

MODELAÇÃO E DESEMPENHO DE REDES E SERVIÇOS

MINI-PROJETO 1

Eduardo Alves: nºmec 104179

Mariana Silva: nºmec 98392



eduardoalves@ua.pt
marianabarbara@ua.pt

[Link Repositório GitHub](#)

Universidade de Aveiro
Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática
2025

Contents

| | | |
|----------|-------------------------|----------|
| 1 | Notas Gerais | 4 |
| 2 | Introdução | 4 |
| 3 | Task 1 | 6 |
| 3.1 | Exercício 1a | 6 |
| 3.1.1 | Contexto | 6 |
| 3.1.2 | Implementação | 6 |
| 3.1.3 | Resultados | 7 |
| 3.1.4 | Conclusões | 9 |
| 3.2 | Exercicio 1b | 10 |
| 3.2.1 | Contexto | 10 |
| 3.2.2 | Implementação | 10 |
| 3.2.3 | Resultados | 10 |
| 3.3 | Exercicio 1c | 11 |
| 3.3.1 | Contexto | 11 |
| 3.3.2 | Implementação | 11 |
| 3.3.3 | Resultados | 11 |
| 3.4 | Exercicio 1d | 12 |
| 3.4.1 | Contexto | 12 |
| 3.4.2 | Implementação | 12 |
| 3.4.3 | Resultados | 12 |
| 3.5 | Exercicio 1e | 13 |
| 3.5.1 | Contexto | 13 |
| 3.5.2 | Implementação | 13 |
| 3.5.3 | Resultados | 13 |
| 3.6 | Exercicio 1f | 14 |
| 3.6.1 | Contexto | 14 |
| 3.6.2 | Implementação | 14 |
| 3.6.3 | Resultados | 14 |
| 3.7 | Exercicio 1g | 15 |
| 3.7.1 | Contexto | 15 |
| 3.7.2 | Implementação | 15 |
| 3.7.3 | Resultados | 15 |
| 3.8 | Exercicio 1h | 16 |
| 3.8.1 | Contexto | 16 |
| 3.8.2 | Implementação | 16 |
| 3.8.3 | Resultados | 16 |
| 3.9 | Exercicio 1i | 17 |
| 3.9.1 | Contexto | 17 |
| 3.9.2 | Implementação | 17 |
| 3.9.3 | Resultados | 17 |
| 3.10 | Exercicio 1j | 18 |
| 3.10.1 | Contexto | 18 |
| 3.10.2 | Implementação | 18 |
| 3.10.3 | Resultados | 18 |

| | |
|-------------------------------|-----------|
| 4 Parte 2 | 19 |
| 4.1 Exercicio 2a | 19 |
| 4.1.1 Contexto | 19 |
| 4.1.2 Implementação | 19 |
| 4.1.3 Resultados | 19 |
| 4.2 Exercicio 2b | 20 |
| 4.2.1 Contexto | 20 |
| 4.2.2 Implementação | 20 |
| 4.2.3 Resultados | 20 |
| 4.3 Exercicio 2c | 21 |
| 4.3.1 Contexto | 21 |
| 4.3.2 Implementação | 21 |
| 4.3.3 Resultados | 21 |
| 4.4 Exercicio 2d | 22 |
| 4.4.1 Contexto | 22 |
| 4.4.2 Implementação | 22 |
| 4.4.3 Resultados | 22 |
| 4.5 Exercicio 2e | 23 |
| 4.5.1 Contexto | 23 |
| 4.5.2 Implementação | 23 |
| 4.5.3 Resultados | 23 |

List of Figures

| | | |
|---|--|---|
| 1 | 1a) Perda média de pacotes em função da taxa de chegada (λ) | 7 |
| 2 | 1a) Atraso médio de pacotes em função da taxa de chegada (λ) | 8 |
| 3 | 1a) Resultados em formato de linha de comandos. | 8 |

1 Notas Gerais

- Todos os membros do grupo contribuíram de forma equilibrada e ativa para o desenvolvimento deste projeto, participando nas fases de planeamento, implementação e testes. O trabalho foi realizado de forma colaborativa, garantindo uma divisão justa das tarefas e a integração das ideias de todos os elementos.
- O repositório completo do projeto encontra-se disponível no seguinte link:
https://github.com/marianabarbara/MDRS_Projects
- Foram realizados testes funcionais e de integração para garantir o correto funcionamento do sistema e a coerência entre os diferentes módulos.
- É importante salientar que, embora o repositório do projeto tenha permanecido privado durante o seu desenvolvimento, foi disponibilizado publicamente perto do período de entrega para efeitos de avaliação.

