

# Utilização de Sistemas Multiagentes para a Simulação do Comportamento de Usuários em Redes de Telecomunicações

Rodrigo Campos Bortoletto<sup>1</sup>, Viktor Santos Moitinho<sup>1</sup>, Helio Waldman<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – Guarulhos (IFSP – Câmpus Guarulhos) – 07115-000 – Guarulhos – SP – Brazil

<sup>2</sup>Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) Caixa Postal 6167 – 13084-971 – Campinas – SP – Brazil

bortoletto@ifsp.edu.br, viktor.santos@aluno.ifsp.edu.br,  
waldman@decom.fee.unicamp.br

**Abstract.** *The growth of data flow and the change in user behavior, who started to consume more and more bandwidth, have a direct impact on telecommunications operators, resulting in a demand growth of around 100% per year. Therefore, the increase in the data flow in telecommunications networks, together with the increasing competition among the operators, demand studies on the influence of the collective behavior. This behavior can significantly alter the financial results of the operators and the competition between them. This paper will analyze the behavior of a duopoly that allows the comparison and regulation of existing models in telecommunications systems, through a simulation using multi-agent systems. This paper aims to present the simulation results of a duopoly and validate its results with the analytical model of a single link studied in the literature. The validation of simulation results with analytical results will allow the expansion of studies on the influence of users on telecommunications systems.*

**Keywords:** *Multiagent Systems, Telecommunications, Simulation.*

**Resumo.** *O aumento do fluxo de dados e a mudança do comportamento dos usuários, que passaram a consumir cada vez mais banda, têm impacto direto nas operadoras de telecomunicações, que recebem um crescimento da demanda de cerca de 100% ao ano. Sendo assim, o acréscimo do fluxo de dados em redes de telecomunicações, aliado à crescente concorrência entre as operadoras, demandam estudos sobre a influência do comportamento coletivo. Esse comportamento pode alterar de forma significativa os resultados financeiros das operadoras e a concorrência entre elas. Neste artigo será analisado o comportamento de um duopólio, permitindo a comparação e a regulação dos modelos existentes em sistemas de telecomunicações, por meio de uma simulação utilizando sistemas multiagentes. O objetivo deste artigo é apresentar os resultados de simulação de um duopólio e validar seus resultados com o modelo analítico de um enlace avulso estudado na literatura. A validação dos resultados de simulação com os resultados analíticos permitirá posteriormente a expansão dos estudos sobre a influência dos usuários em sistemas de telecomunicações.*

**Palavras-chave:** *Sistemas Multiagentes, Telecomunicações, Simulação.*

## 1. Introdução

As redes de telecomunicações constituem-se em um fator essencial na sociedade moderna. O crescimento do fluxo de dados e a mudança do comportamento dos usuários que passaram a consumir cada vez mais banda tem impacto direto nas operadoras de telecomunicações, as quais observam o crescimento deste tráfego e a necessidade de investimentos na expansão de suas redes. Portanto, o desenvolvimento de um modelo adequado de dimensionamento dessas redes torna-se importante à medida que influi diretamente em suas receitas [Laffont e Tirole, 2001].

Com a abertura do mercado à concorrência e a consequente multiplicação das redes de telecomunicações, a probabilidade de bloqueio no atendimento de uma conexão deixa de ser um parâmetro adequado para contratação de serviços de infraestrutura, pois ela não é mais restrita ao monopólio de uma única empresa, passando a representar a possibilidade de bloqueio em uma ou mais operadoras. Sendo assim, qualquer impacto sob uma das concorrentes poderia alterar a probabilidade de bloqueio de todas as outras [Pindyck e Rubinfeld, 2018].

Em um ambiente competitivo com múltiplos prestadores de serviço (operadoras), a probabilidade de bloqueio percebida pelo usuário não depende de uma única operadora: cada operadora tem ciência de sua própria probabilidade de bloqueio, mas não tem ideia da probabilidade de bloqueio do usuário, isto é, da probabilidade dele ser bloqueado em todas as operadoras, que será a única probabilidade de bloqueio que o usuário irá perceber se estiver interagindo com as operadoras através de um corretor (“broker”).

