

# **Relatório - Simulador Discreto**

Gabriel Francelino Nascimento e Gabriel Piva Pereira

Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL

Disciplina: Análise de Desempenho

6° Período (2° Semestre de 2023)

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>2</b>
1.1	Contextualização da Lei de Little . . . . .	2
1.1.1	Erro de Little . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Descrição Geral da Simulação</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Cenários da Simulação</b>	<b>3</b>
3.1	Cálculo para Determinar a Quantidade de Pessoas . . . . .	3
3.1.1	60% de Ocupação . . . . .	3
3.1.2	80% de Ocupação . . . . .	4
3.1.3	90% de Ocupação . . . . .	4
3.1.4	99% de Ocupação . . . . .	4
3.2	Observação sobre os Valores: . . . . .	5
<b>4</b>	<b>Resultados da Simulação dos 4 Cenários</b>	<b>5</b>
4.1	Resultados do Cenário 1 (60%) . . . . .	5
4.2	Resultados do Cenário 2 (80%) . . . . .	5
4.3	Resultados do Cenário 3 (90%) . . . . .	5
4.4	Resultados do Cenário 4 (99%) . . . . .	6
<b>5</b>	<b>Gráficos das Simulações</b>	<b>6</b>
5.1	Gráficos Gerais . . . . .	6
5.1.1	Ocupação Calculada x Ocupação Simulada . . . . .	7
5.1.2	Ocupação Calculada x $E[N]$ . . . . .	8
5.1.3	Ocupação Calculada x $E[W]$ . . . . .	9
5.2	Erros de Little Coletados a Cada 10 segundos . . . . .	9
5.2.1	60% de Ocupação . . . . .	10
5.2.2	80% de Ocupação . . . . .	10
5.2.3	90% de Ocupação . . . . .	11
5.2.4	99% de Ocupação . . . . .	11
5.2.5	Comparação entre os Cenários . . . . .	12
<b>6</b>	<b>Conclusão</b>	<b>13</b>

# 1 Introdução

Este relatório descreve o desenvolvimento e a análise de um simulador discreto de eventos destinado a replicar um cenário de comunicação de VoIP por meio de um link dedicado, onde usuários realizam ligações e transmitem pacotes de dados.

O cenário simulado consiste em uma rede onde usuários iniciam chamadas de VoIP por meio de um roteador, utilizando um link dedicado. O intervalo entre as chegadas de usuários nesta rede segue uma distribuição exponencial, e uma vez que um usuário chega, ele inicia imediatamente uma nova ligação. A duração de cada ligação é modelada por uma distribuição exponencial, com uma média de 2 minutos.

Durante a vigência de uma chamada, os usuários enviam pacotes de dados a cada 20 milissegundos. Após o término da chamada, o usuário se desconecta. Cada pacote enviado possui um tamanho de 188 bytes, e considerando a largura de banda do link de 1Gbps, o tempo de serviço de cada pacote é determinado pelo seu atraso de transmissão.

Além disso, o relatório abordará a simulação em quatro cenários distintos, cada um representando uma taxa de ocupação específica (60%, 80%, 90% e 99%). As taxas de chegada de usuários correspondentes a esses níveis de ocupação foram calculadas e serão utilizadas como parâmetros no simulador para avaliar o sistema sob diferentes cargas de tráfego.

## 1.1 Contextualização da Lei de Little

A Lei de Little foi desenvolvida por John Little, professor do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT), em 1954, e sua prova formal foi publicada em 1961. Little demonstrou que essa relação se mantém em qualquer situação de fila, tornando-a uma ferramenta valiosa para análise e otimização de sistemas de filas.

Além de sua aplicação em teoria das filas, a Lei de Little também é utilizada em contextos como Lean e Six Sigma, onde é reformulada para calcular o tempo de liderança do processo (PLT) através da divisão do trabalho em processo (WIP) pela taxa de saída (ER). Este método tem sido aplicado em cenários práticos variados, desde a escolha de filas em parques de diversões até a análise e melhoria de processos em lojas online e outros ambientes de negócios.

### 1.1.1 Erro de Little

O Erro de Little é um conceito importante na teoria das filas, que descreve a relação entre três componentes essenciais em um sistema de fila: o número médio de clientes na fila ( $L$ ), o tempo médio que um cliente passa no sistema ( $W$ ) e a taxa média de chegada de clientes ( $\lambda$ ).

A fórmula associada ao erro de Little é expressa como:

$$L = \lambda \times W$$

Isso significa que o número médio de clientes na fila ( $L$ ) é igual à taxa média de chegada de clientes ( $\lambda$ ) multiplicada pelo tempo médio que um cliente passa no sistema ( $W$ ). Mesmo que essa fórmula seja simples, ela é poderosa e aplicável a uma variedade de sistemas de fila.

Esse conceito é útil em simulações de filas, pois permite que os analistas compreendam a relação entre a taxa de chegada de clientes, o tempo médio de serviço e o tamanho médio da fila. É fundamental para o dimensionamento adequado de sistemas, o planejamento de capacidade e a otimização de processos em vários campos, como operações de call center, serviços bancários, tráfego de redes de computadores, entre outros.

## 2 Descrição Geral da Simulação

### Tempo de Simulação:

- 432.000 segundos (equivalente a 5 dias).

