

Emprego da Técnica de Simulação Probabilística para Estudo de Redes Fechadas de Fila no Transporte Fluvial

K.Yaguiu
M.H. de Castilho
Prof. Dr. M.A. Brinati*
Prof. Dr. R.C. Botter*

Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brazil
mabrinat@usp.br, rcbotter@usp.br

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo central complementar o estudo de redes fechadas de filas em transporte fluvial por meio do desenvolvimento de modelos de simulação capazes de representar o sistema, de forma mais realística e generalizada. Foram examinados dois tipos de embarcações, a saber: embarcações autopropelidas e comboios de empurra (com opção para desmembramento do comboio nos terminais, permitindo a liberação do empurrador). Para cada tipo de configuração, utilizaram-se duas distribuições de probabilidades, a distribuição exponencial e a Erlang, tanto para os tempos médios de viagem como para os tempos de atendimento no porto. Por meio de comparação dos resultados dos modelos de simulação com os resultados do modelo analítico (analítico-numérico) para as duas configurações, quando se adota distribuição exponencial, e para a primeira configuração quando admitida a distribuição Erlang, pode-se comprovar a validade do modelo de simulação. Deve-se ressaltar que, ao contrário de outras técnicas da Pesquisa Operacional, tanto a Simulação de Sistemas como a Teoria de Filas não determinam uma solução ótima, fornecem apenas os resultados pertinentes a uma dada instância. Por isso a Simulação de Sistemas é considerada uma ferramenta de auxílio à tomada de decisão, e não uma ferramenta de otimização. Por fim, realizou-se um estudo de caso econômico-operacional, no qual foi tratado o transporte de grãos na Hidrovia Tietê-Paraná, entre os terminais de São Simão (GO) e Pederneiras (SP). Como é um estudo preliminar, algumas simplificações foram adotadas, tais como a inclusão do tempo em eclusas no tempo de viagem entre portos. São apresentados os resultados do estudo e sua comparação com os fretes praticados na hidrovia.

INTRODUÇÃO

O transporte fluvial no Brasil cresceu 5,5% entre 1998 e 2000. Em 1998, foram transportadas 20,9 milhões de toneladas, quantidade que passou para 22,06 milhões no ano passado. As hidrovias dos rios Paraguai e Tietê-Paraná movimentam grande volume de cargas. No ano passado, passaram 1,9 milhões de toneladas de cargas pelo rio Paraguai e 1,5 milhões de toneladas pelo sistema Tietê-Paraná.

De acordo com o Departamento Hidroviário, a carga a granel, densa e de grande volume, é mais apropriada para a hidrovia do que para o caminhão. Um comboio de barcas chega a transportar o equivalente a 200 carretas, contribuindo também para descongestionar as estradas.

Dados da Daq indicam que são transportadas pelas hidrovias cerca de 23 milhões de toneladas/ano, com uma distância média de transporte de 1.350 Km, 6.260.000 t/a de minérios e 3.900.000 t de grãos a granel.

Na via rodoviária, os custos de frete são elevados, a frota é antiga, as rodovias mal conservadas geram maiores custos de manutenção da frota, os pontos de fronteira congestionados criam filas de espera que levam dias. A via ferroviária é descontínua. Os portos marítimos têm altos custos de movimentação de contêineres, taxas excessivas, greves, assaltos a navios.

Para assegurar custos reduzidos de transporte, a hidrovia necessita de portos ou terminais eficientes. Basicamente, estes terminais contêm berços de atracação, equipamentos de transferência de cargas, instalações para armazenagem (armazéns, silos e tanques), pátio de manobras para veículos da interface terrestre e instalações administrativas.

A frota fluvial pode ser formada por embarcações autopropelidas ou por comboios de empurra. Estes são constituídos de uma embarcação específica para propulsão, denominada empurrador, e de um conjunto de embarcações destinadas exclusivamente à acomodação de cargas chamadas barcas ou chatas.

A princípio, os comboios proporcionam maior flexibilidade operacional aos sistemas de transporte do que embarcações autopropelidas. A escolha entre autopropelidas e diferentes configurações de comboio deve levar em consideração restrições de navegabilidade da hidrovia (profundidade, dimensões de eclusas e canais etc.) e fatores econômicos (volume de carga, custo de empurradores e barcas etc.).

Uma configuração que se observa com freqüência no transporte fluvial é a operação circular de uma frota homogênea entre um pequeno número de portos, muitas vezes privativos. Para aumentar a utilização dos recursos do sistema, é desejável que tanto a frota quanto os terminais operem continuamente (24h / dia).

Quando a frota é constituída por comboios, há uma forma alternativa de operação, caracterizada pela substituição das barcas de um empurrador que chega ao porto, por outro conjunto preparado anteriormente. Neste tipo de operação, os portos, não necessariamente todos, devem dispor de conjunto de barcas adicionais. Consegue-se, desta forma, reduzir o tempo de permanência dos empurradores nos portos.

Uma questão importante que se coloca refere-se ao dimensionamento do sistema de transporte com base em uma certa demanda de carga pré-definida. Um enfoque tradicional consiste em calcular o tempo de ciclo ou viagem redonda das embarcações para, a seguir, verificar qual a quantidade de embarcações necessárias para atender a demanda fixada.

Freqüentemente, as características probabilísticas da operação da frota e dos portos são ignoradas. As aleatoriedades destes processos podem provocar a formação de filas de embarcações nos portos. Neste caso, deve-se acrescentar ao tempo de ciclo das embarcações parcelas referentes ao tempo de espera em cada porto. O aumento do tempo médio de ciclo das embarcações resulta na diminuição da quantidade de viagens e, conseqüentemente, na redução da capacidade de transporte da frota considerada.

O objetivo deste trabalho é complementar o estudo de Teoria de Filas através de modelos de simulação. Para isto, serão simulados algumas configurações de sistemas fechados de transporte fluvial de carga. Em seguida, comparar-se-ão alguns índices de desempenho obtidos através do modelo de simulação com os resultados obtidos pelos modelos analíticos encontrados na literatura.

DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O dimensionamento de um sistema hidroviário, considerado isoladamente, consiste, no caso mais geral, em determinar a configuração dos portos e da frota de forma a atender a demanda ao menor custo.

A configuração dos portos tem como variáveis principais a quantidade de berços de atracação (c), as taxas de transferência dos equipamentos de carga/descarga e a capacidade de armazenagem. Em relação à frota, as principais variáveis são a quantidade, N , o tempo de viagem redonda, t_{vr} , a velocidade de serviço, V_S , e a capacidade de carga das embarcações, DWT.

Uma importante medida de desempenho é a freqüência de chegada das embarcações aos portos, denominada vazão. Seja λ a vazão, então $\lambda = N/t_{vr}$. Outros indicadores de desempenho podem ser definidos como, por exemplo:

- índice de congestionamento ou índice de utilização dos berços de atracação em cada porto, que equivalem à fração do tempo em que os berços permanecem ocupados;
- extensão dos períodos em que cada porto permanece ocioso (ou ocupado);
- tempo de permanência das embarcações nos portos (tempo de espera e atendimento);
- índice de rotatividade das embarcações, medido pela razão entre o tempo navegando e o tempo de ciclo ou viagem redonda das embarcações (t_{vr}); etc.

