

TEACHING AND LEARNING COMPUTER NETWORKS: A PRACTICAL STUDY ON VIDEO TRANSMISSIONS UNDER ADVERSE NETWORK CONDITIONS

Rafael Fernando Diorio - INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SÃO PAULO - IFSP - Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-5574-0941>

With an emphasis on teaching and learning computer networks, this paper discusses a practical study on video transmission under adverse network conditions. Video services occupy a substantial percentage of today's Internet traffic. For this reason, investigating video transmission under adverse network conditions is crucial and could lead to a better understanding of the QoE perceived by the end-user. This paper employs a theoretical-practical methodology/approach to discuss video transmissions under adverse network conditions. The experimental results obtained show that the quality of the video was affected in transmissions under adverse network conditions, with a direct influence on the QoE perceived by the end-user. This paper discusses a current/relevant theme and employs a theoretical-practical methodology/approach for the study and understanding of the subject, with an emphasis on teaching and learning computer networks. This paper discusses a current/relevant theme focused on Information Systems and Information Technology, under the multidisciplinary perspective of management.

Keywords: Computer Networks, Teaching and Learning, Experimentation, Video Transmission, Quality of Experience

ENSINO E APRENDIZAGEM DE REDES DE COMPUTADORES: UM ESTUDO PRÁTICO SOBRE TRANSMISSÕES DE VÍDEO SOB CONDIÇÕES ADVERSAS NA REDE

Com ênfase no processo de ensino e aprendizagem de redes de computadores, este trabalho discute um estudo prático sobre transmissões de vídeo sob condições adversas na rede. Serviços baseados em vídeo ocupam uma porcentagem substancial do tráfego global da Internet na atualidade. Por esse motivo, investigar a transmissão de vídeo sob condições adversas na rede é crucial e pode levar a um melhor entendimento da QoE percebida pelo usuário final. Este trabalho emprega uma metodologia/abordagem teórico-prática para discutir transmissões de vídeo sob condições adversas na rede. Os resultados experimentais obtidos mostram que a qualidade do vídeo foi afetada nas transmissões sob condições adversas na rede, com influência direta na QoE percebida pelo usuário final. Este trabalho discute um tema atual/relevante e emprega uma metodologia/abordagem teórico-prática para possibilitar a compreensão do assunto, com ênfase no processo de ensino e aprendizagem de redes de computadores. Este trabalho discute um tema atual/relevante focado em Sistemas de Informação e Tecnologia da Informação, sob a ótica multidisciplinar da gestão.

Palavras-chave: Redes de Computadores, Ensino e Aprendizagem, Experimentação, Transmissão de Vídeo, Qualidade de Experiência

Teaching and Learning Computer Networks: A Practical Study on Video Transmissions under Adverse Network Conditions

Abstract: In the last few years, there has been a rapid proliferation of a wide range of video-based services and applications. However, to provide a satisfactory Quality of Experience (QoE) to the end-users, it is necessary to deal with several challenges related to the network, such as sufficient bandwidth, low or no packet loss, and minimal delay and jitter. In this context, for purposes of teaching and learning computer networks, this paper discusses a practical study on video transmissions under adverse network conditions. The discussions are based on experimental results obtained in seven different experiments, with video transmissions under normal network conditions and with packet loss emulation, delay emulation, and transmission rate limitations.

Keywords: Computer Networks, Teaching and Learning, Experimentation, Video Transmission, Quality of Experience.

Ensino e Aprendizagem de Redes de Computadores: Um Estudo Prático sobre Transmissões de Vídeo sob Condições Adversas na Rede

Resumo: Nos últimos anos, houve uma rápida proliferação de uma ampla gama de serviços e aplicações baseadas em vídeo. No entanto, para fornecer uma Qualidade de Experiência (*Quality of Experience, QoE*) satisfatória aos usuários finais, é necessário lidar com vários desafios relacionados à rede, como largura de banda suficiente, baixa ou nenhuma perda de pacotes e atraso e *jitter* mínimos. Nesse contexto, com ênfase no processo de ensino e aprendizagem de redes de computadores, este trabalho discute um estudo prático sobre transmissões de vídeo sob condições adversas na rede. As discussões são realizadas com base em resultados experimentais obtidos em sete diferentes experimentos, com transmissões de vídeo sob as condições normais da rede, bem como com emulações de perda de pacotes, de atrasos e de limitações de taxas de transmissão.