Somado a isso, os modelos atuais de dimensionamento de redes têm como objetivo a busca pela qualidade de serviço por meio da determinação de valores máximos de probabilidade de bloqueio. Por outro lado, este comportamento nem sempre vai ao encontro dos interesses dos usuários que buscam, na grande maioria das vezes, a minimização da sua probabilidade de bloqueio, e nem aos interesses das operadoras que buscam maximizar seus lucros [Laffont e Tirole, 2001].

O comportamento coletivo dos usuários em redes de telecomunicações e de suas operadoras pode alterar de forma significativa os resultados financeiros das operadoras, como foi observado entre as décadas de 80 e 90 quando ocorreram mudanças de padrões de comportamento devido ao surgimento de novas mídias eletrônicas, causando uma completa reformulação dos modelos de tráfego das redes de telecomunicações.

Este trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de um simulador em Sistema Multiagente (SMA) que permita replicar o comportamento da probabilidade de bloqueio estudado por Agner K. Erlang em sua fórmula de Erlang B [apud Kumar et al., 2004], e comparar seus resultados com os obtidos no simulador desenvolvido em SMA, para um monopólio e um duopólio.

Para tanto, foi utilizado um modelo de simulação baseado em SMA e seus resultados foram comparados com um modelo de dimensionamento de redes baseado em uma Cadeia de Markov de Tempo Contínuo, em inglês, Continuous Time Markov Chains (CTMC) descrito em Kumar, Manjunath e Kuri (2004). Este modelo foi aplicado em um mercado formado por duas operadoras que buscam minimizar sua probabilidade de bloqueio sobre um enlace avulso (“single link”).

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. A seção 2 apresenta as bases teóricas do trabalho. Em seguida, a seção 3 apresenta os trabalhos relacionados à temática estudada. Na seção 4 são apresentadas a modelagem e as ferramentas utilizadas no desenvolvimento das simulações de monopólio e duopólio em um enlace unitário. A seguir a seção 5 apresenta os resultados obtidos na simulação do monopólio e do duopólio e compara os resultados da simulação com os resultados analíticos. A conclusão deste artigo é apresentada na seção 6.

## **2. Fundamentação Teórica**

A modelagem e simulação baseada em SMA é um método computacional que permite analisar e observar a interação entre agentes e o ambiente em que estão inseridos.

Um SMA é composto por um conjunto de agentes capazes de interagir entre si e com o meio ambiente. A inteligência de enxame é uma propriedade emergente de um sistema coletivo que resulta de seus princípios de proximidade, qualidade, diversidade, estabilidade e adaptabilidade [Von Zuben, 2000].

A modelagem em SMA faz uso de construções abstratas, à semelhança dos modelos matemáticos convencionais, que são especificados com precisão e estruturados formalmente por meio de conjuntos de operações lógicas e matemáticas realizadas ao longo do tempo [Abar et al., 2017].

Esses modelos representam uma abordagem metodológica destinada ao teste, ao refinamento e à extensão de teorias que não são adequadamente formuladas ou avaliadas utilizando-se as ferramentas estatísticas e matemáticas convencionais [Railsback e Grimm, 2019].

Os modelos de Simulação baseados em Agentes são particularmente apropriados para a exploração experimental de fenômenos como a mudança institucional, as trajetórias do desenvolvimento tecnológico e a implantação de políticas públicas, tirando proveito da grande capacidade computacional que se tornou disponível para os pesquisadores nos últimos 30 anos [Ormerod e Rosewell, 2009].

Esses modelos permitem a compreensão aprofundada dos mecanismos causais essenciais de sistemas complexos e viabilizam, nas ciências sociais, instrumentos próximos aos laboratórios das ciências naturais [Ormerod e Rosewell, 2009].

Assim, operadoras de telecomunicações e agentes governamentais de regulação podem beneficiar-se do uso de simulações baseadas em SMA, por meio da utilização dos resultados obtidos para o desenvolvimento de novas políticas e tecnologias que busquem o bem estar da sociedade.

Na modelagem de um duopólio o comportamento observado em Teoria dos Jogos emerge da relação entre os diversos usuários que buscam maximizar sua probabilidade de bloqueio, permitindo a obtenção de equilíbrio de Nash transitórios nas simulações baseadas em SMA.