2 Introdução

O objetivo deste projeto é analisar e avaliar o desempenho de ligações ponto-a-ponto que suportam serviços de pacotes, recorrendo à modelação e simulação de diferentes cenários em *MATLAB*. Pretende-se compreender o impacto de diversos parâmetros de rede, tais como capacidade do canal, tamanho médio dos pacotes e taxa de chegada no desempenho global do sistema, nomeadamente no que diz respeito à perda média de pacotes, ao atraso médio e à eficiência do enlace.

O projeto será dividido em duas tarefas principais, cada uma com objetivos e componentes específicos. Em todas as simulações, serão realizadas 50 execuções independentes com um critério de paragem de $P = 100\,000$, sendo posteriormente calculados os valores estimados e os intervalos de confiança a 90%, apresentados sob a forma de gráficos de barras com barras de erro.

- **Task 1** Nesta fase será avaliado o desempenho de um sistema de transmissão ponto-a-ponto através do desenvolvimento e adaptação de simuladores orientados a eventos (**Simulator1**, **Simulator1A** e **Simulator1B**). O principal objetivo é analisar o comportamento do sistema sob diferentes condições de tráfego e políticas de enfileiramento, bem como comparar os resultados obtidos por simulação com valores teóricos derivados de modelos analíticos de filas (*queueing models*).
 - **1a:** Estimar, por simulação, a perda média de pacotes e o atraso médio para diferentes taxas de chegada λ , considerando pacotes com tamanho médio de $f = 1\,000\,000$ Bytes.
 - **1b:** Repetir as experiências anteriores considerando $f = 10\,000$ Bytes e analisar as diferenças observadas em relação à alínea anterior.
 - **1c:** Desenvolver uma nova versão do simulador, denominada **Simulator1A**, capaz de calcular separadamente os parâmetros de desempenho para pacotes com tamanhos específicos (64, 110 e 1518 Bytes).
 - **1d:** Utilizar o **Simulator1A** para estimar a perda média e o atraso médio, tanto para o conjunto total de pacotes como para cada um dos três tamanhos especiais.

- 1e: Determinar, através de um modelo analítico M/G/1, os valores teóricos correspondentes e compará-los com os resultados obtidos por simulação.
 - 1f: Repetir as experiências de 1d para $f = 10\,000$ Bytes e justificar as diferenças obtidas.
 - 1g: Desenvolver uma nova versão do simulador, **Simulator1B**, que introduz um sistema de prioridades baseado no tamanho dos pacotes.
 - 1h: Utilizar o **Simulator1B** para estimar o desempenho do sistema com as prioridades definidas, considerando $f = 1\,000\,000$ Bytes.
 - 1i: Repetir as experiências de 1h para $f = 10\,000$ Bytes e analisar as diferenças observadas.
 - 1j: Comparar e justificar as diferenças entre os resultados obtidos com os simuladores **Simulator1A** e **Simulator1B**.
- **Task 2** Nesta etapa será avaliado o desempenho de um sistema que suporta múltiplos serviços de tráfego (dados e VoIP), utilizando e modificando o simulador **Simulator3** para incluir erros de transmissão no enlace. O objetivo é compreender o impacto da taxa de erro de bits e do número de fluxos VoIP no desempenho do sistema e na eficiência do canal.
- 2a: Desenvolver uma nova versão do simulador, **Simulator3A**, que considera a introdução de uma taxa de erro de bits (b) como parâmetro adicional.
 - 2b: Estimar, por simulação, a perda média de pacotes para os serviços de dados e VoIP, variando o número de fluxos VoIP (n).
 - 2c: Estimar o atraso médio de pacotes para cada serviço, nas mesmas condições anteriores.
 - 2d: Calcular o débito total (*throughput*) do enlace em cada cenário e analisar o comportamento do sistema.
 - 2e: Desenvolver um modelo analítico em *MATLAB* para determinar o valor teórico do *throughput* total e compará-lo com os resultados obtidos por simulação.