Palavras-chave: Redes de Computadores, Ensino e Aprendizagem, Experimentação, Transmissão de Vídeo, Qualidade de Experiência.

1. Introdução

Ao longo dos últimos anos, aplicações e serviços multimídia, em especial, baseados em vídeo, tornaram-se predominantes em nosso cotidiano, tanto para atividades de lazer, como para atividades profissionais. Como resultado, conteúdos de vídeo ocupam uma porcentagem substancial do tráfego global da Internet na atualidade (Cisco, 2018). Por outro lado, entregar conteúdos de vídeo com qualidade aos usuários finais é um desafio que envolve vários fatores. Dentre esses fatores, pode-se destacar questões relacionadas com as aplicações e características do fluxo de tráfego de vídeo, com as características e condições da rede e com as expectativas do usuário final, entre outras.

Nesse contexto, no que diz respeito às aplicações e características do fluxo de tráfego de vídeo, muitas aplicações são extremamente sensíveis ao atraso, variação de atraso (*jitter*) e perda de pacotes, exigindo, por exemplo, capacidade de largura de banda suficiente, atraso e *jitter* mínimos, bem como baixa ou nenhuma perda de pacotes (Fan *et al.*, 2018; Pande, Ahuja, Sivaraj, Baik, & Mohapatra, 2013; Zink, Sitaraman, & Nahrstedt, 2019). Se um ou mais requisitos não forem atendidos, a qualidade do conteúdo de vídeo pode ser significativamente afetada. No que diz respeito às características e condições da rede, com o serviço de melhor esforço (*best effort*) fornecido pela camada de rede da Internet, não há garantias de que a temporização entre pacotes seja preservada, de que os pacotes sejam recebidos na ordem em que foram enviados, bem como da entrega final dos pacotes transmitidos (Kurose & Ross, 2013). Além disso, o serviço de melhor esforço da Internet não é tido como o melhor serviço para todos os propósitos, não oferecendo, por exemplo, nenhuma garantia de Qualidade de Serviço (*Quality of Service, QoS*) para aplicações de *streaming* de vídeo (Kurose & Ross, 2013; Turner & Taylor, 2005; Wu, Hou, Zhu, Zhang, & Peha, 2001). Adicionalmente, a atual arquitetura da Internet, tida como ossificada, apresenta várias deficiências fundamentais, tal como de segurança, de roteamento e de garantias de QoS, por exemplo (Turner & Taylor, 2005). A falta de garantias do serviço de melhor esforço da Internet, bem como relacionadas com suas deficiências arquiteturais, apresenta desafios significativos para aplicações multimídia altamente sensíveis a atrasos, variações de atraso e perda de pacotes. Por sua vez, em relação às expectativas do usuário final, diferentes fatores influenciam a Qualidade de Experiência (*Quality of Experience, QoE*) percebida pelo mesmo, tal como fatores do sistema (como largura de banda, atraso, *jitter* e perda de pacotes, por exemplo) e fatores humanos (como preferência, motivação e expectativa, por exemplo), entre outros (Bouraquia, Sabir, Sadik, & Ladid, 2020; Yang, Wang, Calheiros, & Yang, 2018).

Nesse cenário, alguns dos principais fatores que podem afetar a qualidade do vídeo, com influência direta na QoE percebida pelo usuário final, estão relacionados com questões no âmbito da rede, tais como envolvendo largura de banda, perda de pacotes, atraso e variação de atraso, por exemplo, com diversos trabalhos recentes relacionados ao tema (Adeyemi-Ejeye, Alreshoodi, Al-Jobouri, & Fleury, 2019; Diorio, 2020; Frnda, Voznak, & Sevcik, 2016; Korhonen, 2018; Laghari, He, & Channa, 2018; Mrvelj & Matulin, 2018; Paudyal, Battisti, & Carli, 2016; Paudyal, Battisti, & Carli, 2017; Wang & bin Hou, 2018). Por esse motivo, investigar a transmissão de vídeo sob condições adversas na rede é crucial e pode levar a um melhor entendimento da QoE percebida pelo usuário final.