A Teoria dos Jogos é o estudo de decisões interativas, no sentido de que os possíveis resultados da interação entre os agentes dependem das escolhas de todos os envolvidos, servindo como um mecanismo de análise de conflitos de interesse [Watson, 2002].

A Teoria de Jogos tem papel central na modelagem das interações entre agentes econômicos, em especial nos jogos não-cooperativos, pois cada agente econômico no jogo toma uma decisão buscando seu próprio interesse [Abar et al., 2017].

Todas as situações em que pelo menos um agente pode maximizar sua função utilidade, por meio da antecipação consciente ou inconsciente das ações de um ou mais agentes, são chamadas de jogo. O jogo é influenciado não apenas pelas ações de um dos agentes, mas também pelas ações dos outros agentes presentes nele. As ações que o agente pode tomar são conhecidas como decisões estratégicas e, baseando-se nestas decisões estratégicas, surge o ganho esperado, que representa as recompensas ou benefícios esperadas pelo agente, que é suposto racional.

### **3. Trabalhos relacionados**

Os trabalhos apresentados a seguir demonstram e embasam a aplicação de SMA para o desenvolvimento de políticas e aplicações em sistemas de Telecomunicações.

O trabalho de Takahashi et al. (2018) apresentou um modelo de mercado para bens duráveis com o serviço de compartilhamento desses bens e a simulação por meio de sistemas multiagentes para caracterizar a tomada de decisão dos fabricantes. Esse trabalho apresenta a influência da preferência dos usuários na tomada de decisão dos fabricantes.

Soares Júnior (2013) desenvolveu um modelo de restauração distribuída baseada em sistemas multiagentes, que busca corrigir as falhas presentes na restauração centralizada por meio de busca das seções que apresentam falha de conexão por meio da troca de informações entre enlaces.

O trabalho de Asmin et al. (2019) demonstrou como o comportamento dos usuários pode influenciar as políticas das operadoras de telecomunicações, confirmando que segmentos de mercado podem ser influenciados pelos comportamentos das

operadoras de telecomunicações.

Em Pereira e Dequech (2015) apresentam um estudo sobre o mercado de provedores de acesso a internet e a influência de políticas setoriais por meio da modelagem utilizando SMA, o trabalho proporciona insights relativos a importância dos comportamentos sociais e sua influência na dinâmica do processo de competição neste mercado.

O trabalho de Elreedy et al. (2019) estuda a precificação dinâmica em um sistema de banda larga sem fio por meio da aplicação de SMA mostrando a relevância do uso dessa aplicação para operadoras de telecomunicações.

Os trabalhos apresentados demonstram aplicações que podem gerar resultados relevantes para os estudos na área de modelagem e simulação em SMA em telecomunicações, o que permite a compreensão e importância do desenvolvimento deste trabalho.

#### 4. Materiais e Métodos

A modelagem matemática do comportamento da probabilidade de bloqueio para o monopólio foi representada por meio de um enlace avulso, onde número de canais  $W$  representa o número de comprimentos de onda presente na rede óptica WDM de grade fixa. Estes canais podem assumir até  $(W + 1)$  estados, que são indexados por  $i = 0, 1, 2, \dots, W$ , onde  $i$  representa o número de canais ocupados.

Assume-se que cada canal permanece ocupado por um período de tempo em média igual a um, e que os tempos de duração das chamadas são independentes e identicamente distribuídos (IID). Desta forma, todos os tempos estão normalizados em relação ao tempo médio de duração da chamada. Assume-se também que a taxa de chegada é modelada por uma distribuição de Poisson de intensidade  $\nu$  expresso em Erlang. O número de canais ocupados pode ser modelado por uma cadeia de Markov em tempo contínuo (CTMC).

As requisições serão bloqueadas quando a rede, um enlace avulso, estiver com todos os canais ocupados, isto é, no estado  $W$ . Portanto, a probabilidade de bloqueio  $P_b(W)$  pode ser determinada pela equação de Erlang-B [Kumar et al., 2004]:

$$P_b(W) = p_W = \frac{(\nu^W / W!)}{\sum_{j=0}^W \frac{\nu^j}{j!}} \quad (1)$$

onde:

$\nu$  – Intensidade de tráfego;

$W$  – Número de canais disponibilizados pela operadora;

$p_W$  – Probabilidade estacionária do estado  $W$ ;

$P_b(W)$  – Probabilidade de bloqueio da operadora.