Análises semelhantes podem ser feitas para outras situações, como por exemplo, casos onde haja múltiplos berços de atracação por portos, frota de comboios com desmembramento etc.

Modelo Geral para o caso de embarcações autopropelidas (sem desmembramento)

Considere uma rede circular, constituída por M portos, que são percorridos seqüencialmente ($1 \rightarrow 2 \rightarrow \dots \rightarrow M \rightarrow 1$), e uma frota homogênea com N embarcações autopropelidas, operando entre eles. Neste sistema, admite-se que os tempos de deslocamento das embarcações entre os portos, em cada sentido, sejam variáveis aleatórias independentes com mesma distribuição de probabilidades e que não haja restrições em relação à quantidade de embarcações em viagem simultaneamente.

Nos portos, o atendimento das embarcações, que consiste no embarque e desembarque de cargas, é feito em um berço de atracação e consome um certo tempo que apresenta, para cada porto, uma dada distribuição de probabilidades.

Pode haver, em um mesmo porto, mais de um berço de atracação. Neste caso, supõe-se que estes sejam iguais e que operem de forma semelhante e independente. As embarcações são atendidas, em cada porto, pela ordem de chegada e a operação destes portos é considerada contínua ao longo do tempo.

Em decorrência da aleatoriedade dos processos de atendimento e viagem das embarcações, a quantidade de viagens redondas realizadas em um dado intervalo de tempo $(0,t)$ é também uma variável aleatória. Esta variável determina a quantidade de carga transportada pela frota, durante o intervalo de tempo considerado.

Seja $N_{vr}(t)$ a quantidade de viagens redondas completadas no intervalo de tempo $(0,t)$. A contagem das viagens redondas pode ser feita considerando-se, arbitrariamente, uma viagem redonda completada sempre que uma embarcação parte de um dado porto.

Algumas medidas de desempenho, como o tempo médio de permanência das embarcações em cada porto, o tempo médio de viagem redonda das embarcações, o comprimento médio das filas e o índice de

congestionamento dos portos, podem ser, também, utilizadas na análise de desempenho do sistema. Em geral, estas medidas são calculadas, considerando-se o sistema em regime estacionário.

Modelo Geral para o caso de comboios de empurra (com desmembramento)

O problema de transporte em análise é caracterizado por uma rede circular com M portos e uma frota com N empurradores (embarcações propulsoras) e N_b barcaças (embarcações de carga). Por hipótese, tanto o conjunto dos empurradores quanto o conjunto das barcaças são homogêneos, isto é, são formados por veículos idênticos. Admite-se que cada comboio seja formado por um empurrador e um conjunto de n_b barcaças.

Os comboios executam um roteiro circular entre os M portos da rede, transportando uma certa quantidade de carga por viagem redonda. Adotando-se arbitrariamente um dos portos como ponto de partida, numeram-se os portos de 1 a M , iniciando-se pelo porto escolhido, seguindo o roteiro dos comboios. Cada porto i possui c_i berços de atracação semelhantes e independentes ($i = 1, \dots, M$).

Considere-se que cada porto i seja provido de uma quantidade b_i de barcaças adicionais ($b_i = 0, 1, \dots; i = 1, \dots, M$). Suponha-se que, nos portos em que haja barcaças adicionais ($b_i > 0$), ocorra a seguinte forma de operação: a) quando um comboio chega ao porto, ocorre o desmembramento e as n_b barcaças são acrescidas à fila de barcaças a serem atendidas; b_1) se o porto apresenta pelo menos n_b barcaças prontas naquele momento, forma-se um novo comboio com o empurrador que acaba de chegar e as n_b primeiras barcaças, que segue viagem; b_2) caso não haja um número suficiente de barcaças prontas para formar um novo comboio, o empurrador entra em uma fila de empurradores a espera de barcaças, antes de prosseguir viagem. Nos portos em que não há barcaças adicionais ($b_i = 0$), os empurradores devem aguardar o atendimento (preparação) das barcaças dos respectivos comboios.

A distribuição dos tempos de atendimentos das barcaças em cada porto e a distribuição dos tempos de viagem dos comboios entre os portos são conhecidas a priori; os tempos de acoplamento e desacoplamento dos comboios são desprezados frente aos tempos de atendimento das barcaças.

Deseja-se calcular alguns índices de desempenho semelhantes aos citados acima. Em primeiro lugar, analisa-se a variável $N_{vr}(t)$, que representa a quantidade de viagens redondas concluídas em um intervalo de tempo $(0,t)$, conhecida a condição inicial no instante 0. Para efeito de contagem da quantidade de viagens redondas, será considerado que uma viagem redonda (ciclo) se completa sempre que se concluir o atendimento de uma barcaça no porto M . Define-se λ , que representa vazão ou fluxo de embarcações, em regime estacionário, no intervalo $(0,t)$. Além do parâmetro λ , calculam-se os tempos médios de permanência dos empurradores nos portos e os tempos médios de viagem redonda dos comboios. Pode-se calcular, também, um índice de congestionamento dos portos em relação à quantidade de barcaças na fila, em regime estacionário.

FORMULAÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO PARA O SISTEMA HIDROVIÁRIO

Introdução

Dentre as várias técnicas de Pesquisa Operacional, a Simulação de Sistemas, utilizada neste trabalho, ocupa um lugar de destaque devido à sua flexibilidade. Nos últimos anos, a Simulação tem se tornado uma poderosa arma de apoio à tomada de decisão, especialmente devido ao avanço na área de computação que possibilitou o desenvolvimento de modelos mais complexos, e, portanto, mais próximos do sistema real.

Com um modelo de simulação válido, pode-se identificar problemas com o sistema, testar alterações no mesmo antes que elas sejam realmente implementadas, analisar o impacto de decisões conflitantes para descobrir qual oferece melhor resultado, enfim consegue-se prever o comportamento do sistema diante das mais variadas situações.

Apesar da aparente simplicidade da técnica, a Simulação de Sistemas esbarra em alguns problemas críticos, como a formulação de um bom modelo que possibilite inferências válidas sobre o sistema. Outro ponto crítico é a implementação desse modelo através de um software, tarefa enormemente facilitada por linguagens específicas de simulação desenvolvidas nos últimos anos, porém ainda problemática em razão da grande exigência de recursos computacionais. Utilizou-se neste trabalho o software ARENA versão 5.0.

Deve-se ressaltar que, ao contrário de outras técnicas da Pesquisa Operacional, a Simulação de Sistemas não determina uma solução ótima, fornece apenas os resultados pertinentes a uma dada instância. Por isso, a Simulação de Sistemas é considerada uma ferramenta de auxílio à tomada de decisão, e não uma ferramenta de otimização.

