

**DIMENSIONAMENTO DE RECURSOS E OTIMIZAÇÃO DA OPERAÇÃO DO  
TRANSPORTE PÚBLICO EM HORÁRIO DE PICO: APLICAÇÃO DA  
SIMULAÇÃO NO ESTUDO DO TRANSPORTE HIDROVIÁRIO**

**Marcus Vinicius Waltemberg de Lemos**  
**João Carlos C. B. Soares de Mello**  
Pós-Graduação em Engenharia de Produção  
Universidade Federal Fluminense

**RESUMO**

O presente trabalho avalia a operação de um sistema de transporte público de passageiros em seu horário de pico, com chegadas aleatórias de clientes, operações de embarque e desembarque, movimentação do modal no trajeto e interferências durante o percurso, seguindo as distribuições de probabilidade adequadas. Os tempos utilizados no estudo são dados reais coletados em campo. As análises foram realizadas através de um modelo desenvolvido no *software* Promodel©, buscando informações para: dimensionar os recursos necessários, identificar o gargalo, quantificar abandonos do sistema e tamanho das filas, e analisar virtualmente possíveis melhorias. Os resultados demonstram que melhorias nos tempos de embarque e desembarque podem proporcionar um ganho de 20% na redução dos tempos de espera, subsidiando a decisão adequada para otimização do sistema.

**PALAVRAS-CHAVE**

Transporte público; Simulação; Otimização

## 1. INTRODUÇÃO

Os transportes públicos de maneira geral cumprem sua função de levar as pessoas onde pretendem chegar, porém quando analisada a qualidade desse serviço prestado muitos problemas são encontrados, como: condições dos recursos de transporte lamentáveis, esperas pelo embarque longas demais, percursos demorados, etc. O que demonstra a necessidade de estudos sobre o tema, que levem ao aprimoramento do serviço e a satisfação da população. O meio de transporte analisado, segundo dados públicos transporta cerca de 25.700.000 pessoas por ano.

A princípio, a análise de servidores que atendem a um sistema e das entradas e saídas de clientes no mesmo, é naturalmente um problema de filas em sua forma mais simples. Porém, segundo Prado (1999): “A modelagem de sistema pode ser feita por duas abordagens inteiramente diferentes entre si: Teoria das Filas e Simulação. A Teoria das Filas é um método analítico que aborda o assunto através de fórmulas matemáticas. Já a simulação é uma técnica que, usando o computador, procura montar um modelo que melhor represente o sistema em estudo.”

Em casos onde a implementação de alterações na operação ou no projeto pode ocasionar sérios impactos ao serviço, a simulação tem papel fundamental na minimização dos prejuízos advindos de ideias mal sucedidas. Conforme Slack *et al.* (1996), “A simulação é uma das ferramentas mais úteis que um projetista pode usar para explorar as consequências de uma decisão de projeto sem ter que construir o produto, serviço ou processo.” Portanto, essa foi a técnica selecionada para o estudo, que aliada a teoria das restrições e aos estudos de tempos conduziram aos resultados obtidos.

### 1.1. Objetivo

O objetivo principal desse trabalho consiste em determinar os recursos de transporte necessários para a operação nos horários de pico de demanda, onde a quantidade de clientes entrando no sistema supera sua capacidade de atendimento, causando grandes filas que perturbam a operação regular e deterioram a qualidade do serviço.

Existem ainda outros pontos a serem explorados: Avaliação da operação considerando apenas novas embarcações, identificação do gargalo no fluxo para implementação de ações de aumento da capacidade do mesmo e a avaliação da infra-estrutura operacional das estações de embarque e desembarque e sua adequação a demanda nos horários de maior movimento.

A simulação é amplamente usada em sistemas como este, complexos e em que não é possível ter modelos analíticos. Apesar do objetivo deste trabalho ser a movimentação de embarcações, o fluxo dos pedestres é fundamental para determinar essa movimentação. Estudos sobre movimentação de pedestres podem ser vistos, por exemplo em Ling Huang (2009) e, usando simulação, em Helbing et al (2005).