Obs: A diminuição do tempo de simulação proposto (de 10 dias) foi devido ao tempo longo de execução demandado nos cenários mais altos. Preferimos fazer o mesmo tempo de execução para todos para manter a possibilidade de comparação entre os gráficos. Com durações diferentes a comparação seria dificultada.

### Medidas de Desempenho:

As medidas que serão capturadas e utilizadas para avaliar a simulação nos 4 cenários são as seguintes:

- Tamanho máximo da fila.
- Ocupação: Taxa de utilização do servidor.
- $E[N]$ : Número médio de pacotes juntos no sistema.
- $E[W]$ : Tempo médio que um pacote passa no sistema.
- Erro de Little: Erro entre  $E[N]$  e  $E[W]$  baseado no teorema de Little.

## 3 Cenários da Simulação

Nossa simulação consiste em quatro cenários distintos, cada um com o objetivo de alcançar uma taxa de ocupação específica do link dedicado de 1Gbps.

Em cada cenário, precisamos encontrar a quantidade de pessoas necessárias para que o link seja ocupado na porcentagem desejada. Com esse número de pessoas, conseguiremos consequentemente a taxa de chegada por segundo de pessoas necessária para cada cenário.

Para estabelecer essa quantidade de pessoas e a taxa, primeiramente calculamos o número de pacotes por segundo por pessoa, considerando o intervalo entre as ligações e o tamanho dos pacotes.

- Um pacote a cada 20 milissegundos implica em 50 pacotes por segundo por pessoa.
- Considerando um pacote de 188 bytes, isso resulta em 9400 bytes por pessoa por segundo.
- Convertendo os bytes para gigabits, obtemos  $7,52 * 10^{-5}$  gigabits por segundo por pessoa.

A partir desses valores, determinamos a quantidade de pessoas necessárias para atingir cada nível de ocupação específico do link dedicado.

### 3.1 Cálculo para Determinar a Quantidade de Pessoas

Para calcular a quantidade de pessoas necessárias em cada cenário, consideramos a ocupação do link de 1 Gbps como a utilização dele em  $x\%$  do tempo, sendo  $x$  a ocupação do cenário. Usaremos a variável  $y$  para a quantidade de pessoas necessárias.

#### 3.1.1 60% de Ocupação

Para alcançar 60% de ocupação do link de 1 Gbps, precisamos utilizar 600 Mbps dos 1 Gbps disponíveis. Utilizando a quantidade de gigabits por pessoa por segundo de  $7,52 * 10^{-5}$ , calculamos a quantidade necessária de pessoas.

### Cálculos:

- 600 Mbps = 0.6 Gbps.
- 60% de 1 Gbps = 0.6 Gbps.

- $xGbps/1Gbps = 0.6 \rightarrow x = 0.6$  Gbps.
- $7,52 * 10^{-5} * y = 0.6 \rightarrow y = 600/7,52 * 10^{-5}$ .
- $y = 7978.7234 \approx 7979$  pessoas necessárias no link para para atingir 60% de ocupação.
- Taxa de Chegada:  $7978.7234/120 \approx 67$  pessoas por segundo.

### 3.1.2 80% de Ocupação

Para alcançar 80% de ocupação do link de 1 Gbps, precisamos utilizar 800 Mbps dos 1 Gbps disponíveis. Utilizando a quantidade de gigabits por pessoa por segundo de  $7,52*10^{-5}$ , calculamos a quantidade necessária de pessoas.

#### Cálculos:

- 800 Mbps = 0.8 Gbps.
- 80% de 1 Gbps = 0.8 Gbps.
- $xGbps/1Gbps = 0.8 \rightarrow x = 0.8$  Gbps.
- $7,52 * 10^{-5} * y = 0.8 \rightarrow y = 800/7,52 * 10^{-5}$ .
- $y = 10638.29787 \approx 10639$  pessoas necessárias no link para para atingir 80% de ocupação.
- Taxa de Chegada:  $10638.29787/120 \approx 89$  pessoas por segundo.

### 3.1.3 90% de Ocupação

Para alcançar 90% de ocupação do link de 1 Gbps, precisamos utilizar 900 Mbps dos 1 Gbps disponíveis. Utilizando a quantidade de gigabits por pessoa por segundo de  $7,52*10^{-5}$ , calculamos a quantidade necessária de pessoas.

#### Cálculos:

- 900 Mbps = 0.9 Gbps.
- 90% de 1 Gbps = 0.9 Gbps.
- $xGbps/1Gbps = 0.9 \rightarrow x = 0.9$  Gbps.
- $7,52 * 10^{-5} * y = 0.9 \rightarrow y = 900/7,52 * 10^{-5}$ .
- $y = 11968.08511 \approx 11969$  pessoas necessárias no link para para atingir 90% de ocupação.
- Taxa de Chegada:  $11968.08511/120 \approx 100$  pessoas por segundo.

### 3.1.4 99% de Ocupação

Para alcançar 99% de ocupação do link de 1Gbps, precisamos utilizar 990 Mbps dos 1 Gbps disponíveis. Utilizando a quantidade de gigabits por pessoa por segundo de  $7,52*10^{-5}$ , calculamos a quantidade necessária de pessoas.