O ambiente de modelagem utilizado para o desenvolvimento do simulador baseado em agentes foi o NetLogo, por ser uma plataforma aberta que permite a modelagem de sistemas complexos, apresenta um conjunto de interfaces, guias de informações e monitoramento de agentes em tempo real, além de permitir a criação e manipulação de milhares de agentes operando de forma independente. Isso possibilita o estudo das conexões entre os microcomportamentos dos agentes e os padrões que emergem das interações [Wilensky et al., 2015].

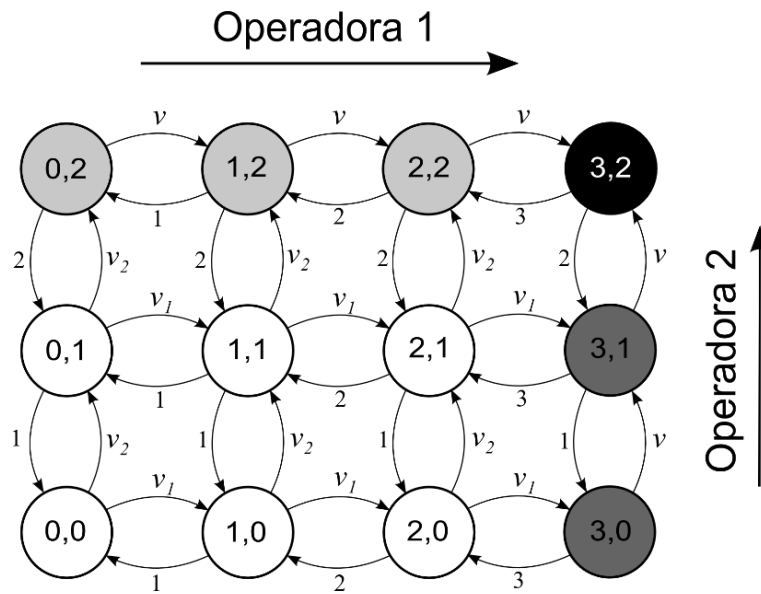
A modelagem do sistema em NetLogo para o estudo do monopólio foi desenvolvida de tal forma que a alteração do tamanho da caixa de simulação corresponde a quantidade de canais disponíveis para conexão pela operadora e à medida que as requisições são disponibilizadas é feita a contagem do número de requisições bloqueadas e das requisições aceitas, até que o número máximo de requisições seja obtido pela simulação.

A probabilidade de bloqueio neste caso corresponde a:

$$P_b = \frac{\text{requisições bloqueadas}}{\text{total de requisições}} \quad (2)$$

A modelagem do sistema realizada por meio da ferramenta NetLogo permitiu a simulação do comportamento dos usuários em um monopólio e de um duopólio, e a comparação com o modelo de Erlang B.

A modelagem do duopólio é feita de tal forma que cada operadora disponibiliza uma quantidade de canais, que serão alocados por um determinado tempo de vida, e as chegadas das requisições devem obedecer a uma distribuição de Poisson, de tal forma que, o duopólio pode ser representado por um sistema de Markov em Tempo Contínuo (CTMC), como é possível observar na Figura 1, para  $(W_1, W_2) = (3, 2)$  [Waldman et al., 2010].



**Figura 1.** Representação do modelo de Duopólio.

O sistema está no estado  $(i, j)$ , com  $0 \leq i \leq W_1$  e  $0 \leq j \leq W_2$ , quando a operadora 1 tiver  $i$  canais ocupados e a operadora 2 tiver  $j$  canais ocupados. Portanto, o número total de estados será  $(W_1 + 1)(W_2 + 1)$ . Assume-se que  $v_1$  e  $v_2$  são dados, e sua soma é dada por  $v = v_1 + v_2$ .