### 1.2. Referencial teórico

Para elaboração do trabalho, dois conceitos são fundamentais: a Teoria das Restrições e a Modelagem de Sistemas para Simulação. Assim, torna-se importante uma breve explicação sobre as mesmas.

### 1.2.1. *Teoria das Restrições*

A Teoria das Restrições, desenvolvida pelo físico Israelense Eliyahu M. Goldratt, revolucionou o gerenciamento global da indústria, tendo início na década de 70. Essa teoria adota o conceito de restrições ou gargalos, que são definidos por Goldratt (1990) como “(...) *anything that limits a system from achieving higher performance versus its goals*”, ou seja, algo que limite um sistema a alcançar alta performance diante de suas metas. As restrições são a causa fundamental dos problemas observados nesse conjunto de elementos interligados. Segundo Goldratt (1990), é preciso, primeiramente, definir qual o objetivo global do sistema e as métricas que permitirão avaliar o impacto de qualquer subsistema e qualquer decisão local na meta global.

Os recursos críticos e as restrições importantes devem ser tratados adotando os cinco passos, propostos por Goldratt (1990), e seguidos por Cogan (2007):

- “Identificar a(s) restrição(ões) do sistema;
- Decidir como explorar a(s) restrição(ões) do sistema, ou seja, não desperdiçar nada dessa restrição;
- Subordinar qualquer coisa à decisão do segundo passo;
- Levantar a(s) restrição(ões) do sistema;
- Se, nos passos anteriores, uma restrição foi quebrada, voltar ao primeiro passo, mas não deixar que a inércia se torne uma restrição do sistema”.

Em A Meta, Goldratt (2002) afirma que “Um sistema de ótimos locais não é, de maneira alguma, um sistema ótimo; ele é um sistema muito ineficiente”.

### 1.2.2. *Modelagem de sistemas para simulação*

A Simulação vem se tornando cada vez mais uma ferramenta de auxílio à decisão dentro das grandes empresas que tentam responder rapidamente as mudanças dos seus mercados, mudanças essas provenientes de alterações: no ambiente macroeconômico, no perfil de demanda ou em novas regulações.

Traduzindo Chung (2004), Modelagem de Simulação e Análise é o processo de criação e experimentação de um modelo matemático computadorizado de um sistema físico. E seus principais propósitos são:

- Ganho de visão para funcionamento de um sistema;
- Desenvolvimento de políticas de operação dos recursos para melhorar o desempenho do sistema;
- Teste de Novos conceitos e/ou sistemas antes de sua implementação;
- Obtenção de informação sem perturbar o sistema atual.

Entre os principais benefícios encontram-se:

- Experimentação em curto espaço de tempo (é possível simular dias de operação em menos de uma hora);
- Requerimentos analíticos reduzidos;
- Modelos facilmente demonstrados.

A simulação é uma ferramenta para avaliar idéias, e sua capacidade de traduzir essas idéias em um modelo pode viabilizar a venda de projetos aos tomadores de decisão.

Pela definição de Ehrlich (1978), “Simulação é um método empregado para estudar o desempenho de um sistema por meio da formulação de um modelo matemático, que possui as mesmas, ou pelo menos semelhantes, características do sistema original. Manipulando o modelo e analisando os resultados, pode-se concluir como diversos fatores afetarão o desempenho do sistema.”

A ferramenta escolhida utiliza como componentes do modelo alguns itens, conforme definições a seguir:

- Locais - representam lugares no sistema onde Entidades são enviadas para processamento, estocagem, ou alguma outra atividade ou tomada de decisão;
- Entidades - qualquer coisa que o modelo processe é chamada de Entidade. Documentos, pessoas ou chamadas telefônicas poderiam ser modeladas como Entidades.
- Redes - quando os recursos são modelados como recursos dinâmicos que viajam entre Locais, eles seguem os caminhos de Rede. Entidades que se movimentam entre Locais, também o fazem através dos caminhos de Rede se referenciado em sua lógica de movimento de roteamento.
- Recursos - um recurso é uma pessoa, uma parte de um equipamento ou algum outro dispositivo usado para uma ou mais das seguintes funções: transportar entidades, apoiar na execução de operações nas Entidades em Locais, executar manutenções em Locais ou executar manutenções em outros Recursos.
- Processamentos - definem os destinos das Entidades através do sistema e as operações que sofrem em cada Local que entram. Uma vez que as Entidades entrem no sistema, conforme definido nas Chegadas, os Processamentos especificam tudo que acontece com elas até saírem do sistema.
- Chegadas - A introdução de novas Entidades no sistema é chamada de Chegada. A frequência de Chegadas podem ser definida por uma distribuição de probabilidades ou por um padrão de chegada que se repete no tempo.