#### Cálculos:

- 990 Mbps = 0.99 Gbps.
- 99% de 1 Gbps = 0.99 Gbps.
- $xGbps/1Gbps = 0.99 \rightarrow x = 0.99$  Gbps.
- $7,52 * 10^{-5} * y = 0.99 \rightarrow y = 990/7,52 * 10^{-5}$ .
- $y = 13164.89362 \approx 13165$  pessoas necessárias no link para para atingir 99% de ocupação.
- Taxa de Chegada:  $13164.89362/120 \approx 110$  pessoas por segundo.

### 3.2 Observação sobre os Valores:

É importante ressaltar que os valores apresentados neste relatório foram arredondados para a quantidade de pessoas necessárias e suas respectivas taxas de chegada. No entanto, no código do simulador, todos os cálculos serão realizados sem arredondamento, utilizando o maior número de casas decimais disponíveis no compilador.

Ao realizar a simulação, os cálculos serão executados com precisão máxima, garantindo resultados mais precisos e detalhados do que os valores arredondados apresentados neste relatório.

## 4 Resultados da Simulação dos 4 Cenários

O simulador permite a seleção do cenário desejado com base na taxa de ocupação pretendida e executa a simulação correspondente. Após a conclusão de cada simulação, as métricas de validação são exibidas no console e registradas em um arquivo separado no formato .csv. Além disso, durante a simulação, o erro de Little é monitorado a cada intervalo de 10 segundos para cada cenário. O código-fonte foi desenvolvido em C++ e está disponível no repositório do Github. Os resultados obtidos foram coletados e serão apresentados agora, exibindo as métricas de interesse discutidas anteriormente.

### 4.1 Resultados do Cenário 1 (60%)

#### Resultados das medidas de desempenho:

- Tamanho Máximo da Fila: 23.
- Ocupação Simulada: 0.59979983491774002680.
- $E[N] = 1.04919240187749052140$ .
- $E[W] = 0.00001175590807413436$ .
- Erro de Little Final: 3.63910389441880566253.
- Seed: 1702244814.
- Tempo de Execução: 24868.9 segundos.

### 4.2 Resultados do Cenário 2 (80%)

#### Resultados das medidas de desempenho:

- Tamanho Máximo da Fila: 53.
- Ocupação Simulada: 0.7993369083.
- $E[N] = 2.390029227$ .
- $E[W] = 0.000004532171576$ .
- Erro de Little Final: 4.79875144907322592758.
- Seed: 1702249722.
- Tempo de Execução: 41186 segundos.

### 4.3 Resultados do Cenário 3 (90%)

#### Resultados das medidas de desempenho:

- Tamanho Máximo da Fila: 75.
- Ocupação Simulada: 0.89949551376617331577.

- $E[N] = 4.92597621445488442760$ .
- $E[W] = 0.00004737397034576389$ .
- Erro de Little Final: 23.40676452628585479943.
- Seed: 1702282930.
- Tempo de Execução: 35853.7 segundos.

#### 4.4 Resultados do Cenário 4 (99%)

##### Resultados das medidas de desempenho:

- Tamanho Máximo da Fila: 3486776.
- Ocupação Simulada: 0.98954542979448767426.
- $E[N] = 66930.54623750173777807504$ .
- $E[W] = 0.10177072355820353244$ .
- Erro de Little Final: 28.28854027604393195361.
- Seed: 1702250880.
- Tempo de Execução: 55060.2 segundos.

Os dados obtidos a partir das simulações de cada cenário oferecem uma visão abrangente do comportamento do sistema frente a diferentes níveis de ocupação. Conforme a taxa de ocupação varia, surgem mudanças notáveis na dinâmica do sistema. O aumento da taxa de ocupação se reflete tanto no incremento da carga de pacotes no sistema quanto no tempo médio de transmissão dos mesmos. Além disso, a avaliação do erro de Little proporciona uma compreensão da precisão das estimativas geradas para a carga de pacotes e o tempo de transmissão, comparadas aos valores teóricos.

## 5 Gráficos das Simulações

Os gráficos das simulações foram criados por meio da linguagem Python e gerados no formato SVG. Para gerar esses gráficos, os dados dos arquivos CSV, gerados durante as simulações, foram importados e utilizados como base. Cada cenário possui dois arquivos CSV correspondentes: um contendo os resultados globais da simulação, como a ocupação simulada,  $E[N]$ ,  $E[W]$  e outras métricas, e outro arquivo com os valores do erro de Little calculado a cada intervalo de 10 segundos. Esses arquivos foram empregados na geração dos gráficos, permitindo uma visualização detalhada e uma análise mais aprofundada dos resultados das simulações. O código em Python utilizado para criar esses gráficos está disponível para acesso no Google Colab.

### 5.1 Gráficos Gerais

Esta subseção apresenta três gráficos gerais resultantes das simulações, os quais comparam 3 métricas de validação nos quatro cenários estudados, comparando os resultados entre os cenários. Cada gráfico segue um padrão semelhante: a ocupação calculada é representada no eixo X, enquanto uma métrica específica é exibida no eixo Y. Cada ponto nos gráficos corresponde a um dos quatro cenários simulados.

Os três gráficos presentes nesta seção são os seguintes: Ocupação Calculada x Ocupação Simulada, Ocupação Calculada x  $E[N]$  (quantidade média de pacotes no sistema), e Ocupação Calculada x  $E[W]$  (tempo médio de envio dos pacotes). Cada um desses gráficos oferece uma análise comparativa entre a ocupação prevista e as métricas  $E[N]$  e  $E[W]$  para os diferentes cenários simulados.