As alterações de estado somente podem ocorrer de um estado para seu estado mais próximo por meio de deslocamentos verticais e horizontais no diagrama de estados. Assim, dado um estado  $(i, j)$  qualquer, temos:

- No deslocamento vertical, a variável de estado  $j$  pode mudar para  $(j + 1)$  ou para  $(j - 1)$  se  $0 < j < W_2$ ; ou para 1 se  $j = 0$ ; ou para o estado  $W_2 - 1$  se  $j = W_2$ ;
- No deslocamento horizontal a variável de estado  $i$  pode mudar para  $(i + 1)$  ou para  $(i - 1)$  se  $0 < i < W_1$ ; ou para 1 se  $i = 0$ ; ou para  $W_1 - 1$  se  $i = W_1$ ;

Na simulação do duopólio a modelagem é realizada respeitando o modelo matemático estudado acima, onde as requisições geradas pelos usuários são direcionadas pela simulação para uma das duas operadoras. Esse direcionamento é efetuado aleatoriamente por meio de um algoritmo do tipo roleta, permitindo que a escolha da operadora A ou da operadora B seja feita de forma aleatória.

Cada operadora pode aceitar ou rejeitar a requisição, dependendo dos recursos disponíveis, caso aceite a requisição a operadora manterá um de seus canais ocupado por um tempo aleatório, respeitando uma distribuição de tempo exponencial; caso não aceite, a requisição será encaminhada para a segunda operadora que poderá aceitar ou rejeitar a requisição por um canal.

Caso a requisição seja aceita em sua rede primária, a mesma será contada como uma requisição aceita na operadora primária ( $req_{aceita}$ ); caso ela seja bloqueada na rede primária, mas aceita na rede secundária, a requisição será contada como um bloqueio na rede primária ( $req_{bloqueada}$ ).

## 5. Resultados e Discussão

### 5.1. Simulação de um monopólio

Inicialmente comparamos os resultados obtidos na simulação de um monopólio para um enlace avulso por meio de um SMA com os resultados analíticos obtidos por meio da equação de Erlang-B [Kumar et al., 2004].

Pode-se observar que os resultados obtidos nas Figuras 2 e 3 os comportamentos das probabilidades de bloqueio são semelhantes indicando consistência entre o modelo simulado e os resultados analíticos.

A probabilidade de bloqueio obtida na simulação é resultado da dimensão dos quadros adicionados no simulador NetLogo, obtendo assim a probabilidade de bloqueio para o enlace avulso e a comparação destes resultados com o modelo analítico de Erlang B.