Vantagens do uso da Simulação

Devido ao fato de ser facilmente compreendido, um modelo de simulação é freqüentemente mais simples de ser justificado do que alguns modelos analíticos. Além disto um modelo de simulação costuma ter mais credibilidade, uma vez que pode ser comparado com o sistema real, ou porque requer pouca simplificação,

capturando mais as características reais do sistema.

Todos os modelos de simulação são chamados de modelos de entrada e saída, isto é, eles produzem uma saída dada as condições das entradas. Os modelos de simulação não podem gerar por si mesmo uma solução ótima como é o caso dos sistemas analíticos. Eles servem apenas como ferramenta de análise do comportamento do sistema sob uma determinada condição.

Alguns dos benefícios do uso da simulação são listados abaixo:

- a) Sistemas do mundo real com elementos estocásticos podem não ser descrito de forma precisa através de modelos matemáticos que possam ser calculados analiticamente;
- b) novas políticas, procedimentos operacionais, regras de decisão, estruturas organizacionais, fluxos de informação, etc., podem ser explorados sem que provocar distúrbios nos processos em uso;
- c) novos projetos de layout, sistemas de transporte, máquinas e equipamentos, softwares, podem ser testados antes de sua implantação, avaliando assim a necessidade de compra ou modificação;
- d) hipóteses sobre como e por que certos fenômenos ocorrem podem ser testados;
- e) o fator tempo pode ser controlado, isto é, pode ser expandido ou comprimido, permitindo aumentar ou diminuir a velocidade a fim de se estudar um fenômeno;
- f) permite a análise de quais variáveis são significativas para o desempenho do sistema e como estas variáveis se interagem;
- g) gargalos podem ser identificados;
- h) um trabalho de simulação pode ser comprovadamente importante para o entendimento de como o sistema realmente funciona;
- i) novas situações, onde há pouca informação ou conhecimento a respeito, podem ser manipuladas a fim de se prever eventos futuros, isto é, a simulação é uma poderosa ferramenta para responder questões do tipo "o que acontecerá se....."

O Modelo "Formal" de Simulação

É desejável que se possa contar um modelo generalizado, capaz de propiciar uma análise operacional do transporte hidroviário. Para isso, poderiam ser variados: a localização, os tipos e as características dos terminais de carga ao longo da hidrovia, além das principais variáveis deste sistema de transporte, tais como: velocidade dos veículos hidroviários, a capacidade de carga dos mesmos, taxas de transbordo nos terminais, comboios operando com ou sem desmembramento e com duas ou quatro chatas.

No início, tem-se a criação dos comboios de empurra, em função de uma distribuição constante de chegadas. Após a chegada do comboio no terminal podem ocorrer duas situações distintas. A primeira é quando o sistema não opera com desmembramento (Figura 1). Neste caso, o comboio é atracado, e após este evento inicia-se o posicionamento das chatas junto ao ponto de carregamento. O tempo de atendimento é também uma variável que depende da distribuição de probabilidades (taxa de carregamento/descarregamento). Após o processamento de todo comboio, o conjunto é acoplado e o comboio segue viagem.

Caso haja a operação de desmembramento (Figura 2), os empurradores aguardam, em fila, o conjunto de chatas necessárias para a formação do comboio. Enquanto estes aguardam, as chatas são carregadas/descarregadas seguindo o mesmo processo descrito. Esta modalidade existe para avaliar o ganho em reduzir o tempo de ciclo do empurrador face ao aumento do número de chatas na frota.

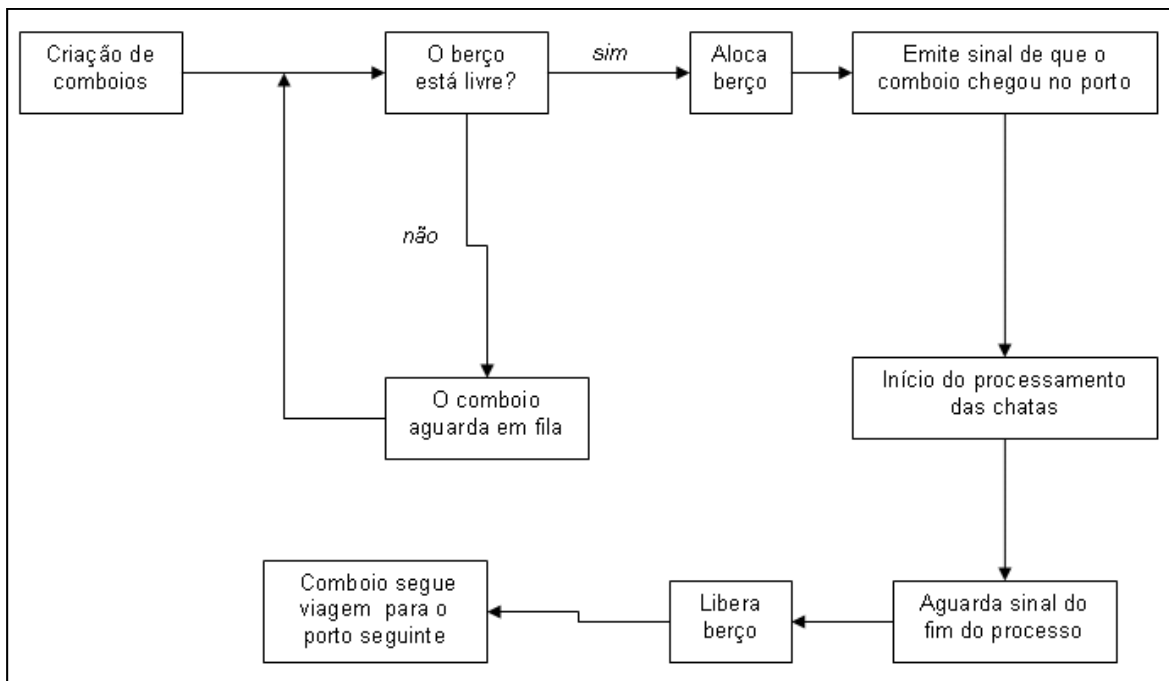


Figura 1 – Modelo de simulação para embarcações autopropelidas (sem desmembramento)