3 Task 1

3.1 Exercício 1a

3.1.1 Contexto

Neste exercício foi analisado o desempenho de um sistema de transmissão considerando um canal com capacidade $C = 10$ Mbps, um tamanho de ficheiro $f = 10^6$ Bytes e diferentes taxas de chegada de pacotes (λ) correspondentes a 1100, 1300, 1500, 1700 e 1900 pacotes por segundo (pps). O objetivo consiste em estimar, através de simulação, a perda média de pacotes (*Packet Loss*) e o atraso médio de pacotes (*Average Packet Delay*) para cada um dos valores de λ definidos.

Estes parâmetros são fundamentais para avaliar a qualidade de serviço (QoS) em redes de comunicação, uma vez que permitem perceber o impacto da carga oferecida no desempenho do sistema. Para cargas baixas espera-se que o sistema funcione de forma eficiente, com atrasos reduzidos e perdas nulas. À medida que a taxa de chegada se aproxima da capacidade do canal, o atraso tende a aumentar significativamente, podendo eventualmente ocorrer perdas de pacotes.

3.1.2 Implementação

A simulação foi desenvolvida considerando $P = 10^5$ pacotes transmitidos e $N = 50$ execuções independentes, de forma a obter intervalos de confiança de 90% ($\alpha = 0.1$). Os principais parâmetros definidos no código foram:

- $P = 10^5$ – número de pacotes a simular;
- $N = 50$ – número de execuções independentes;
- $\alpha = 0.1$ – nível de significância para o cálculo do intervalo de confiança;
- $C = 10$ Mbps – capacidade do canal;
- $f = 10^6$ Bytes – tamanho de ficheiro transmitido;
- $\lambda = [1100, 1300, 1500, 1700, 1900]$ pps – taxas de chegada dos pacotes.

Durante a execução, para cada valor de λ , foram calculadas as métricas de *Packet Loss* e *Average Packet Delay*, fazendo uso do Simulador1 disponibilizado pelo professor no âmbito da unidade curricular, este, tem como tarefa simular a chegada e saída de pacotes de um canal com fila de tamanho limitado.

O simulador mantém uma lista de eventos composta por chegadas (ARRIVAL) e partidas (DEPARTURE), atualizando o estado do canal e da fila de forma dinâmica. Quando um pacote chega e o canal está ocupado, ele é colocado na fila se houver espaço disponível; caso contrário, é descartado, contribuindo para o *Packet Loss*. Cada pacote transmitido tem o seu atraso calculado como a diferença entre o tempo de chegada e o tempo de saída, permitindo determinar tanto o **atraso médio** (*Average Packet Delay*) como o **atraso máximo** (*Maximum Packet Delay*).

Para cada valor de λ , as métricas *Packet Loss* (PL) e *Average Packet Delay* (APD) foram calculadas para as N execuções, e os resultados médios e respectivos **intervalos**

de confiança de 90% foram obtidos usando:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad IC_{90\%} = \bar{x} \pm z_{1-\alpha/2} \cdot \frac{s}{\sqrt{N}}$$

onde s é a variância amostral de cada métrica e $z_{1-\alpha/2}$ o quantil da distribuição normal correspondente a 90% de confiança.

Os resultados foram apresentados em **diagramas de barras** com barras de erro indicando os intervalos de confiança, conforme ilustrado pelo seguinte trecho de código:

```
fprintf('%-30s = %.2e +- %.2e\n', 'PacketLoss (%)', mediaPL, termPL);
fprintf('%-30s = %.2e +- %.2e\n', 'Average Packet Delay (ms)', mediaAPD, termAPD);
```

Este procedimento permite analisar a relação entre a taxa de chegada de pacotes e o desempenho do canal em termos de perda e atraso.

3.1.3 Resultados

As Figuras 1 e 2 apresentam, respectivamente, a evolução da perda de pacotes e do atraso médio em função da taxa de chegada de pacotes. E a figura 3 demonstra os resultados obtidos no formato da linha de comandos.