### 5.1.1 Ocupação Calculada x Ocupação Simulada

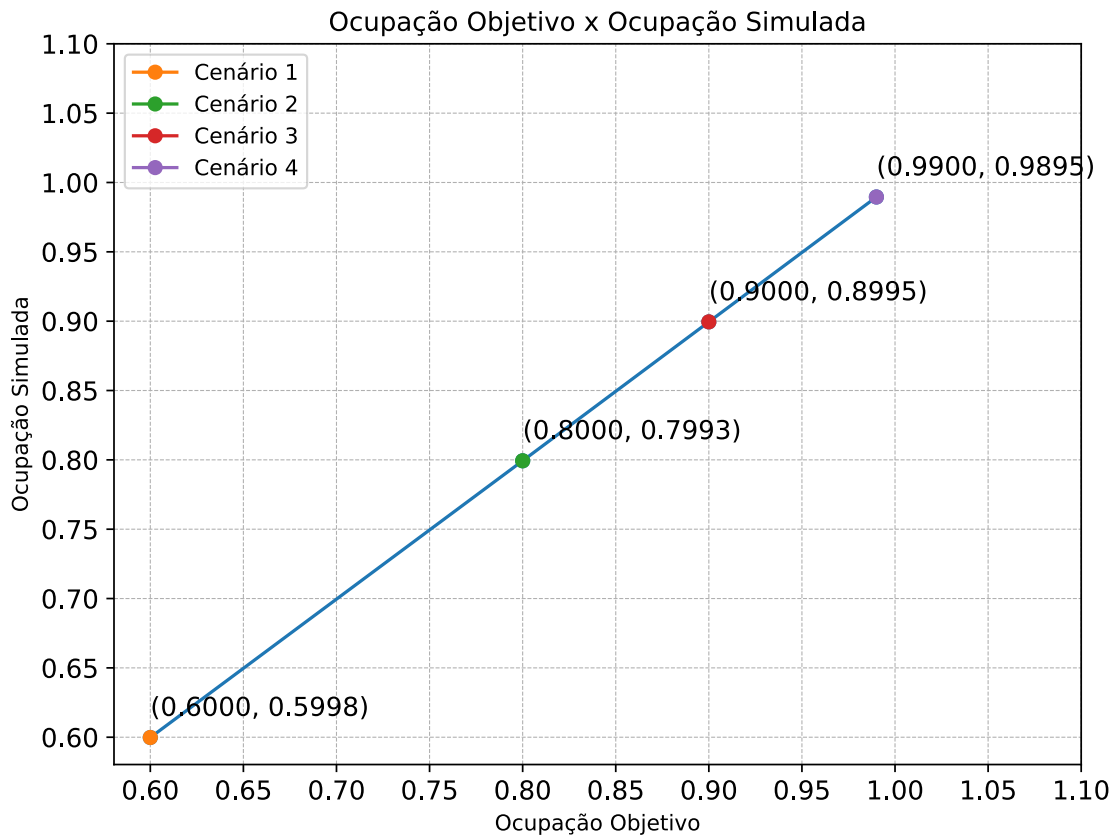


Figura 1: Gráfico da Ocupação Calculada (Objetivo) x Ocupação Simulada, juntando os resultados dos 4 cenários.

Este gráfico compara a ocupação calculada (objetivo) com a ocupação simulada para os quatro cenários. A proximidade entre os valores calculados e simulados demonstra a eficácia do simulador em replicar as condições desejadas de ocupação do link dedicado. É um indicativo da precisão do simulador em modelar realidades de carga de rede distintas.