Diante desse cenário, objetivando contribuir com outros trabalhos relacionados ao tema e com ênfase no processo de ensino e aprendizagem de redes de computadores,

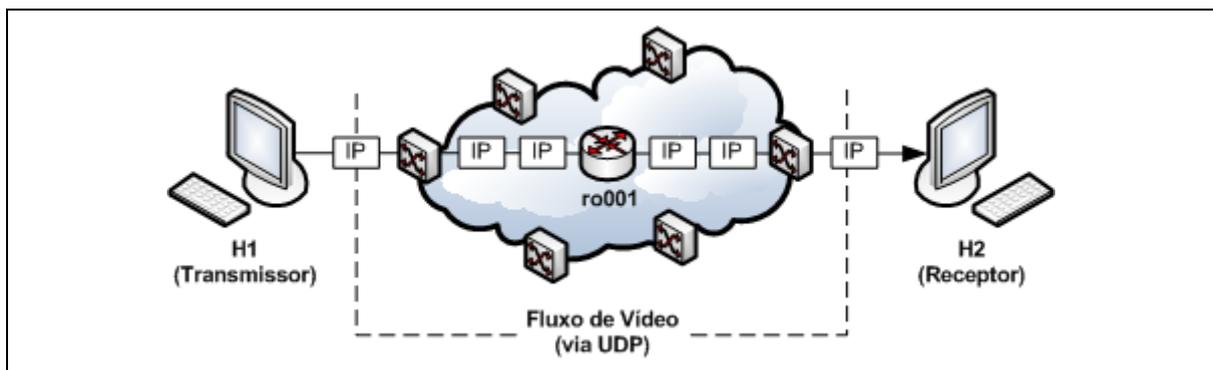
este trabalho discute um estudo prático sobre transmissões de vídeo sob condições adversas na rede. Para tal, as discussões são realizadas com base em resultados experimentais obtidos em sete diferentes experimentos, com transmissões de vídeo sob as condições normais da rede, bem como com emulações de perda de pacotes, de atrasos e de limitações de taxas de transmissão. Essa discussão é importante, por exemplo, para conciliar teoria e prática em atividades de ensino relacionadas ao tema, bem como para que outras contribuições possam ser realizadas no âmbito de comunicações multimídia.

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma: o cenário de referência utilizado para fins de experimentação e discussão é descrito na Seção 2. Os materiais e métodos são descritos na Seção 3. Os resultados experimentais são descritos na Seção 4 e, por fim, a conclusão e os trabalhos futuros são descritos na Seção 5.

2. Cenário de Referência

O cenário de referência utilizado para fins de experimentação e discussão sobre transmissões de vídeo sob condições adversas na rede é ilustrado na Figura 1.

Figura 1. Cenário de referência para fins de experimentação e discussão sobre transmissões de vídeo sob condições adversas na rede.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesse contexto, três *hosts* são utilizados no cenário de referência explorado neste trabalho: um *host* transmissor (H1), um *host* receptor (H2) e um *host* roteador (ro001). Na rede, cada *host* possui funções específicas, em que o *host* H1 é o transmissor do conteúdo de vídeo, o *host* H2 é o receptor do conteúdo de vídeo e, por sua vez, o *host* ro001 é o roteador que possibilita a comunicação entre as redes do *host* H1 e do *host* H2, configurado como *gateway* de acesso à rede para ambos os *hosts*.

No que se refere às configurações de endereçamento, o *host* H1 possui endereço IP 188.188.188.188/24, o *host* H2 possui endereço IP 189.189.189.189/24 e, por sua vez, o *host* ro001 possui endereços IP 188.188.188.254/24 e 189.189.189.254/24.

3. Materiais e Métodos

Para a implementação do cenário de referência ilustrado na Figura 1, os *hosts* H1 e H2 foram configurados utilizando o sistema operacional Microsoft Windows 7 e o *host* ro001 foi configurado utilizando o sistema operacional Linux CentOS 7. Ambos os

hosts (H1, H2 e ro001) foram implementados na forma de *hosts* virtuais por meio da solução Oracle VM VirtualBox¹.