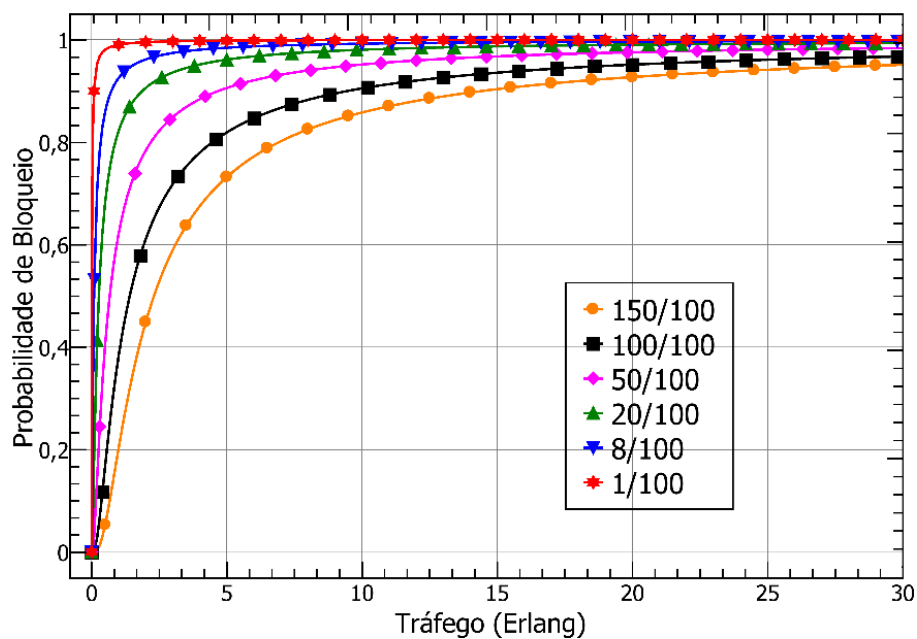
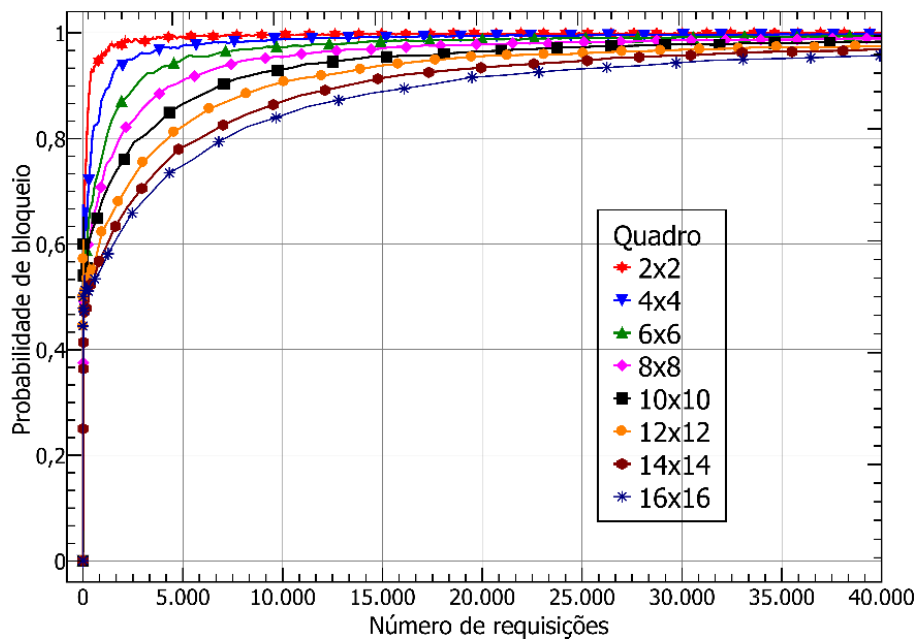


Figura 2. Gráfico da probabilidade de bloqueio obtida por meio do modelo de Erlang B.