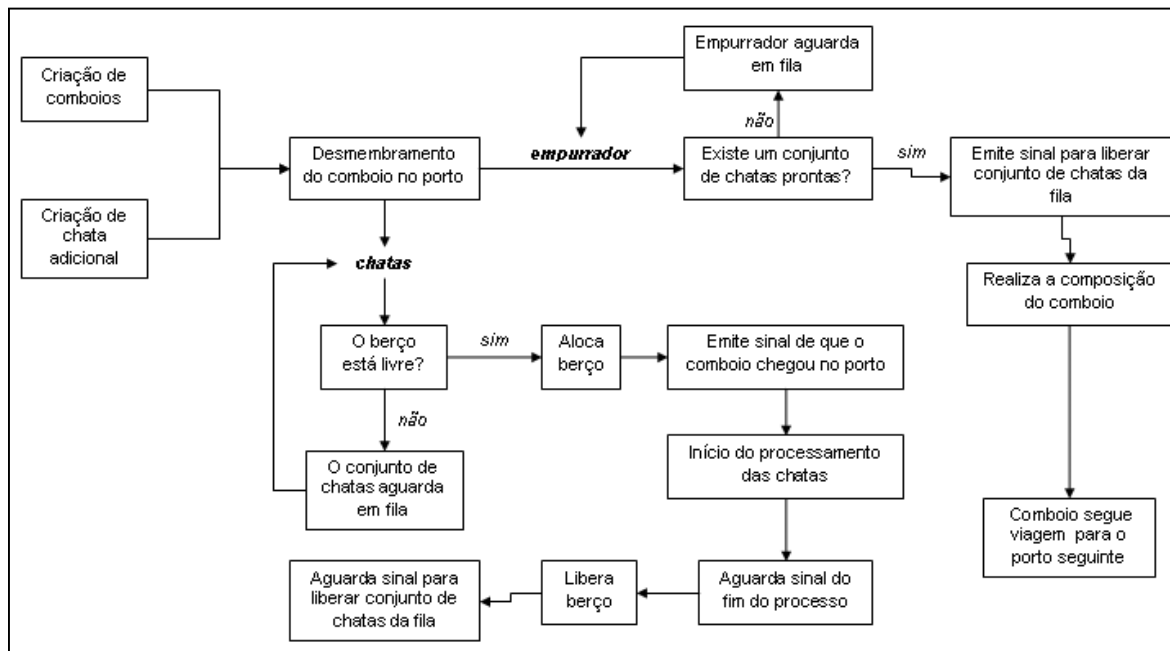


Figura 2 - Modelo de simulação para comboios de empurra (com desmembramento)

RESULTADOS

Para conseguir comprovar a validação do modelo de simulação, compararam-se os resultados obtidos através da simulação com os obtidos por meio de modelos analíticos encontrados na literatura [2]. Isto é identificado nos gráficos pelas linhas cheias (simulação) e pelas linhas tracejadas (modelo analítico).

Além disso, mostrou-se a facilidade de se trabalhar com simulação obtendo resultados para o caso de sistemas de comboios com demembramento e distribuições Erlang para tempo de atendimento nos portos e tempos de viagem entre portos, não realizado analiticamente por gerar grande número de estados tornando o procedimento inviável.

Resultados da análise, em regime estacionário, dos modelos de redes circulares de filas, para

embarcações autopropelidas, com atendimento exponencial

Considere uma rede circular com 2 portos, o porto A e o porto B, onde cada porto apresenta c_A e c_B berços de atracação semelhantes e independentes. As embarcações que chegam aos portos são atendidas pela ordem de chegada e os tempos de atendimento são variáveis aleatórias independentes que apresentam *distribuição exponencial* e médias $1/\mu_A$ e $1/\mu_B$. Sejam os tempos de deslocamentos entre os portos A e B também variáveis aleatórias independentes com *distribuição exponencial* e médias $1/\mu_C$ e $1/\mu_D$, respectivamente, e considere-se a frota constituída de N embarcações semelhantes.

Alteram-se as quantidades de berços de atracação nos portos e mantêm-se os seguintes parâmetros constantes: $1/\mu_A = 1/\mu_B = 1$. A Figura 3 representa a vazão em três situações distintas:

- (a) $c_A = c_B = 1$;
- (b) $c_A = 1$ e $c_B = 2$;
- (c) $c_A = c_B = 2$.

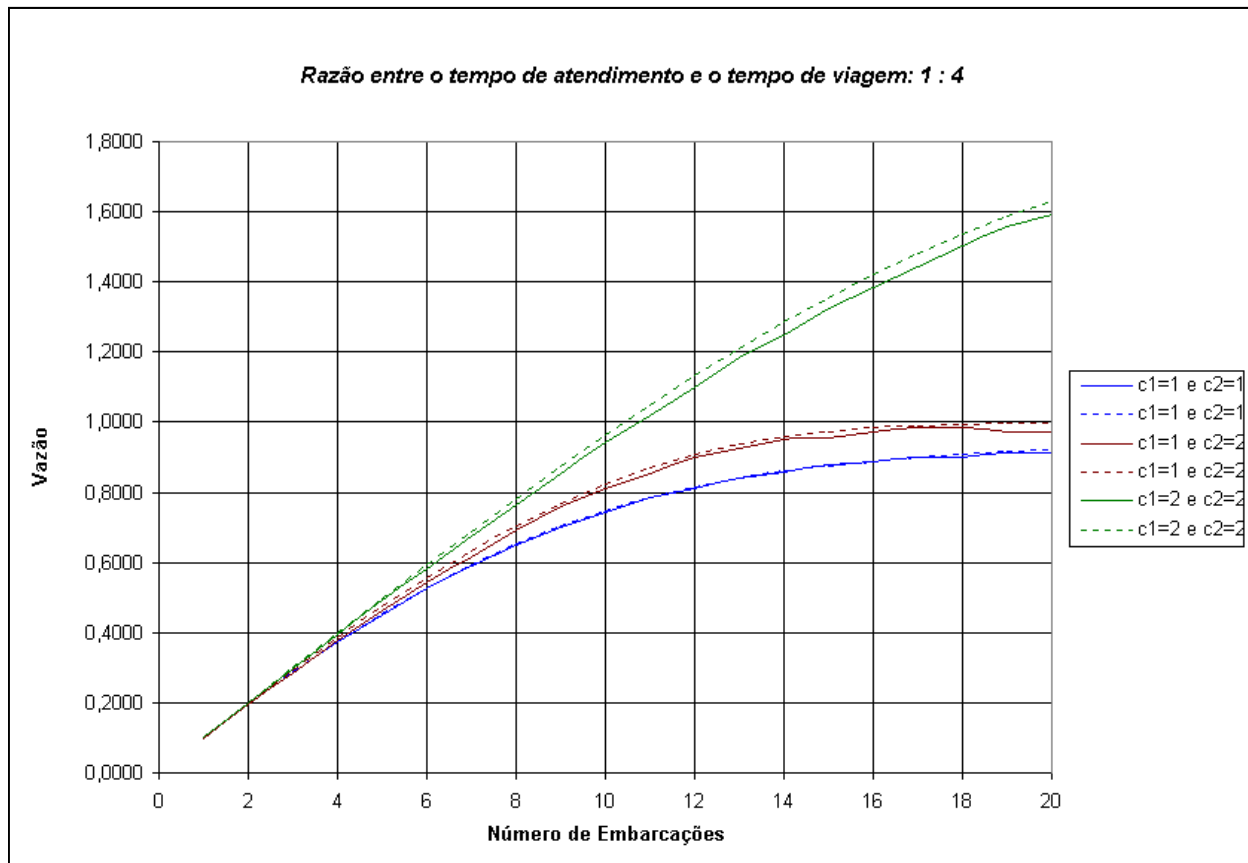


Figura 3 - Vazão em função da quantidade de embarcações, variando a quantidade de berços

Foi adotada a hipótese de que os tempos de atendimento das embarcações, em um dado porto, constituem uma seqüência de variáveis aleatórias independentes com distribuição exponencial. É importante ressaltar que os tempos de atendimento consecutivos não são necessariamente independentes. As condições portuárias têm, em geral, maior influência no tempo de atendimento das embarcações que, especificamente, as aleatoriedades dos processos de transferência de carga.