### 5.1.2 Ocupação Calculada x $E[N]$

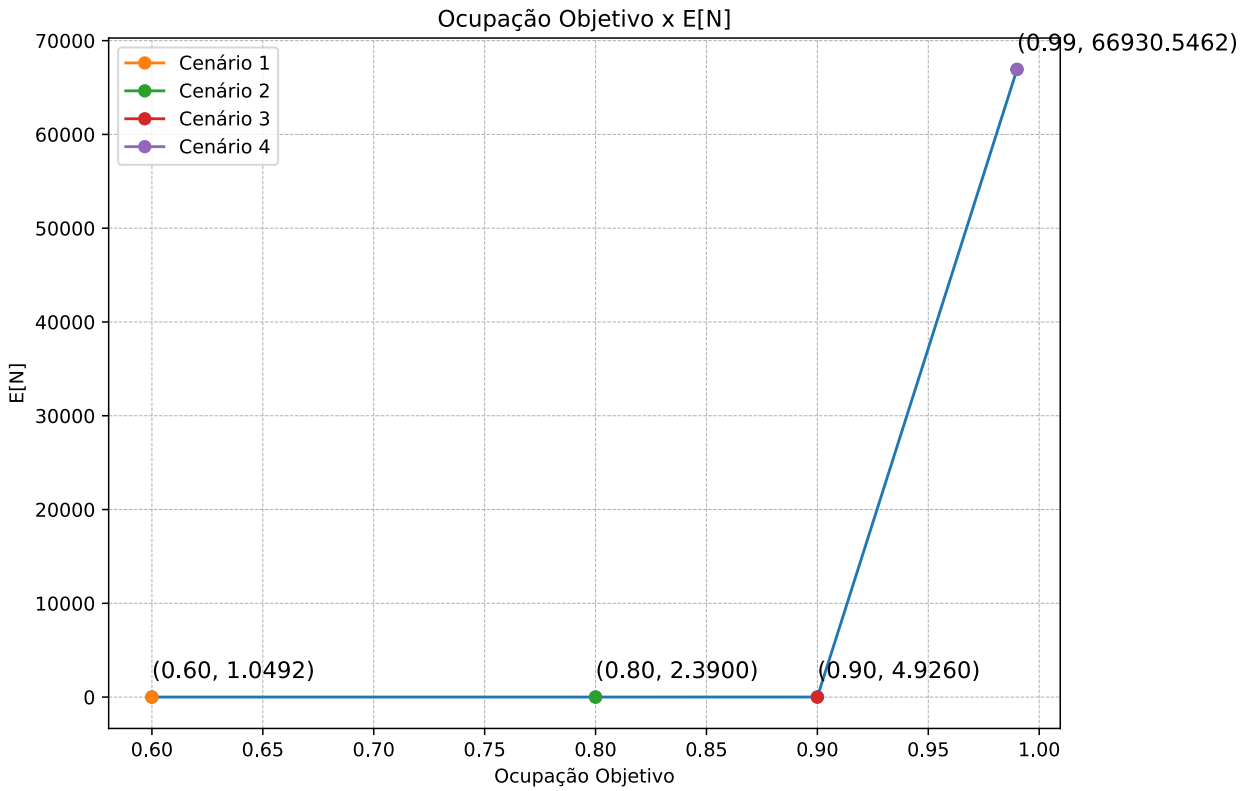


Figura 2: Gráfico da Ocupação Calculada (Objetivo) x  $E[N]$ , juntando os resultados dos 4 cenários.

Este gráfico mostra a relação entre a ocupação calculada e o número médio de pacotes no sistema ( $E[N]$ ) para cada cenário. A variação de  $E[N]$  com o aumento da ocupação proporciona uma visão clara de como a carga de rede afeta a quantidade de pacotes em trânsito, sendo fundamental para entender a dinâmica da rede sob diferentes condições de carga.

### 5.1.3 Ocupação Calculada x $E[W]$

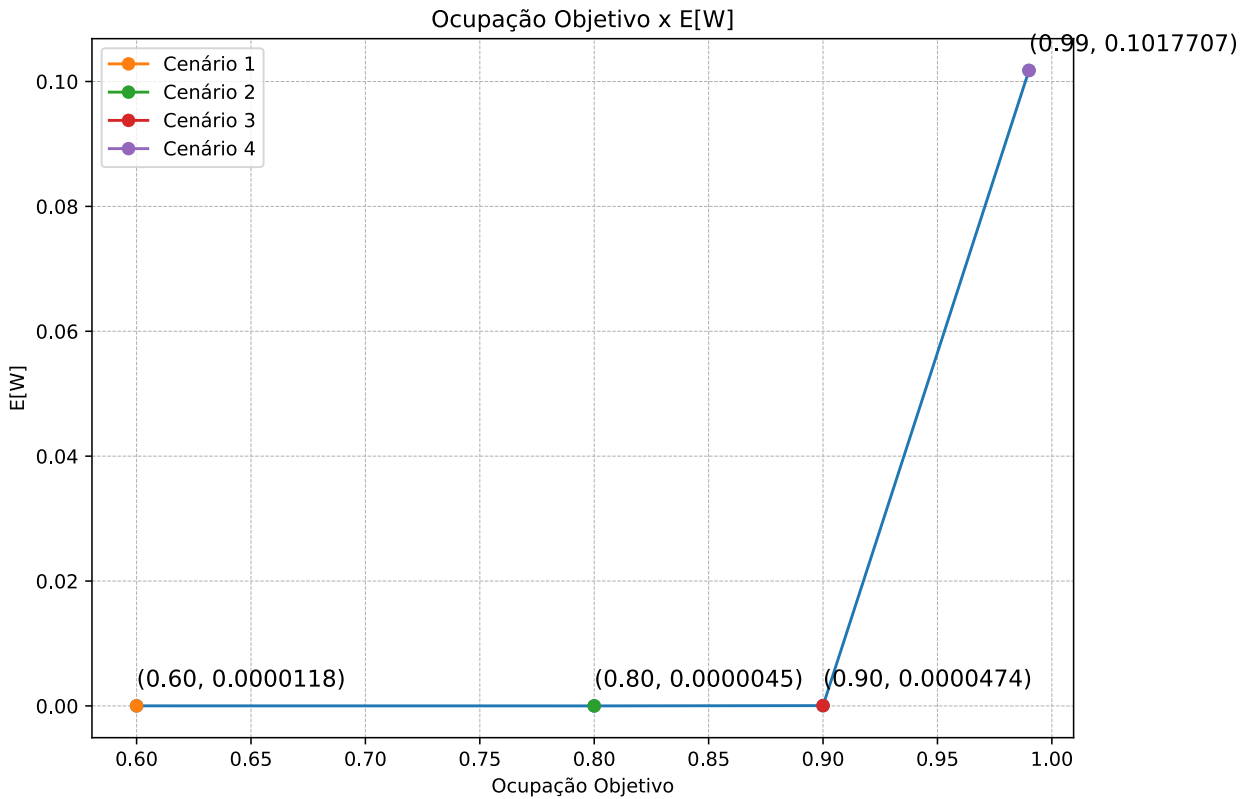


Figura 3: Gráfico da Ocupação Calculada (Objetivo) x  $E[W]$ , juntando os resultados dos 4 cenários.