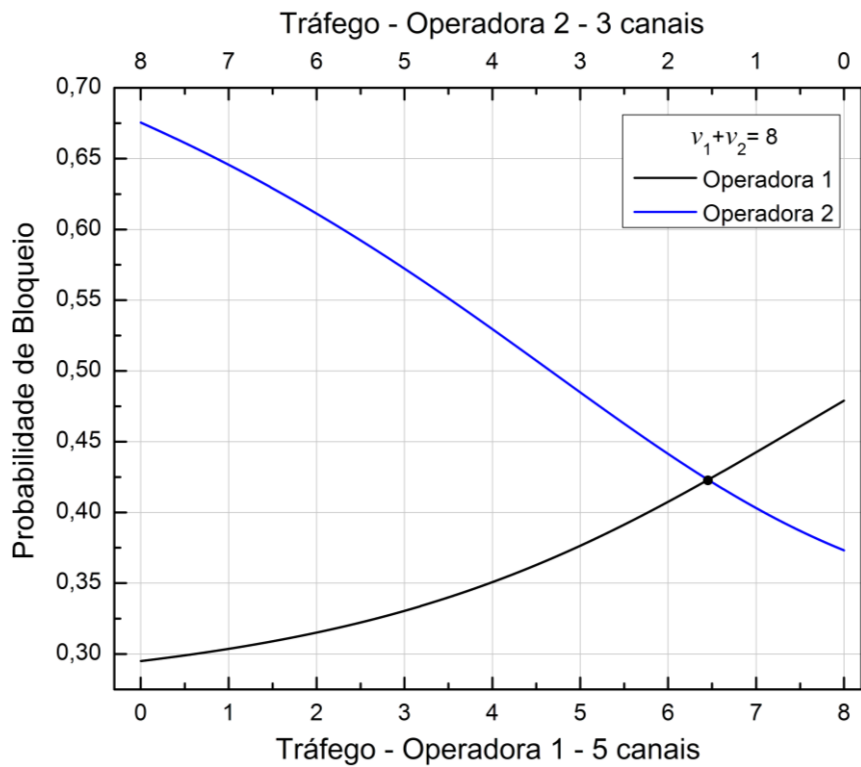


**Figura 3.** Gráfico da probabilidade de bloqueio obtido por meio de simulação baseada em sistemas multiagentes.

### 5.1. Simulação de um duopólio

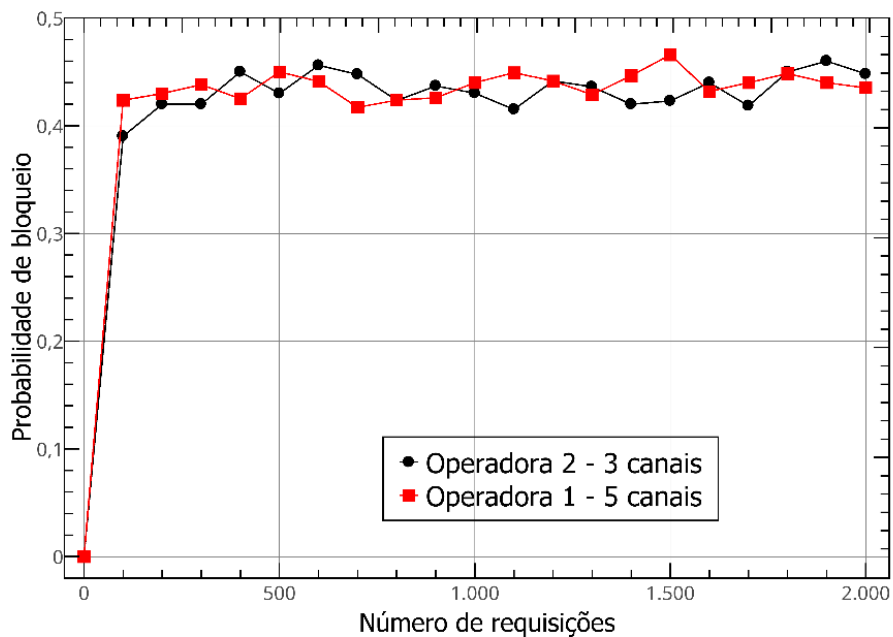
Na segunda simulação compara-se os resultados obtidos em um duopólio, onde duas operadoras buscam atender as requisições dos usuários que solicitam conexões no enlace avulso.

Nos trabalhos desenvolvidos por Waldman et al. (2010), os resultados analíticos para um enlace avulso com a operadora 1 com 5 canais e a operadora 2 com 3 canais, alcançou-se o equilíbrio de Nash com uma probabilidade de 0,43, que corresponde ao ponto em que nenhum dos usuários busca mudar de operadora, como pode ser observado na Figura 4.



**Figura 4.** Jogo entre usuários em equilíbrio de Nash no modelo de duopólio para  $(W_1, W_2) = (5,3)$ .

Na Figura 5, o equilíbrio de Nash foi obtido durante os momentos em que a probabilidade das duas operadoras se igualou, isso ocorreu quando a probabilidade de bloqueio era próxima a 0,42, acompanhando a probabilidade de bloqueio obtida em Waldman et al. (2010), conforme pode ser observado na Figura 4.



**Figura 5.** Simulação do modelo de duopólio em equilíbrio de Nash

Observa-se na Figura 5 que ocorreu equilíbrio de Nash de forma transitória em diversos pontos, representando a posição em que nenhum dos usuários na operadora 1 e na operadora 2 tem interesse de sair da operadora em que se encontram. Alguns desses pontos podem ser observados na Tabela 1 abaixo:

**TABELA 1.** Probabilidade de bloqueio obtido nos pontos em que se observa o equilíbrio de Nash

<b>Número de Requisições</b>	<b>Probabilidade de bloqueio (Pb)</b>
800	0,42
1200	0,44
1300	0,44
1600	0,43

## **6. Conclusões**

Este estudo desenvolveu um simulador baseado em SMA que replicou a probabilidade de bloqueio de um monopólio em um enlace avulso, calculado por meio da fórmula de Erlang B. Esses resultados podem ser observados nos gráficos comparativos da simulação e do modelo analítico estudado.