Redes circulares com distribuições exponenciais e desmembramento dos comboios nos portos

Suponha-se que a frota seja formada por N empurradores e que cada porto apresente 1 berço de atracação e b_i barcaças adicionais ($i = 1, 2, \dots, M$). Considere-se que cada comboio seja formado por um empurrador e uma única barcaça e que os tempos de atendimento das barcaças e os tempos de viagem dos comboios sejam variáveis aleatórias exponenciais.

A Figura 4 apresenta a vazão para comboios de empurra em função do número de empurradores, para as seguintes condições: razão de 2:1 entre os tempos médio de viagem redonda e de atendimento, comboios formados por um empurrador e uma barcaça, um único berço de atracação em cada porto e uma quantidade de barcaças por porto variando de 0 a 3.

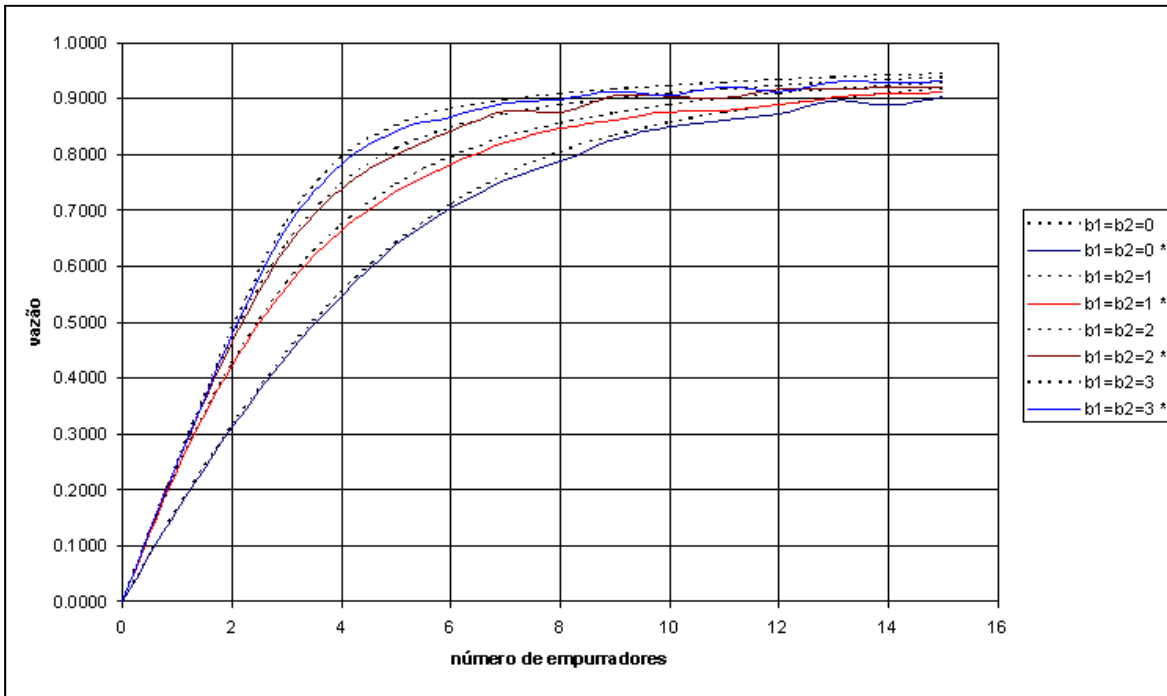


Figura 4 - Vazão em função da quantidade de empurrares e de barcaças adicionais para comboios de empurra, com razão entre tempos de 2:1

Observa-se que a partir do ponto de saturação da rede, as barcaças adicionais perdem o efeito no aumento da produção da frota. Quando se considera que os tempos de viagem entre os portos e os tempos de atendimento das barcaças são variáveis aleatórias, em determinadas situações, é conveniente acrescentar mais de uma barcaça por porto. Além disso, pode-se concluir que a disponibilidade de barcaças adicionais nos portos propicia maiores incrementos na produção para os casos em que se têm menores índices de congestionamento do sistema (menores valores de ρ). No entanto, para valores muito baixos de ρ , a inclusão de uma segunda barcaça extra em cada porto traz um pequeno aumento na produção.

Redes circulares com distribuições Erlang e desmembramento dos comboios nos portos

Suponha-se que a frota seja formada por N empurrares e que cada porto apresente 1 berço de atracação e b_i barcaças adicionais ($i = 1, 2, \dots, M$). Considere-se que cada comboio seja formado por um empurrador e uma única barcaça e que os tempos de atendimento das barcaças e os tempos de viagem dos comboios sejam variáveis aleatórias Erlang.

As Figura 5 e 6 apresentam a vazão e o tempo médio de viagem redonda, para as seguintes condições: razão de 4:1 entre os tempos médios de viagem redonda e de atendimento, comboios formados por um empurrador e uma barcaça, um único berço de atracação em cada porto e uma quantidade de barcaças por porto variando de 0 a 3, distribuição Erlang de ordem 4 para tempos de viagem entre portos e tempo de atendimento nos portos.

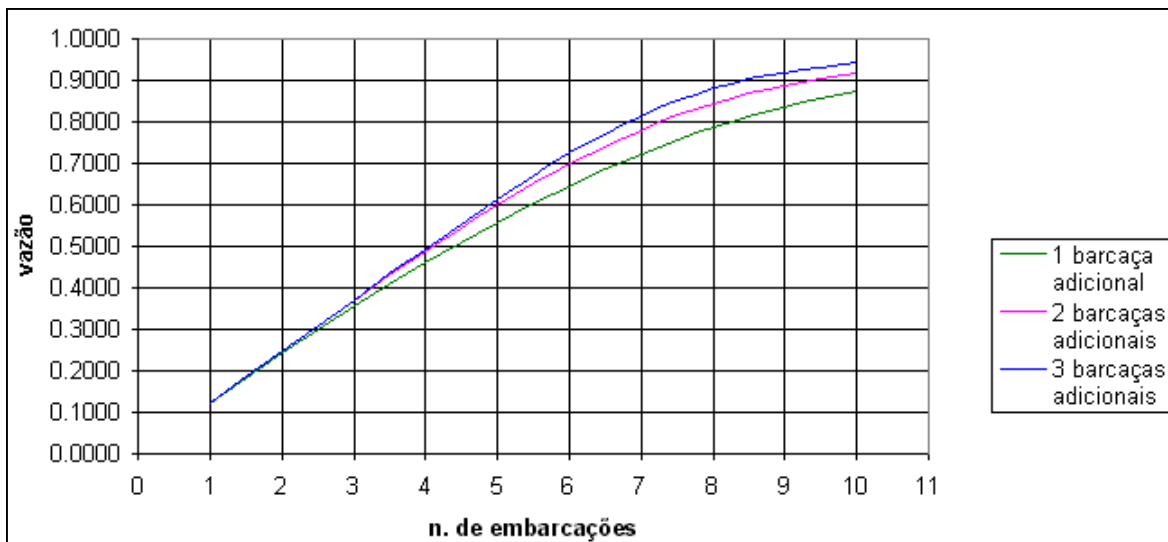


Figura 5 - Vazão em função do número de empurradores e barcaças adicionais nos portos e Erlang de ordem 4