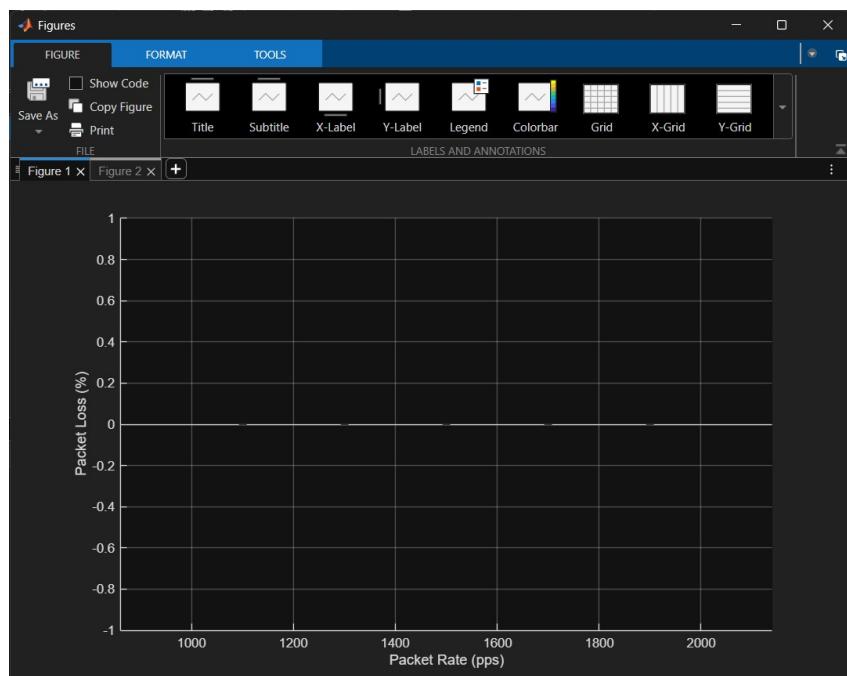


Figure 1: 1a) Perda média de pacotes em função da taxa de chegada (λ).

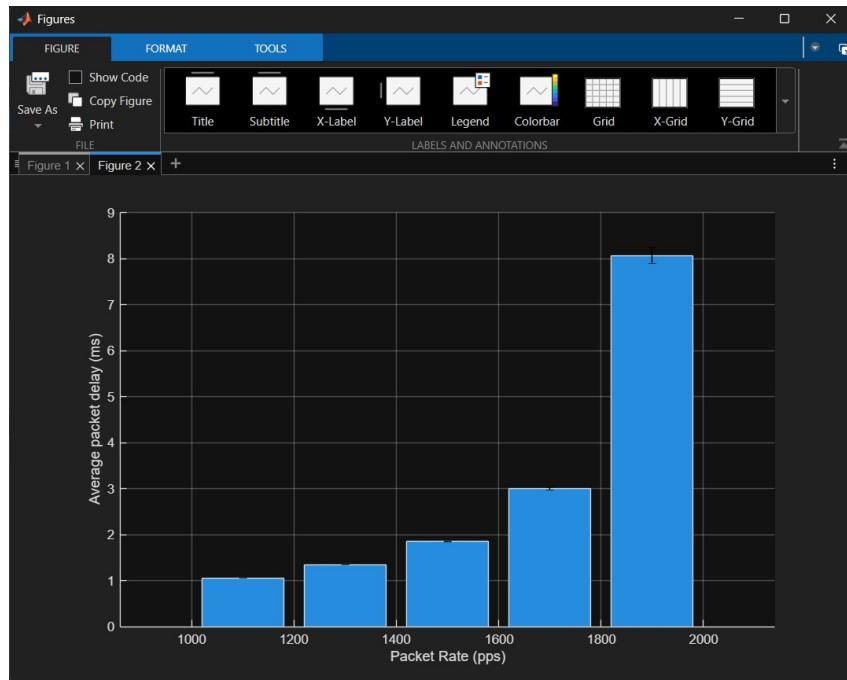


Figure 2: 1a) Atraso médio de pacotes em função da taxa de chegada (λ).

```

Command Window
>> task1
Valor de lambda: 1100
Packet Loss (%) = 0.00e+00 +- 0.00e+00
Average Packet Delay (ms) = 1.05e+00 +- 1.90e-03
Valor de lambda: 1300
Packet Loss (%) = 0.00e+00 +- 0.00e+00
Average Packet Delay (ms) = 1.34e+00 +- 4.33e-03
Valor de lambda: 1500
Packet Loss (%) = 0.00e+00 +- 0.00e+00
Average Packet Delay (ms) = 1.86e+00 +- 9.15e-03
Valor de lambda: 1700
Packet Loss (%) = 0.00e+00 +- 0.00e+00
Average Packet Delay (ms) = 3.00e+00 +- 2.73e-02
Valor de lambda: 1900
Packet Loss (%) = 0.00e+00 +- 0.00e+00
Average Packet Delay (ms) = 8.06e+00 +- 1.71e-01

Simulation ended!
>>

```

Figure 3: 1a) Resultados em formato de linha de comandos.