Aqui, o foco é na relação entre a ocupação calculada e o tempo médio que um pacote passa no sistema ( $E[W]$ ). Este gráfico é essencial para avaliar o impacto da ocupação do link na eficiência do sistema, indicando como o aumento da carga afeta o tempo de processamento dos pacotes.

## 5.2 Erros de Little Coletados a Cada 10 segundos

Nesta subseção, são apresentados os gráficos que registram os erros de Little ao longo da simulação em cada cenário, coletados a intervalos de 10 segundos. Cada gráfico exibe a relação entre o erro de Little (no eixo Y) e o tempo decorrido (em segundos) durante a simulação (no eixo X).

Para cada cenário simulado, um gráfico específico é apresentado, oferecendo uma visualização detalhada da variação do erro de Little ao longo do tempo para cada caso de estudo. Assim, há um total de quatro gráficos nessa subseção, cada um representando o erro de Little em função do tempo para um cenário particular. Por fim, também há dois gráficos que juntam os 4 gráficos anteriores para comparação, mostrando as 4 curvas dos 4 cenários simultaneamente.

### 5.2.1 60% de Ocupação

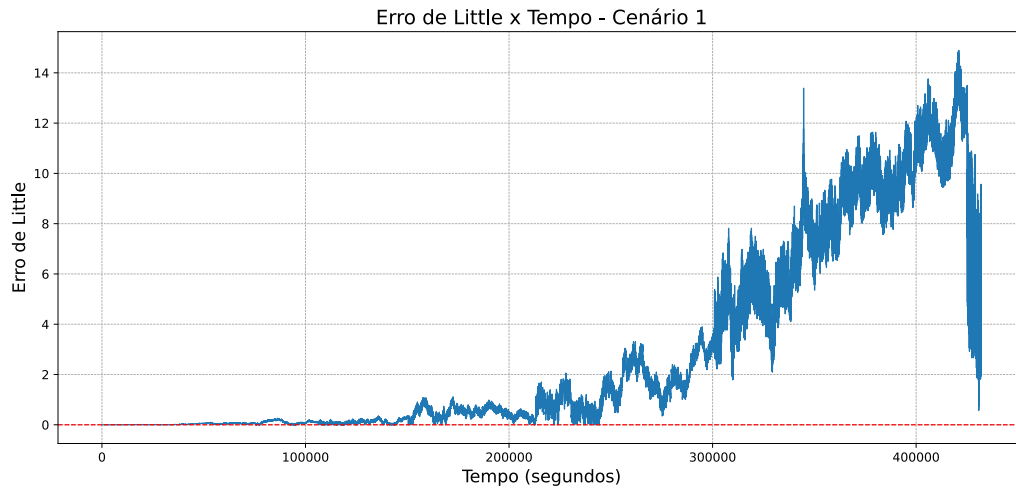


Figura 4: Gráfico dos Erros de Little x Tempo (segundos), do cenário 1.

Este gráfico mostra a variação do erro de Little ao longo do tempo no cenário com 60% de ocupação. O gráfico revela como o erro oscila e tende a se estabilizar à medida que a simulação progride. Este padrão indica a precisão do simulador em condições de carga moderada e sua capacidade de replicar o comportamento esperado de uma rede VoIP com uma ocupação de 60%.

### 5.2.2 80% de Ocupação

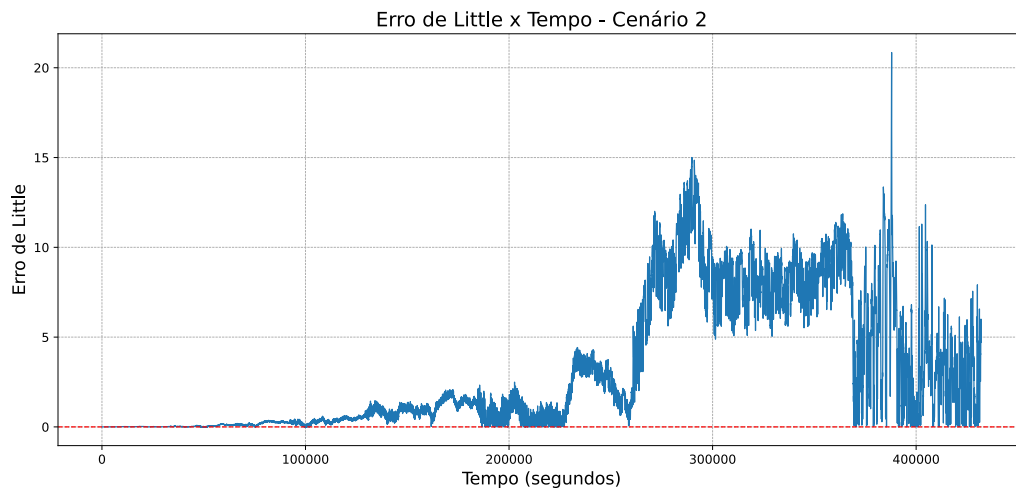


Figura 5: Gráfico dos Erros de Little x Tempo (segundos), do cenário 2.

O gráfico correspondente ao cenário de 80% de ocupação exibe um comportamento similar ao da figura anterior, porém com variações mais pronunciadas no erro de Little. Isso sugere que, à medida que a ocupação

do link aumenta, o sistema torna-se mais sensível, refletindo desafios adicionais na manutenção da eficiência e estabilidade da rede.