A diferença de comportamento observada entre o modelo analítico representado na Figura 2 e o modelo de simulação observado na Figura 3, deve-se ao fato de a amostra das requisições iniciais serem pequenas dificultando a obtenção dos valores iniciais de probabilidade de bloqueio, contudo à medida que a quantidade de requisições aumenta os resultados se aproximam.

Também foi desenvolvido um simulador para duopólio que permitiu comparar resultados analíticos com os resultados de simulação, validando assim os resultados alcançados.

Na Figura 5 pode-se observar os resultados de uma simulação utilizando sistemas multiagentes, com o objetivo de validar os resultados de simulação por meio da comparação com os resultados analíticos obtidos em trabalhos validados anteriormente.

## **Agradecimentos**

Os autores agradecem os suportes do projeto da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) Proc. 2015/24341-7 e do Projeto CNPq Proc. 304171/2017-4, bem como ao Programa Institucional de Bolsa de Iniciação Científica do

IFSP (PIBIFSP) pela concessão de bolsa de estudo que possibilitou o desenvolvimento do projeto que originou o presente artigo e ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – Câmpus Guarulhos pelo apoio e incentivo.

## Referências

- Abar, Sameera et al. Agent Based Modelling and Simulation tools: A review of the state-of-art software. *Computer Science Review*, v. 24, p. 13-33, 2017.
- Asmin, Bagabo Nantale; Semwanga, Agnes Rwashana; NGOMA, Muhammed. Agent-based modelling of response time to an advert: behaviour of different market segments in mobile telecommunication in Uganda. *Information Technologist (The)*, v. 16, n. 2, p. 71-84, 2019.
- Elreedy, Dina et al. A framework for an agent-based dynamic pricing for broadband wireless price rate plans. *Journal of Simulation*, v. 13, n. 2, p. 96-110, 2019.
- Kumar, Anurag; Manjunath, D.; Kuri, Joy. *Communication networking: an analytical approach*. Elsevier, 2004.
- Laffont, Jean-Jacques; Tirole, Jean. *Competition in telecommunications*. MIT press, 2001.
- Ormerod, Paul; Rosewell, Bridget. Validation and verification of agent-based models in the social sciences. *Epistemological aspects of computer simulation in the social sciences*, p. 130-140, 2009.
- Pereira, Marcelo de Carvalho; Dequech, David. A history-friendly model of the internet access market: the case of Brazil. In: *The evolution of economic and innovation systems*. Springer, Cham, 2015. p. 579-610.
- Pindyck, Robert S.; Rubinfeld, Daniel L. Microeconomics (Global ed., The Pearson series in economics). Harlow: Pearson, 2018.
- Railsback, Steven F.; Grimm, Volker. *Agent-based and individual-based modeling: a practical introduction*. Princeton university press, 2019.
- Soares, M.A. & Madeira, Edmundo. A multi-agent architecture for autonomic management of virtual networks. *2012 Ieee Network Operations And Management Symposium*, [s.l.], p.1183-1186, abr. 2012.
- Takahashi, Hiroki, Nariaki Nishino, and Takeshi Takenaka. "Multi-agent Simulation for the Manufacturer's Decision Making in Sharing Markets." *Procedia CIRP* 67 (2018): 546-551.
- Vega, Diego A., et al. "An Adaptive Trust Model for Achieving Emergent Cooperation in

Ad Hoc Networks." *Current Trends in Semantic Web Technologies: Theory and Practice*. Springer, Cham, 2019. 85-100.

Von Zuben, Fernando J. *Computação evolutiva: uma abordagem pragmática*. Tutorial: *Notas de Aula da disciplina IA707, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação-Universidade Estadual de Campinas*, 2000.

Waldman, Helio; Bortoletto, Rodrigo C.; Pavani, Gustavo S. *Um framework para dimensionamento de redes Óticas em ambientes competitivos*". *Proceedings 28º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)*, 2010.

Watson, Joel. *Strategy: an introduction to game theory*. New York: WW Norton, 2002.

Wilensky, Uri; Rand, William. *An introduction to agent-based modeling: modeling natural, social, and engineered complex systems with NetLogo*. MIT Press, 2015.