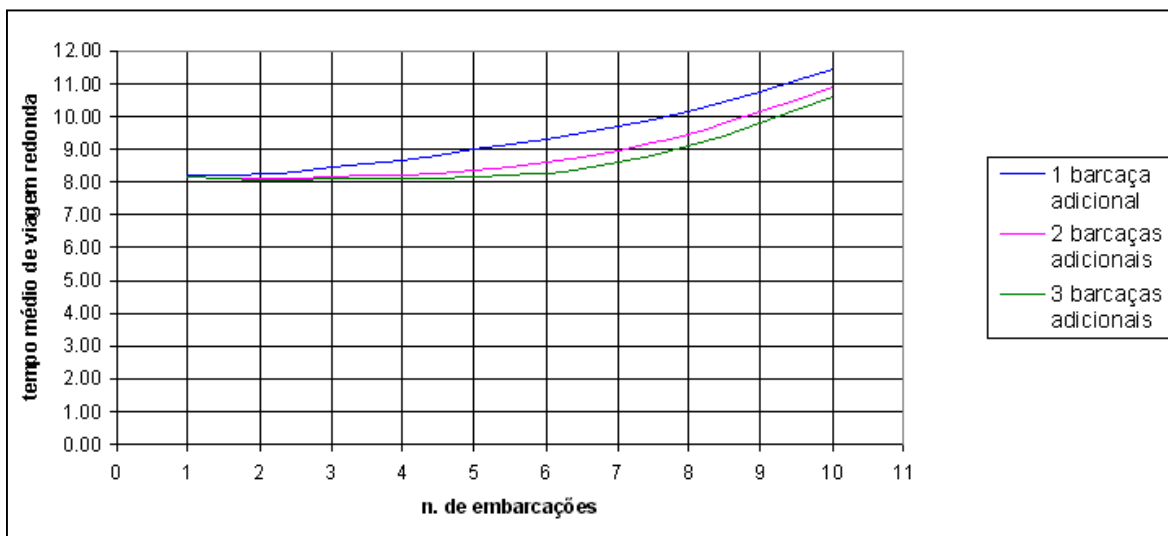


Figura 6 - Tempo médio de viagem redonda para comboios com desmembramento e Erlang de ordem 4

ESTUDO DE CASO - APLICAÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO

Esta seção é dedicada à aplicação do modelo de simulação em um estudo de caso real. O caso escolhido foi a Hidrovia Tietê-Paraná, entre os terminais de São Simão (GO) e Pederneiras (SP), avaliando a viabilidade econômica do transporte de grãos através da navegação fluvial.

Caracterização do Sistema Fluvial do Estudo de caso

As hidrovias dos rios Paraguai e Tietê-Paraná também movimentam grande volume de cargas. No ano passado, passaram 1,9 milhões de toneladas de cargas pelo rio Paraguai e 1,5 milhões de toneladas pelo sistema Tietê-Paraná.

Pela Tietê-Paraná são transportados soja, óleo vegetal e cana-de-açúcar. Ela deve transportar este ano 1,2 milhão de toneladas de carga de longo curso (sem contar areia e cascalho), total 20% superior ao apurado no ano passado, mas ainda aquém da sua capacidade nominal, de 20 a 25 milhões de toneladas por ano.

Será mostrado, a seguir, como opera o sistema hidroviário para o transporte de grãos entre os terminais de São Simão (GO) e Pederneiras (SP).

O escoamento de grãos pela Hidrovia Tietê-Paraná é realizado da seguinte forma:

- A carga, armazenada em silos no terminal de São Simão, aguarda a chegada das embarcações fluviais;
- Ao atracarem, os comboios são posicionados junto aos "shiploaders" para o início do processo de carregamento;

- Durante o carregamento, o empurrador fica de prontidão junto à chata para reposicioná-la, além de receber suprimentos de combustível, água potável, material de bordo etc;
- Após o carregamento do conjunto de chatas (2 ou 4), o comboio é acoplado e segue viagem;
- Durante a viagem, a embarcação tem a sua velocidade alterada quando da passagem em canais, pontes e em outras restrições físicas existentes; fatores climáticos também afetam a velocidade de cruzeiro do comboio, como a ação de correntezas, ventos e tempestades;
- Ao chegar no terminal de destino (Pederneiras-SP), havendo espaço para a atracação da embarcação, inicia-se o processo de desmembramento do comboio e posicionamento junto aos “sugadores”;
- Durante a descarga, as chatas têm que ser reposicionadas continuamente pelo empurrador, o qual, analogamente ao que acontece em São Simão (GO), é abastecido e suprido com material de bordo, água potável etc;
- A carga é, então, armazenada em silos, encerrando o ciclo do sistema fluvial.
Os parâmetros, então, que caracterizam este sistema são:
 - a) distância média percorrida;
 - b) número de comboios;
 - c) número de chatas por comboio;
 - d) se o sistema opera com desmembramento;
 - e) caso haja desmembramento, o número de conjunto de chatas extra;
 - f) velocidade média do comboio;
 - g) capacidade média das chatas;
 - h) taxas de carregamento e descarregamento no terminal.

De posse do modelo, das características de demanda de uma carga (origem, destino, volume etc.), dos pontos de transbordo, das características operacionais de cada modal e dos parâmetros de custo envolvidos, será possível simular a operação deste sistema, aproximando-se de uma condição real de operação, visando tornar o dimensionamento o mais realista possível.

O modelo econômico a ser desenvolvido passa a ser uma poderosa ferramenta de análise, uma vez que não só diversos cenários de operação podem ser testados, como também o custo do transporte pode a qualquer momento ser recalculado a partir da variação em alguns de seus itens. Este conceito é o mesmo da análise de sensibilidade, em que, a partir de uma solução ótima, estuda-se até que extensão uma variação nos valores dos parâmetros principais mantém ou não a solução em seu nível ótimo.