A análise dos resultados mostra que:

- Para todas as taxas de chegada de pacotes avaliadas, o sistema não apresenta perda de pacotes (0% de Packet Loss).
- É notável um acréscimo lento de atraso médio de envio de pacotes entre a taxa de chegada entre os valores de $\lambda = 1100$ (1.05ms) para $\lambda = 1300$ (1.34ms), o que demonstra um aumento curto de 0,29ms. De $\lambda = 1300$ (1,34ms) para $\lambda = 1500$ (1.86ms) o que demonstra um aumento curto de 0,52ms. E de $\lambda = 1500$ (1,86ms) para $\lambda = 1700$ (3ms), o que já demonstra um aumento curto embora mais relevante de 1.14ms.
- A partir de $\lambda = 1900$ pps, observa-se um aumento significativo no atraso médio dos pacotes, atingindo os 8 ms. O que demonstra um aumento relativamente ao $\lambda = 1700$ de 5.06ms.

3.1.4 Conclusões

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que:

- O tamanho da fila $f = 1 \times 10^6$ bytes é relativamente grande (≈ 1 MB), logo, mesmo na taxa mais alta (1900 pacotes/segundo), a capacidade do enlace $C = 10$ Mbps é mais do que suficiente para atender aos pacotes sem ocorrer overflow. Portanto, nenhum pacote é descartado, e o simulador reporta $PacketLoss = 0$.
- Os resultados mostram o crescimento não linear do atraso à medida que a utilização cresce, o que está de acordo com a teoria das filas.
- O aumento abrupto do atraso médio a partir de 1900 pps demonstra a aproximação do limite de capacidade do canal, evidenciando a natureza não-linear da degradação de desempenho à medida que a carga se aproxima da capacidade máxima.
- Apesar da métrica do *Packet Loss* se manter nula em todos os casos simulados, o que indica que o sistema ainda não atingiu o ponto de congestão total, atraso já começa a demonstrar sinais de sobrecarga.

Desta forma, a simulação permitiu validar o impacto da carga oferecida no atraso médio e na perda de pacotes, comprovando que a saturação do canal tem um efeito exponencial no aumento do atraso, mesmo antes de ocorrer perda efetiva de pacotes.

3.2 Exercicio 1b

3.2.1 Contexto

3.2.2 Implementação

3.2.3 Resultados

3.3 Exercicio 1c

3.3.1 Contexto

3.3.2 Implementação

3.3.3 Resultados

3.4 Exercicio 1d

3.4.1 Contexto

3.4.2 Implementação

3.4.3 Resultados

3.5 Exercicio 1e

3.5.1 Contexto

3.5.2 Implementação

3.5.3 Resultados

3.6 Exercicio 1f

3.6.1 Contexto

3.6.2 Implementação

3.6.3 Resultados

3.7 Exercicio 1g

3.7.1 Contexto

3.7.2 Implementação

3.7.3 Resultados

3.8 Exercicio 1h

3.8.1 Contexto

3.8.2 Implementação

3.8.3 Resultados

3.9 Exercicio 1i

3.9.1 Contexto

3.9.2 Implementação

3.9.3 Resultados

3.10 Exercicio 1j

3.10.1 Contexto

3.10.2 Implementação

3.10.3 Resultados

4 Parte 2

4.1 Exercicio 2a

4.1.1 Contexto

4.1.2 Implementação

4.1.3 Resultados

4.2 Exercicio 2b

4.2.1 Contexto

4.2.2 Implementação

4.2.3 Resultados

4.3 Exercicio 2c

4.3.1 Contexto

4.3.2 Implementação

4.3.3 Resultados

4.4 Exercicio 2d

4.4.1 Contexto

4.4.2 Implementação

4.4.3 Resultados

4.5 Exercicio 2e

4.5.1 Contexto

4.5.2 Implementação

4.5.3 Resultados