## **2. METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DO MODELO**

A metodologia para estudo do tema consistiu em elaborar um modelo do sistema de transporte aquaviário entre as cidades de Niterói e do Rio de Janeiro, identificando o horário de pico de demanda pelo transporte e considerando tempos reais de operação e distâncias reais. As lógicas de embarque e desembarque, de atracação e partida, de entradas e deslocamento de passageiros no sistema e de trajeto das embarcações foram reproduzidas no modelo.

As chegadas de pessoas no sistema seguem uma distribuição de Poisson (Prado 1999) e consequentemente o tempo médio entre chegadas segue uma distribuição Exponencial

negativa. Então, foram observadas em várias ocasiões, conforme a tabela 1, as quantidades de clientes a chegar ao sistema e com esses dados foram calculados os tempos médios entre chegadas para as estações de Niterói e do Rio de Janeiro. Esses tempos médios foram introduzidos no modelo através de uma distribuição exponencial negativa na frequência de chegadas de Entidades.

Chegadas de passageiros nas filas (pessoas / min)																			
Horário	Filas																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
07:55	7																		
08:30				4															
07:55													6						
08:52														7					
08:01		6																	
08:23					5														
08:32																		5	
08:13													4						
07:37								4											
08:01			7																
07:43							5												
08:30											6								
08:23									5										
07:37						4													
08:01										4									
07:37				8															
08:15																4			
08:38																			6
08:21														4					
08:03																		5	
Média	5,3																		
Considerando-se 19 filas existentes na estação Niterói, tem-se uma média de aproximadamente 100 pessoas / minuto entrando no sistema																			

tabela 1. Quantidade de chegadas de passageiros por intervalo de tempo

A identificação do pico de demanda se deu pela simples observação do sistema em diferentes horários na estação em Niterói. O comprimento das filas demonstra claramente esse intervalo crítico entre às 07h20min e 08h50min.

Foi realizado um estudo de tempos, em campo, para cronometragem dos tempos de operação, conforme tabela 2. Foram medidos os tempos de desembarque e embarque, os tempos de deslocamento dos passageiros no interior das estações e os tempos de trajeto das embarcações. Para fins de entrada de dados no modelo:

- foram utilizadas as médias de tempos de desembarque e embarque;
- as médias de tempo de deslocamento dos passageiros a pé nas estações;
- a velocidade de deslocamento das embarcações foi calculada em função dos tempos de trajeto e das distâncias medidas pela foto de satélite. As velocidades são diferentes para embarcações cheias e embarcações vazias;

Estudo de tempos relevantes para a simulação		Horário 08:30	Horário 07:55	Horário 08:52	Horário 08:01	Horário 08:23	Horário 08:32	Horário 08:13	Horário 07:37	Horário 08:01	Horário 07:43	Tempo Médio	Tempo Médio 1 passageiro
Etapa	Início / fim	min	min	Segundos									
Movimentos dos passageiros													
Encher área de espera interna (1200 passageiros)	abertura das roletas	04:57	05:52	04:43	05:12	05:15	04:35	04:23	04:32	05:05	04:40	04:55	0,25
	abertura dos portões												
Transferência de todos passageiros para área de embarque (1200 passageiros)	abertura dos portões	04:43	04:03	04:17	03:51	03:45	04:12	04:20	03:53	03:48	04:01	04:05	0,20
	saída da embarcação												
Movimentos das embarcações													
Desembarque e embarque (1200 passageiros)	parada da embarcação	05:57	06:32	05:59	05:14	06:45	04:32	06:41	05:56	06:15	06:23	06:01	
	saída da embarcação												
Percurso Cheia (1200 passageiros)	saída da embarcação	14:29	14:52	14:39	15:12	14:04	14:21	14:13	14:12	15:16	14:11	14:32	
	parada da embarcação												
Percurso Vazia	saída da embarcação	12:15	11:54	12:32	12:05	11:36	11:15	12:41	12:01	11:51	11:48	11:59	
	parada da embarcação												

tabela 2. Registro de tempos cronometrados.