Com este propósito, foi criado o chamado “cenário padrão”, que consiste no cenário de transporte que se deseja dimensionar. Uma vez dimensionado o sistema, o mesmo servirá de base para a realização das análises de sensibilidade. Este cenário possui os seguintes parâmetros estáticos:

Tabela 1 - Parâmetros Estáticos

Distância entre portos (km)	650
Velocidade real do comboio simples (km/h)	13.5
Velocidade real do comboio duplo (km/h)	11.5
Tempo de eclusa para o comboio simples (h)	4.5
Tempo de eclusa para o comboio duplo (h)	8.6
Taxa de descarregamento no porto (ton / h)	250
Capacidade de carga do comboio simples (ton)	2200
Capacidade de carga do comboio duplo (ton)	4400
Quantidade de portos	2
Quantidade de berços em cada porto	1
Ano operacional (dias)	340

Tabela 2 - Faixa de variação das variáveis utilizadas nos cenários da simulação

Quantidade de empuradores	Número de barcas adicionais	Ordem de Erlang
1		25
2	0	100
3	1	
4	2	
5		
6		
7		
8		
9		
10		

Os valores associados para cada variável, mostrados na Tabela 2, foram combinados entre si, que fez um total de $10 \times 3 \times 2 = 60$ cenários diferentes.

Os resultados do modelo, que serviram para avaliar a eficiência econômico-operacional do sistema/cenário em estudo são indicados na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultados a serem fornecidos pelo modelo

Número de viagens realizadas
Tempo de atendimento nos portos
Tempo em fila das barcas vazias nos portos
Tempo em fila dos empuradores nos portos
Tempo em fila das barcas cheias nos portos
Tempo de viagem entre portos
Tempo de viagem redonda

A estrutura ou formação do custo de transporte fluvial será baseada na metodologia descrita por [3]. O custo total do comboio pode ser dividido em três parcelas: custo de capital, custo operacional e custo de viagem. O custo de capital se refere aos encargos relativos à propriedade da embarcação. O custo operacional abrange todas as despesas para manter a embarcação disponível para operar. Já o custo de viagem se refere aos custos advindos da embarcação estar navegando, tais como, o consumo de combustível. A Eq. (1) indica como foi calculado o custo do transporte fluvial. Em seguida, a

Tabela 4 fornece os parâmetros utilizados no cálculo.

$$\begin{aligned}
 \text{CustoTotal} = & NVR_{\text{comboio}} \cdot N_{\text{comboio}} \cdot (TVR \cdot CFD + T_{\text{naveg}} \cdot CDC_{\text{naveg}} + T_{\text{porto}} \cdot CDC_{\text{porto}}) \\
 & + Ano_{\text{ope}} \cdot (B_1 + B_2) \cdot CFD_{\text{adicional}}
 \end{aligned} \quad (1)$$

Onde:

NVR_{comboio} é o número de viagens redondas realizadas pelo comboio

N_{comboio} é o número de comboios

TVR é o tempo de viagem redonda do comboio

CFD é o custo fixo diário do comboio

T_{naveg} é o tempo total do comboio navegando por viagem redonda

CDC_{naveg} é o custo diário do comboio navegando

T_{porto} é o tempo do comboio nos portos

CDC_{porto} é o custo diário do comboio nos portos

Ano_{ope} é o ano operacional

B_1 e B_2 são, respectivamente, a quantidade de jogos de chatas adicionais nos portos 1 e 2

$CFD_{\text{adicional}}$ é o custo fixo diário por jogo adicional de barcas

Tabela 4 - Parâmetros da planilha de custo de Transporte Fluvial

Custo Fixo diário do comboio simples (R\$)	1.585,00
Custo fixo diário do comboio duplo (R\$)	1.960,00

Custo diário do comboio navegando (R\$)	3.730,00
Custo diário do comboio no porto (R\$)	190,00
Custo Fixo diário por jogo adicional de barcaças simples (R\$)	350,00
Custo Fixo diário por jogo adicional de barcaças duplo (R\$)	700,00