### 5.2.3 90% de Ocupação

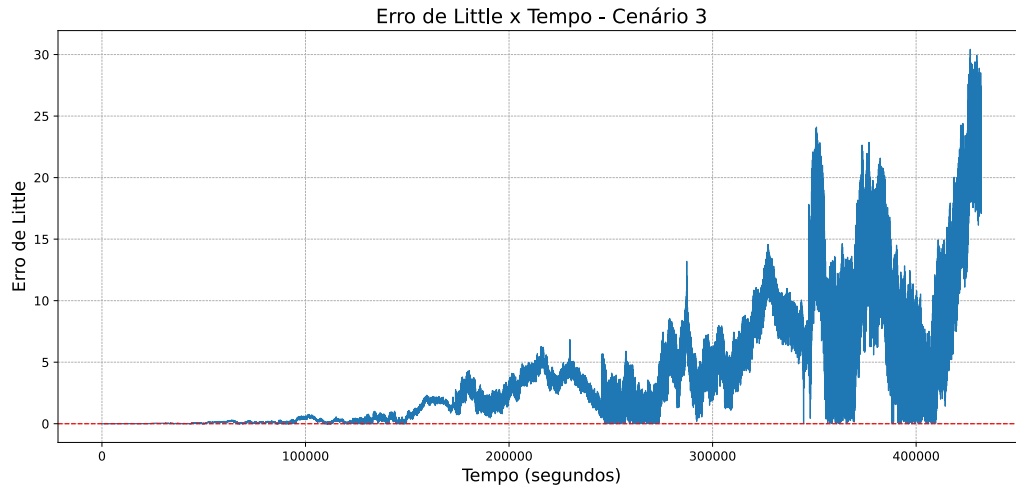


Figura 6: Gráfico dos Erros de Little x Tempo (segundos), do cenário 3.

Neste cenário, o gráfico mostra uma variação mais significativa do erro de Little em comparação com os cenários de menor ocupação. A maior flutuação indica desafios crescentes em manter a eficiência da rede sob altas cargas, um fator crucial para o planejamento de capacidade e gestão de redes VoIP

### 5.2.4 99% de Ocupação

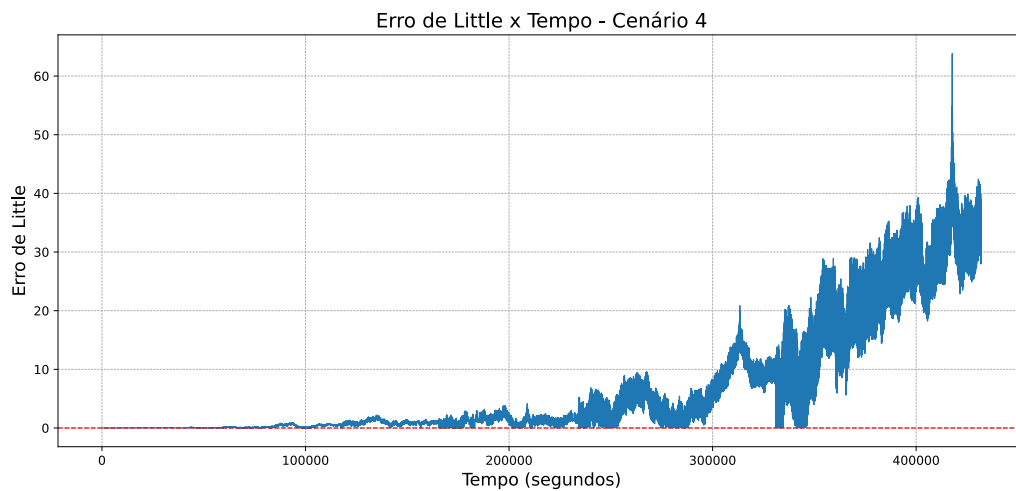


Figura 7: Gráfico dos Erros de Little x Tempo (segundos), do cenário 4.

O gráfico para o cenário de ocupação mais alta (99%) apresenta as maiores variações no erro de Little. Isso ilustra como um sistema de rede sob extrema carga pode experimentar variações significativas em termos de desempenho e eficiência. Este cenário é particularmente relevante para testar os limites do simulador e entender como a rede se comporta sob condições de quase saturação.