As lógicas de movimentação utilizadas foram as seguintes:

- Os passageiros (Passageiro\_Nit ou Passageiro\_Rio) entram no sistema através do primeiro Local, em cada estação, chamados de Roleta\_Nit e Roleta\_Rio.
- Após a entrada no sistema os passageiros se dirigem a área de espera interna (Espera\_Interna\_Nit ou Espera\_Interna\_Rio), até uma quantidade máxima de 1200 pessoas. Existe a condição de interromper o acesso a essa área durante a transferência de passageiros à próxima área de espera no embarque. Esse impedimento não ocorre se a área de embarque estiver vazia.
- Seu próximo destino é a área de espera no embarque (Espera\_Embarque\_Nit ou Espera\_Embarque\_Rio), onde serão acumulados até 1200 passageiros aguardando a chegada da embarcação.
- As embarcações são solicitadas pelos passageiros nas áreas de espera. Essa é uma simplificação que não afeta os resultados do modelo no horário de pico, pois o tempo de transporte acaba determinando o intervalo programado entre saídas.
- Ao ancorarem nas estações as embarcações aguardam o tempo de desembarque e embarque, antes de partirem. Sua capacidade máxima é de 1200 passageiros.
- Durante o trajeto, as embarcações estão sujeitas a atraso, devido ao desvio para passagem de embarcações com prioridade.
- Ao ancorarem nas estações de destino, as embarcações aguardam o tempo de desembarque, antes de iniciarem um novo embarque.
- Após desembarcarem, os passageiros se dirigem a saída e deixam o sistema.

Essa é uma descrição simplificada da lógica do sistema.

A partir desses dados e das lógicas de movimentação observadas, o modelo de simulação foi construído com o *software* ProModel© Optimization Software Suite (Student Version). No modelo é possível simular vários cenários, com acréscimo de recursos, mudanças de lógica ou alteração de variáveis críticas, levando sempre em consideração a meta global do sistema e as métricas para avaliação do desempenho. Assim, a situação atual é apresentada e, seguindo os cinco passos descritos por Goldratt (1990), propostas de melhoria podem ser agregadas ao modelo, desenvolvendo-se várias possibilidades de aprimoramento.