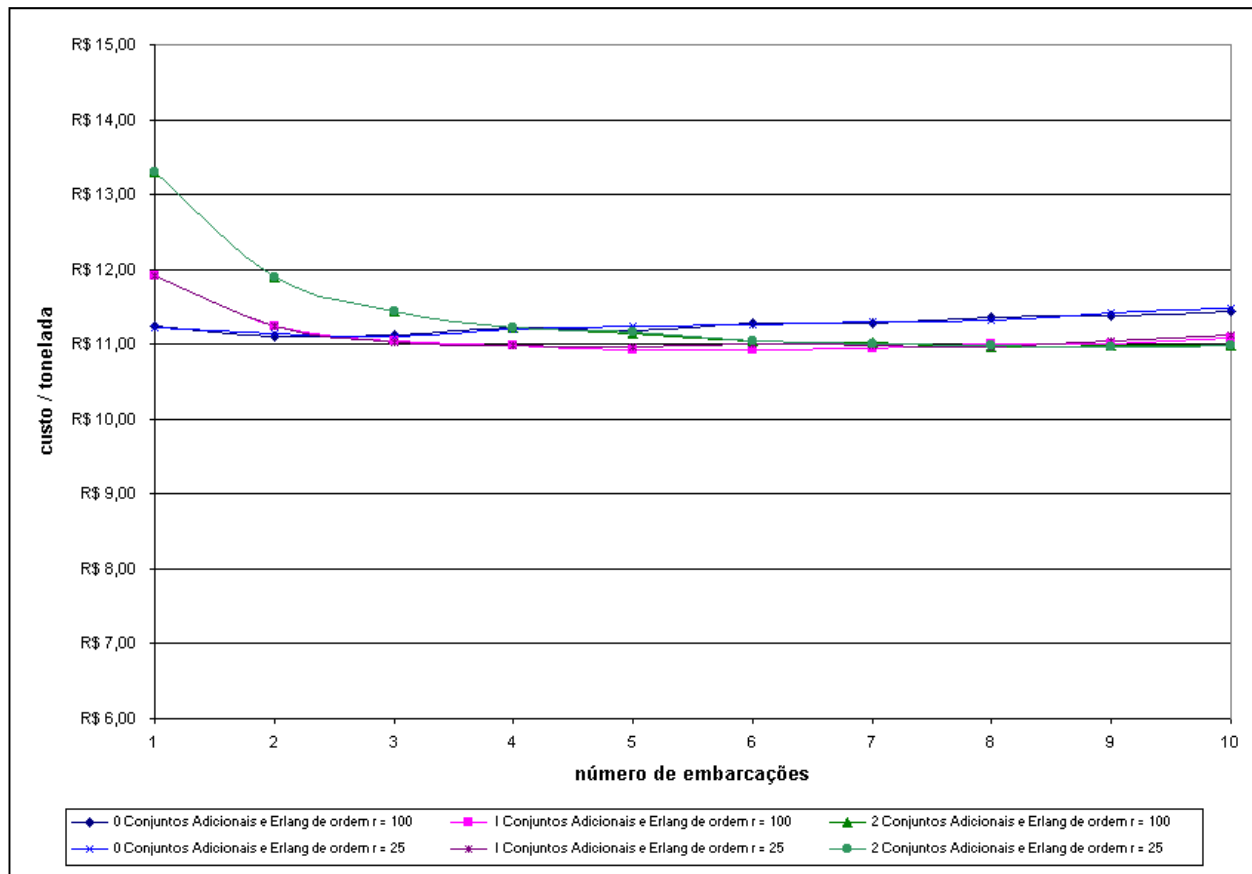


Figura 7 - Resultado da análise econômica aplicada para comboio simples

Através do gráfico acima, verifica-se que, para até 2 embarcações, a melhor alternativa seria a de não utilizar conjunto de barcaça adicional nos portos. Para o caso de 2 ou 3 embarcações, não há uma diferença significativa do custo por tonelada para a utilização de 0 ou 1 conjunto adicional de barcaça. Para um comboio composto de 3 a 6 embarcações, verifica-se que 1 conjunto adicional de barcaça em cada porto seria a melhor solução. A partir de 6 embarcações, não há diferença significativa na utilização de 1 ou 2 conjunto adicionais de barcaças simples em cada porto.

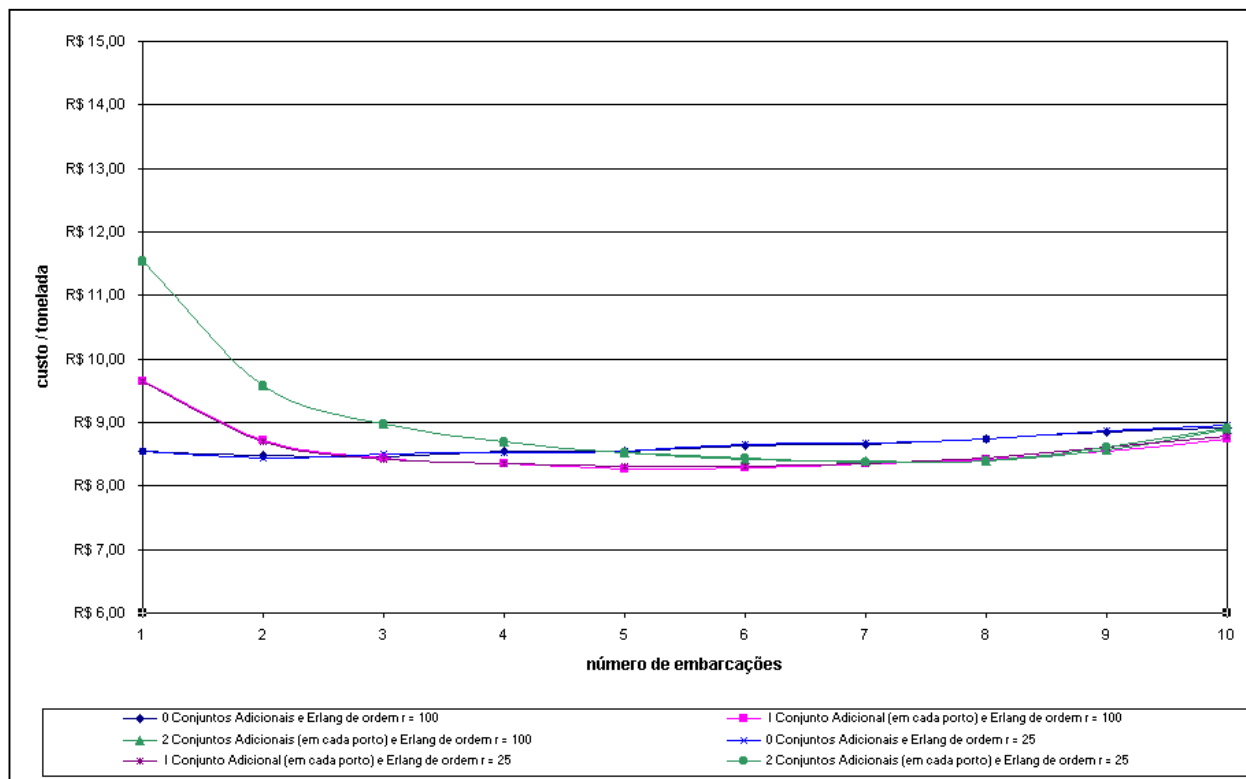


Figura 8 - Resultado da análise econômica aplicada para comboio duplo

Tal como no caso de barcas simples, quando não há conjunto de barca adicional em cada porto, o custo por tonelada é menor quando se tem de 1 a 2 embarcações. Tem-se, para 1 conjunto de barca dupla adicional e utilização de 3 a 7 embarcações, a melhor alternativa quando se trata de custo por tonelada de carga. Nota-se que, quando há 10 embarcações, praticamente não há diferença entre a utilização de barca adicional nos portos.

Além disso, verifica-se, também, que ordens de Erlang muito grandes não influenciam tanto na resposta do sistema. Comprova-se isto por meio da Figura 7 e Figura 8, onde foi feita uma comparação entre Erlang de ordem 25 e ordem 100.

CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo central complementar o estudo de redes fechadas de filas em transporte fluvial através do desenvolvimento de modelos de simulação capazes de representar o sistema, modelados analiticamente, de forma mais realística e generalizada.

Através dos resultados analíticos, pode-se comprovar a validação e aderência do modelo de simulação e seus resultados.

Além disso, mostrou-se a facilidade de se trabalhar com simulação obtendo resultados para o caso de sistemas de comboios com demembramento e distribuição Erlang, não realizado analiticamente por gerar grande número de estados tornando o procedimento inviável.

Apesar da simulação ser uma ferramenta, vale ressaltar que ela não garante a obtenção da resposta ótima como aquela encontrada quando se aplicam modelos otimizantes. Ela apenas auxilia na tomada de decisão.

No tocante à análise econômica, que nesse trabalho utilizou planilhas de custos baseadas nos resultados operacionais do modelo de simulação, obteve-se um resultado confiável, tendo em vista a prática do mercado. A formação dos custos utilizando-se planilhas contempla a estrutura simplificada de custos fixos e variáveis, ou capital, operacional e de viagem, sendo que o rateio final indicará o custo por tonelada global.

BIBLIOGRAFIA

1. MENDES, A.B. – Modelo econômico-operacional para o dimensionamento do transporte intermodal de carga pela Hidrovia Tietê-Paraná. Dissertação de Mestrado, EPUSP, São Paulo. 212 p. 1999.
2. MESQUITA, M.A. - Estudo de Sistemas fechados de filas em transporte fluvial. Dissertação de Mestrado, EPUSP, São Paulo. 253p. 1994.
3. SANTANA, W.A. - Avaliação do potencial de transporte da Hidrovia Tietê-Paraná. Dissertação de Mestrado, EPUSP, São Paulo. 305p. 2002.

4. www.geipot.gov.br
5. www.transportes.gov.br