### 5.2.5 Comparação entre os Cenários

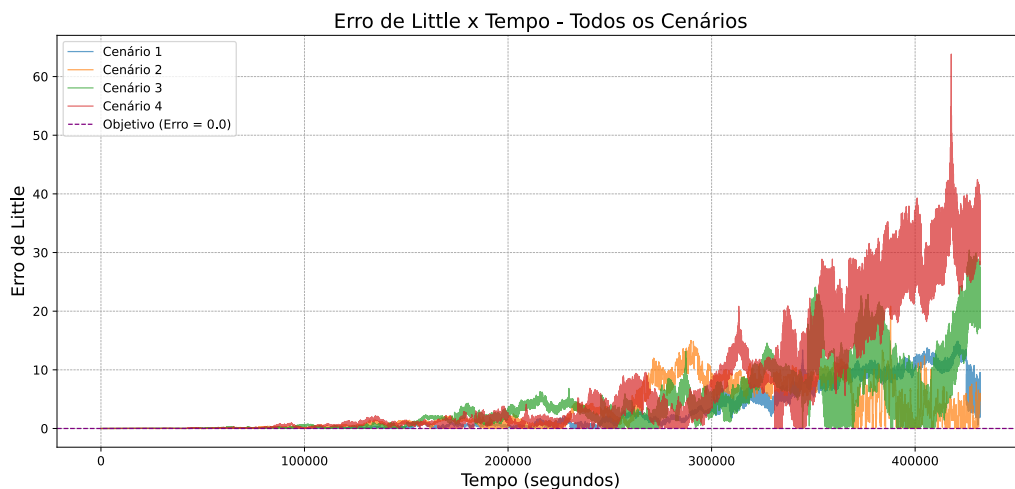


Figura 8: Gráfico de comparação dos Erros de Little x Tempo (segundos), dos 4 cenários juntos.

Este gráfico combina os dados dos quatro cenários anteriores em uma única visualização. Oferece uma comparação direta do comportamento do Erro de Little em diferentes taxas de ocupação, proporcionando uma visão integrada do desempenho do simulador nos 4 cenários.

Como são muitos valores e muita variação nas curvas, a comparação dos valores fica comprometida com o gráfico sem nenhuma modificação, apenas apresentando os valores diretamente. Uma alternativa de solução é mostrar o gráfico criando as curvas fazendo a média do erro em um intervalo de tempo, para suavizar as curvas e conseguir uma comparação mais clara. O gráfico abaixo realiza o mesmo objetivo de comparação do gráfico anterior, porém fazendo a média dos valores a cada 2000 segundos, e assim fornecendo uma visualização mais suavizada.

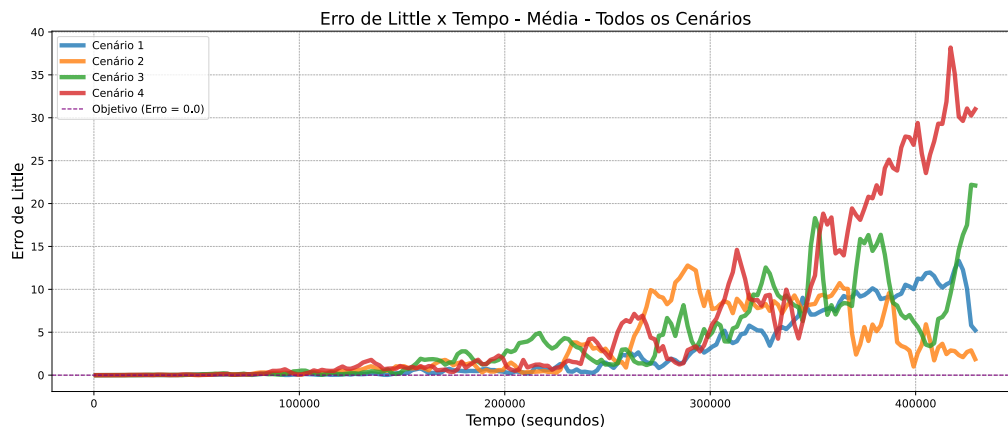


Figura 9: Gráfico de comparação dos Erros de Little x Tempo (Média a cada 2000 segundos), dos 4 cenários juntos.

## 6 Conclusão

O estudo realizado com o simulador discreto de eventos para análise de redes VoIP destaca a importância de compreender as implicações da ocupação de links dedicados no desempenho das comunicações VoIP. Através da simulação para os cenários de 60%, 80%, 90% e 99% de ocupação, foi possível observar que um aumento na taxa de ocupação leva a um incremento no tempo de transmissão de pacotes. Este resultado ressalta a necessidade crítica de gerenciar adequadamente a carga na rede para manter a qualidade e eficiência das chamadas VoIP, sendo um ponto crucial para o planejamento e otimização de infraestruturas de telecomunicações.

A utilização do erro de Little como uma métrica de validação enfatiza a precisão e a confiabilidade do simulador. A comparação entre os resultados simulados e as teorias estabelecidas demonstra que o simulador é uma ferramenta eficaz para prever o comportamento de redes VoIP em diferentes condições de carga. Esta confiabilidade é essencial, pois garante que as projeções e otimizações baseadas nos dados do simulador sejam aplicáveis a cenários reais de redes de telecomunicações.

Em conclusão, o estudo proporciona insights valiosos sobre o impacto da ocupação de links na qualidade das redes VoIP. Os achados do simulador são fundamentais para o desenvolvimento, planejamento e otimização de redes, destacando a importância de uma gestão equilibrada de carga. A precisão do simulador, validada pelo erro de Little, assegura sua utilidade em futuras investigações e aplicações práticas no campo da engenharia de telecomunicações.

## Referências

- [1] FELDMAN, K. Little's Law: A powerful metric for process analysis. Disponível em: <https://www.isixsigma.com/dictionary/littles-law/>. Acesso em: 12 dez. 2023.
- [2] Corporate Finance Institute. Little's Law - Defined, Formula, Example, Origin. Disponível em: <https://corporatefinanceinstitute.com/resources/knowledge/other/littles-law/>. Acesso em: 11 dez. 2023.
- [3] Wikipedia. Little's Law. Disponível em: [https://en.wikipedia.org/wiki/Little%27s\\_law](https://en.wikipedia.org/wiki/Little%27s_law). Acesso em: 11 dez. 2023.