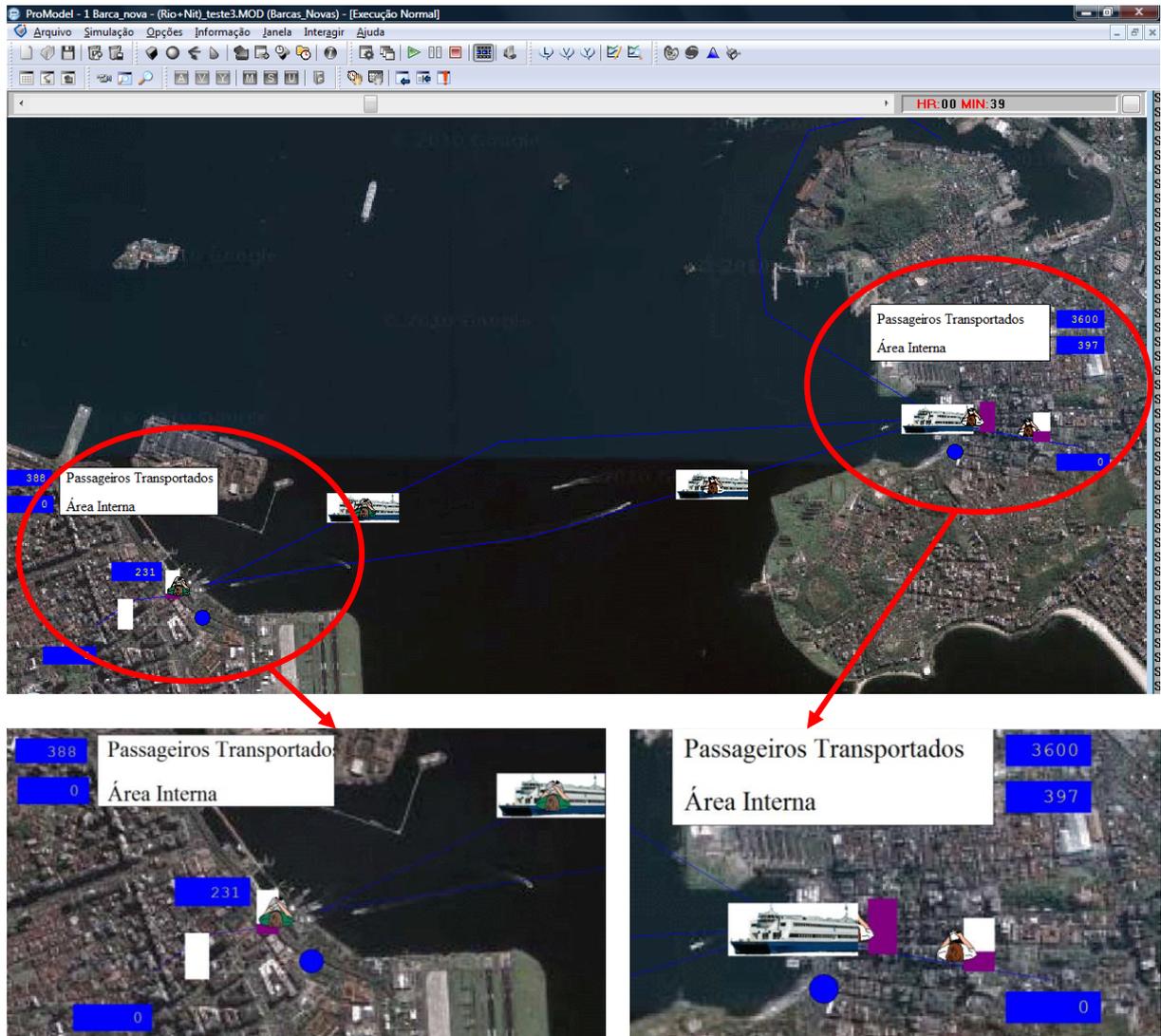


figura 1. Layouts do modelo de simulação do sistema

### 3. ANÁLISES SOBRE O SISTEMA

Para proceder as análises do sistema simularemos alguns cenários, alterando a quantidade de recursos disponíveis, os tempos de desembarque e embarque e a velocidade das embarcações. Em seguida registraremos os resultados de cada cenário para posteriores conclusões.

O período de simulação foi limitado ao horário de pico, com duração de 1,5 horas mais um período de estabilização de 10 minutos.

O Local Roleta\_Nit, que representa a fila de espera fora da estação de Niterói, foi configurado com uma capacidade de 3600 pessoas. Essa quantidade é equivalente a três viagens das embarcações, tamanho de fila máximo já observado em condições normais. Sendo assim, apenas haverá abandonos do sistema se essa quantidade for excedida.

### 3.1. Cenário 1

- Recursos (Embarcações disponíveis) = 04
- Tempo de Desembarque = 3 min.
- Tempo de Embarque = 3 min.
- Velocidade das Embarcações vazias = 417 m/min (5Km em 12,0 min)
- Velocidade das Embarcações cheias = 345 m/min (5 Km em 14,5 min)