Nesse cenário, as configurações para emulações de perda de pacotes, de atrasos e para limitações de taxas de transmissão foram definidas no *host* ro001 por meio da solução NetEm² (via ferramenta de linha de comando “*tc*”). Inicialmente, nenhuma configuração para emular uma ou mais condições adversas na rede foi definida, com a transmissão de vídeo sendo realizada conforme as condições normais da rede. Em seguida, as demais transmissões foram realizadas em experimentos envolvendo emulações de perda de pacotes, de atrasos e de limitações de taxas de transmissão. Tais definições resultaram em sete diferentes experimentos, os quais são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Visão geral dos experimentos explorados neste trabalho.

Experimento	Característica
1	Transmissão de vídeo conforme as condições normais da rede
2	Transmissão de vídeo com perda de pacotes de 5%
3	Transmissão de vídeo com perda de pacotes de 10%
4	Transmissão de vídeo com atraso de 90ms e <i>jitter</i> de 45ms
5	Transmissão de vídeo com atraso de 100ms e <i>jitter</i> de 50ms
6	Transmissão de vídeo com taxas limitadas em até 10 Mbps
7	Transmissão de vídeo com taxas limitadas em até 5 Mbps

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesse contexto, os comandos utilizados no *host* ro001 para emular as perdas de pacotes descritas nos experimentos 2 e 3 da Tabela 1 são ilustrados na Figura 2; os comandos utilizados no *host* ro001 para emular os atrasos e *jitter* descritos nos experimentos 4 e 5 da Tabela 1 são ilustrados na Figura 3; e, por sua vez, os comandos utilizados no *host* ro001 para limitar as taxas de transmissão conforme descrito nos experimentos 6 e 7 da Tabela 1 são ilustrados na Figura 4.

Figura 2. Comandos utilizados no *host* ro001 para emular as perdas de pacotes descritas nos experimentos 2 e 3 da Tabela 1.

```
tc qdisc del dev enp0s9 root
tc qdisc add dev enp0s9 root netem loss PLOSS
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 3. Comandos utilizados no *host* ro001 para emular os atrasos e *jitter* descritos nos experimentos 4 e 5 da Tabela 1.

```
tc qdisc del dev enp0s9 root
tc qdisc add dev enp0s9 root netem delay PDELAY PJITTER
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

¹Oracle VM VirtualBox em <https://www.virtualbox.org>.

²NetEm em <https://wiki.linuxfoundation.org/networking/netem>.

Figura 4. Comandos utilizados no *host* ro001 para limitar as taxas de transmissão conforme descrito nos experimentos 6 e 7 da Tabela 1.

```
tc qdisc del dev enp0s9 root
tc qdisc add dev enp0s9 root tbf rate PRATE burst PBURST limit PLIMIT
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nos comandos ilustrados na Figura 2, *PLOSS* foi definido como 5% para o experimento 2 e 10% para o experimento 3. Nos comandos ilustrados na Figura 3, *PDELAY* e *PJITTER* foram definidos como 90ms e 45ms, respectivamente, para o experimento 4 e 100ms e 50ms, respectivamente, para o experimento 5. Por sua vez, nos comandos ilustrados na Figura 4, *PRATE*, *PBURST* e *PLIMIT* foram definidos como 10mbit, 1mbit e 1mbit, respectivamente, para o experimento 6 e 5mbit, 0.5mbit e 0.5mbit, respectivamente, para o experimento 7.

Diante desse cenário, as transmissões de vídeo foram realizadas do *host* H1 para o *host* H2, ambas por meio do *framework* EvalVid (Klaue, Rathke, & Wolisz, 2003), por meio do protocolo UDP (*User Datagram Protocol*) e tendo como base o mesmo vídeo de referência (vídeo com 500 *frames*, *frame rate* de 50 fps, resolução 1280x720 no formato 4:2:2 e duração de 10 segundos), codificado via FFmpeg³ com o codec H.264/MPEG-4 AVC e *bitrate* de 9,5 Mbps.

Nesse contexto, os comandos utilizados para a codificação do vídeo de referência são ilustrados na Figura 5; os comandos utilizados para gerar os arquivos de referência para verificar a qualidade do vídeo são ilustrados na Figura 6; os comandos utilizados para a transmissão de vídeo pelo *host* H1 são ilustrados na Figura 7; os comandos utilizados para a recepção de vídeo pelo *host* H2 são ilustrados na Figura 8; e, os comandos utilizados para a reconstrução do vídeo recebido pelo *host* H2 e para gerar o arquivo de referência para verificar sua qualidade são ilustrados na Figura 9.

Figura 5. Comandos utilizados para a codificação do vídeo de referência.

