
- Bearzotti, L.; Gonzalez, R. e Miranda, P. The event management problem in a container terminal. *Journal of applied research and technology*, v. 11, n. 1, p. 95-102, 2013
- Borgman, B.; Van Asperen, E. e Dekker, R. Online rules for container stacking. *OR spectrum*, v. 32, n. 3, p. 687-716, 2010.
- Campos, G. L. O uso da teoria das filas no acesso rodoviário aos terminais de contêiner. 2012. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-graduação em Engenharia da Produção do Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.
- Castilho, B. D. e Daganzo, C. F. Handling strategies for import containers at marine terminals. *Transportation Research-B*, v. 27B, n. 2, p. 151-166, 1993.
- Cordeau, J. F.; Gaudioso, M.; Laporte, G. e Moccia, L. The service allocation problem at the Gioia Tauro maritime terminal. *European Journal of Operational Research*, v. 176, n. 2, p. 1167–1184, 2007.
- Crainic, T.G. e Kim, K.H. Intermodal Transportation. *Transportation, Handbooks in Operations Research and Management Science*. C. Barnhart and G. Laporte (Eds.), North-Holland, Amsterdam, p. 467-537, 2007.
- Dekker, R.; Voogd, P. e Van Asperen, E. Advanced methods for container stacking. *OR Spectrum*, v. 28, n. 4, p. 563–586, 2006.

- Günther, H. O e Kim, K. H. Container terminals and terminal operations. *OR Spectrum*, v. 28, n. 4, p. 437–445, 2006.
- Hartmann, S. Generating scenarios for simulation and optimization of container terminal logistics. *OR Spectrum*, v. 26, n. 2, p. 171-192, 2004.
- Kim, K. H. e Kim, H. B. Segregating space allocation models for container inventories in port container terminals. *International Journal of Production Economics*, v. 59, n. 1, p. 415–423, 1999.
- Kozan, E. e Casey, B. Alternative algorithms for the optimization of a simulation model of a multimodal container terminal. *The Journal of the Operational Research Society*, v. 58, n. 9, p. 1203-1213, 2007.
- Lacerda, S. M. Navegação e portos no transporte de contêineres. *Revista do BNDES*, v. 11, n. 22, p. 215-243, 2004.
- Lee, S. W.; Song, D. W. e Ducruet, C. A tale of Asia's world ports: the spatial evolution in global hub port cities. *Geoforum*, v. 39, n. 1, p. 372-385, 2008.
- Ludovico, N. Logística internacional: um enfoque em comercio exterior. São Paulo: Saraiva, 2007.
- Moorthy, R. e Teo, C. P. Berth management in container terminal: the template design problem. *OR Spectrum*, v. 28, n. 4, p. 495–518, 2006.
- Murty, K. G.; Liu, J.; Wan, Y. W. e Linn, R. A decision support system for operations in a container terminal. *Decision Support Systems*, v. 39, n. 3, p. 309-332, 2005.
- Pizzolato, N. D.; Scavarda, L. F. e Paiva, R. Zonas de influência portuárias – *hinterlands*: conceituação e metodologias para sua delimitação. *Gestão & Produção*, v. 17, n. 3, p. 553-566, 2010.
- Rodrigues Junior, A. T. da S. Um modelo de simulação para a saída de contêineres de importação de terminal portuário com janelas de tempo. 2009. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-graduação em Engenharia da Produção do Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.
- Roy, D. e De Koster, R. Optimal Design of Container Terminal Layout. In *Proceedings of International Material Handling Research Colloquium*, 2012.
- Sgouridis, S. P. e Angelides, D. C. Simulation-based analysis of handling inbound containers in a terminal. *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*, p. 1716-1724, 2002.
- Stahlbock, R. e Voß, S. Operations research at container terminals: a literature update. *OR Spectrum*, v. 30, n. 1, p. 1-52, 2008.
- Steenken, D.; Voß, S. e Stahlbock, R. Container terminal operation and operations research – a classification and literature review. *OR Spectrum*, v. 26, n. 1, p. 3-49, 2004.
- Vacca, I.; Bierlaire, M. e Salani, M. Optimization at Container Terminals: Status, Trends and Perspectives. *7^o Swiss Transport Research Conference*, 2007.
- Van Hee, K. M. e Wijbrands, R. J. Decision support system for container terminal planning. *European Journal of Operational Research*, v. 34, n. 3, p. 262-272, 1988.
- Vis, I. F. A. e De Koster, R. Transshipment of containers at a container terminal: an overview. *European Journal of Operational Research*, v. 147, n. 1, p. 1-16, 2003.
- Vis, I. F. A.; De Koster, R. B. M. e Savelsbergh, M. W. P. Minimum vehicle fleet size under time-window constraints at a container terminal. *Transportation Science*, v. 39, n. 2, May 2005, p. 249-260, 2005.