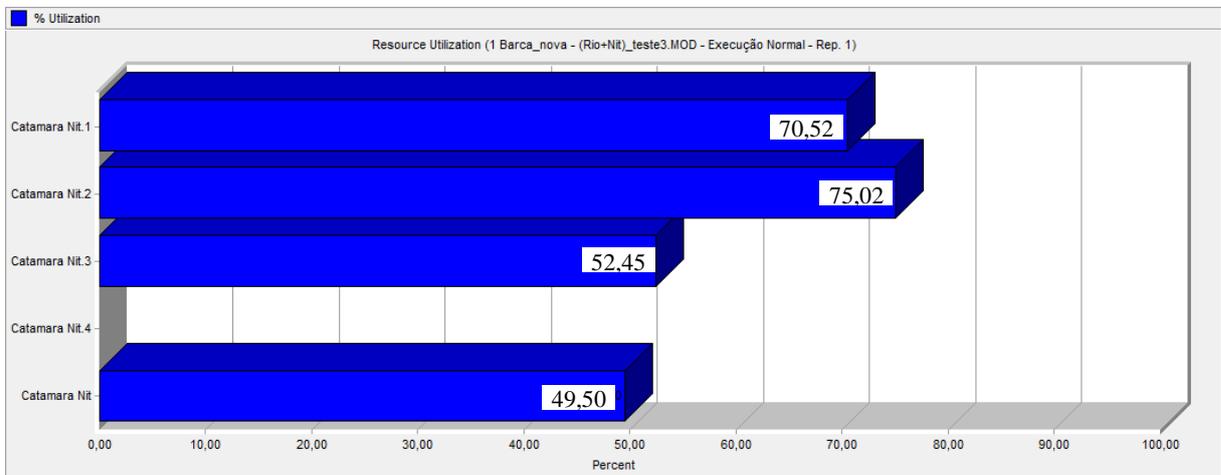


figura 2. Utilização dos recursos (Embarcações) no cenário 1

Fica constatado que a embarcação número 4 não foi utilizada nesse cenário, conforme a figura 2.

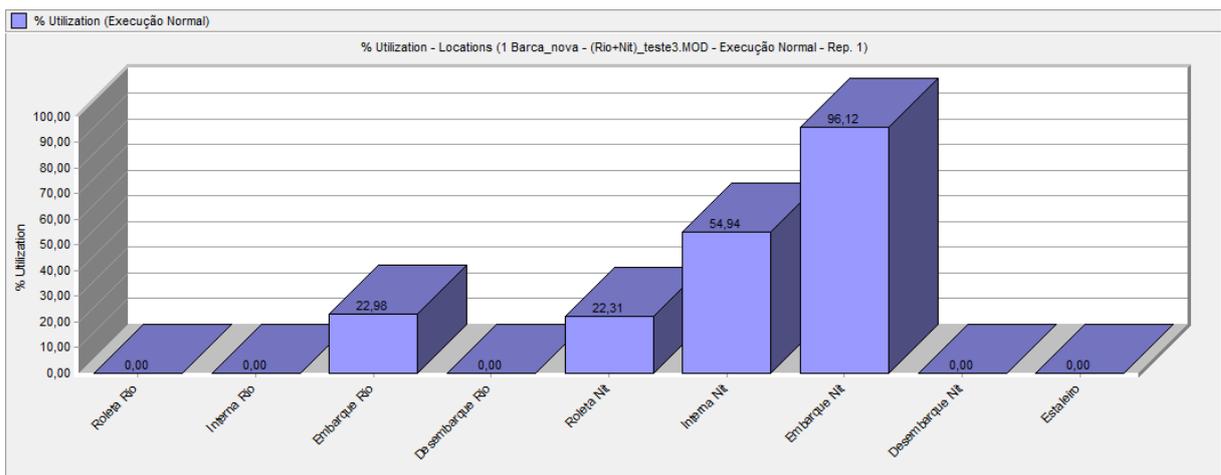


figura 3. Utilização dos Locais no cenário 1

O Local com maior índice de utilização foi a área de embarque na estação Niterói, conforme a figura 3. Sinalizando o possível gargalo na operação após essa área de espera.

Para o cenário 1, o conteúdo máximo do Local Roleta\_Nit, que representa o tamanho da fila de espera fora da estação alcançou o valor de 2582 pessoas. Portanto, não houve abandonos no sistema.

Como a quarta embarcação não foi utilizada, a mesma foi eliminada e o modelo simulado novamente não havendo qualquer alteração dos resultados. Assim, para o cenário 2 esse dado será alterado, mas não provocará nenhum efeito. Da mesma forma uma alteração na velocidade das mesmas, teoricamente, não causaria mudança nos resultados. Apenas as demais modificações devem ser avaliadas.

### 3.2. Cenário 2

- Recursos (Embarcações disponíveis) = 03
- Tempo de Desembarque = 3 min
- Tempo de Embarque = 2 min

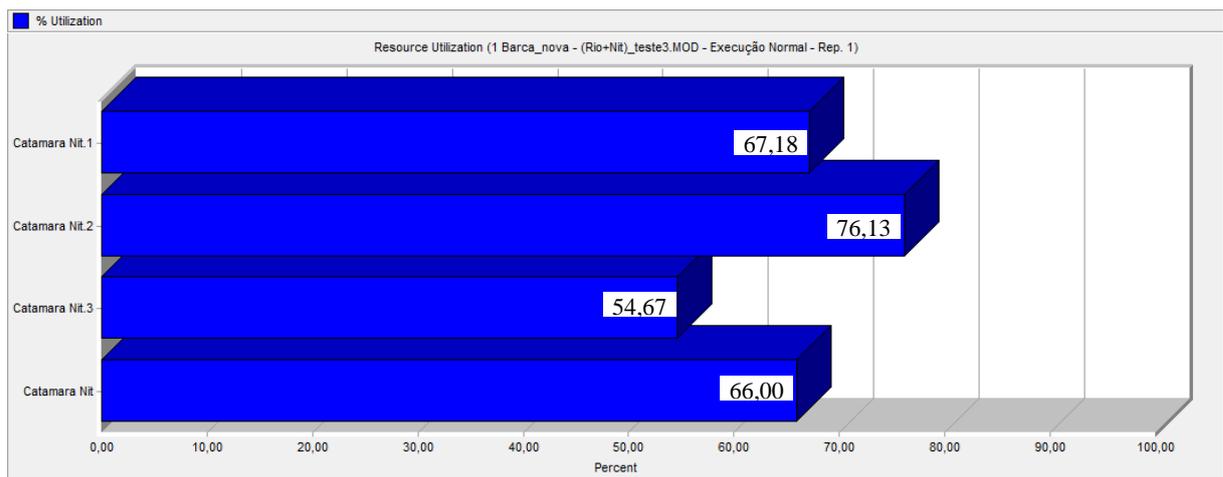


figura 4. Utilização dos recursos (Embarcações) no cenário 2

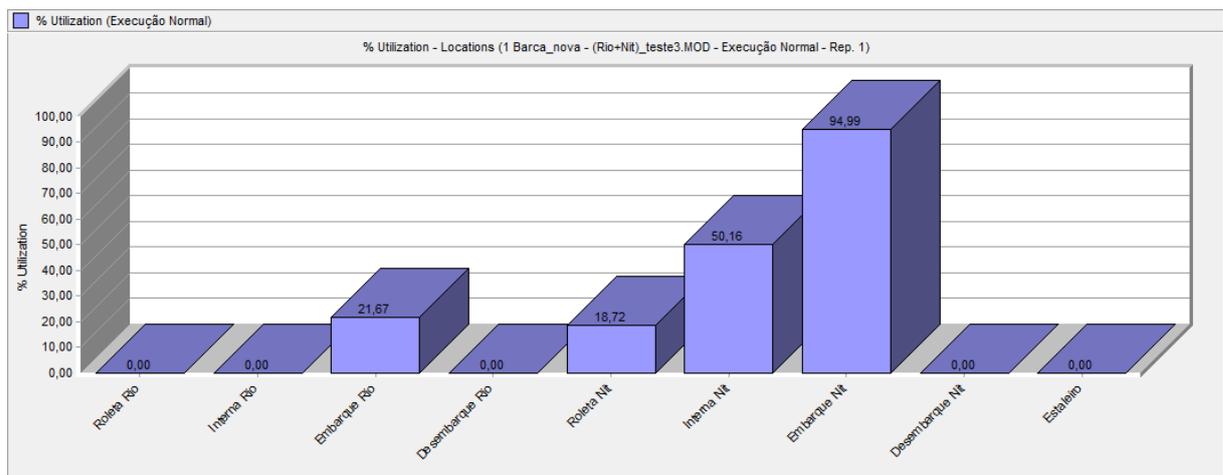


figura 5. Utilização dos Locais no cenário 2

No cenário 2, o conteúdo máximo do Local Roleta\_Nit, que representa o tamanho da fila de espera fora da estação alcançou o valor de 2059 pessoas, ou seja, uma redução de 1 min (17%) no tempo de desembarque e embarque proporcionou uma redução de 20% no tamanho máximo da fila no horário de pico.

Mesmo com a redução dos tempos de desembarque e embarque a área de espera onde essas atividades são processadas continua sendo a mais utilizada.

#### **4. CONCLUSÕES**

Com base nos resultados da simulação, num dimensionamento de recurso considerando apenas embarcações modernas, três embarcações são necessárias para atender ao horário de pico, sem que haja abandonos da fila por tempo excessivo de espera, segundo os critérios estabelecidos.

Como a redução de uma embarcação (Recurso) não causou impacto aos resultados pode-se entender que a maior restrição não está na disponibilidade das mesmas. Com a redução experimentada nos tempos de desembarque e embarque verifica-se uma redução de 20% no tamanho máximo da fila, o que indica que as operações de porto são o gargalo e que o investimento em melhorias deve ser feito visando a redução do tempo das mesmas, aumentando assim a capacidade global do sistema.

Estudos subsequentes poderiam ser desenvolvidos para avaliação de períodos completos de operação com dimensionamento dos recursos para diferentes intervalos de tempo ao longo do dia. Poderia também ser desenvolvido um trabalho sobre o fluxo microscópico nas estações de embarque para entendimento dos movimentos dos passageiros e consequente melhoria dos tempos que impactam a capacidade do sistema.

#### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Chung, C. A. Simulation Modeling Handbook: A Practical Approach. CRC Press LLC, USA, 2004.

Cogan, S. Contabilidade gerencial: uma abordagem da teoria das restrições. Saraiva, São Paulo, 2007.

Ehrlich, P. J., Pesquisa Operacional: Curso Introdutório. Atlas, São Paulo, 1978.

Goldratt, E. M. A Meta: um processo de melhoria contínua. Nobel, São Paulo, 2002.

Goldratt, E. M. Corrente Crítica. Nobel, São Paulo, 2006.

Goldratt, E. M. What is this thing called theory of constraints and how should it be implemented? The North River Press, Great Barrington, Mass., USA, 1990.

Helbing, D., Buzna, L., Johansson, A., Werner, T., 2005. Self-organized pedestrian crowd dynamics: experiments, simulations, and design solutions. Transportation Science 39 (1), 1–24.

Henderson, S. G. & Nelson, B. N. Handbook in Operations Research & Management Science, Vol. 13. Elsevier B.V., USA, 2006.

Huang, L., Shu, C.-W. & Zhang, M. (2008) Numerical boundary conditions for the fast sweeping high order WENO methods for solving the Eikonal equation, Journal of Computational Mathematics, 26, 1-11.

Meyer, P. L. Probabilidade: aplicações a estatística. Ao Livro Técnico S. A., Rio de Janeiro, 1974.

Mcclellan, J. J. The Benefit Of Using Simulation to Improve the Implementation of Lean Manufacturing – Case Study: Quick Changeovers to Allow Level Loading of the Assembly. School of Technology: Brigham Young University, 2004.

Prado, D.. Teoria das Filas e da Simulação. Editora de Desenvolvimento Gerencial, Minas Gerais, 1999.

PROMODEL Corporation. User Guide. Promodel Inc., USA, 2006.

Slack, N. et. al. Administração da Produção. Atlas, São Paulo, 1996.

Taha, H. A. Pesquisa Operacional: uma visão geral. Pearson Prentice Hall, São Paulo, 2008.