```
ffmpeg -i video.y4m -c:v libx264 -r 50 -b:v 9.5M video.m4v
MP4Box -hint -mtu 1024 -fps 50 -add video.m4v video.mp4
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 6. Comandos utilizados para gerar os arquivos de referência para verificar a qualidade do vídeo.

```
ffmpeg -i video.y4m video.yuv
ffmpeg -i video.mp4 video_ref.yuv
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 7. Comandos utilizados para a transmissão de vídeo pelo *host* H1.

```
WinDump.exe -n -tt -v udp port 12345 > sd
mp4trace.exe -f -t UDP -s 189.189.189.189 12345 video.mp4 > st
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

³FFmpeg em <https://ffmpeg.org>.

Figura 8. Comandos utilizados para a recepção de vídeo pelo *host* H2.

```
nc.exe -lup 12345 > null
WinDump.exe -n -tt -v udp port 12345 > rd
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 9. Comandos utilizados para a reconstrução do vídeo recebido pelo *host* H2 e para gerar o arquivo de referência para verificar sua qualidade.

```
etmp4.exe -f -x sd rd st video.mp4 video_rec
ffmpeg -i video_rec.mp4 video_rec.yuv
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

No âmbito da QoE, as avaliações foram realizadas comparando o arquivo de referência do vídeo original com o arquivo de referência do vídeo recebido, utilizando o PSNR (*Peak Signal-to-Noise Ratio*) (Bouraqaia, Sabir, Sadik, & Ladid, 2020; Yang, Wang, Calheiros, & Yang, 2018) como métrica de referência. Nesse contexto, o comando utilizado para realizar o cálculo do PSNR do vídeo recebido pelo *host* H2, comparando o arquivo de referência do vídeo original com o arquivo de referência do vídeo recebido, é ilustrado na Figura 10.

Figura 10. Comando utilizado para realizar o cálculo do PSNR do vídeo recebido pelo *host* H2, comparando o arquivo de referência do vídeo original com o arquivo de referência do arquivo recebido.

```
psnr.exe 1280 720 422 video.yuv video_rec.yuv > psnr_video_rec.txt
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em seguida, o PSNR obtido foi mapeado para MOS (*Mean Opinion Score*) (Bouraqaia, Sabir, Sadik, & Ladid, 2020; Yang, Wang, Calheiros, & Yang, 2018), tal como descrito por Bouraqaia, Sabir, Sadik e Ladid (2020) e apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Mapeamento dos valores de PSNR obtidos nos experimentos para MOS.

PSNR (dB)	MOS	Qualidade	Percepção
> 37	5	Excelente	Imperceptível
31 – 37	4	Boa	Perceptível
25 – 31	3	Razoável	Pouco incômodo
20 – 25	2	Pobre	Incômodo
< 20	1	Ruim	Muito incômodo

Fonte: Adaptado de Bouraqaia, Sabir, Sadik e Ladid (2020).

Para efeitos de referência, o PSNR do vídeo original após sua codificação foi calculado como 36,73, com qualidade considerada “boa” quando mapeada para MOS (Tabela 2).

4. Resultados e Discussão

4.1. Efeitos da perda de pacotes na qualidade do vídeo e na QoE percebida pelo usuário

Os resultados experimentais obtidos nas transmissões de vídeo conforme as condições normais da rede, com perda de pacotes de 5% e com perda de pacotes de 10% são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Resultados experimentais obtidos nas transmissões de vídeo conforme as condições normais da rede, com perda de pacotes de 5% e com perda de pacotes de 10%.

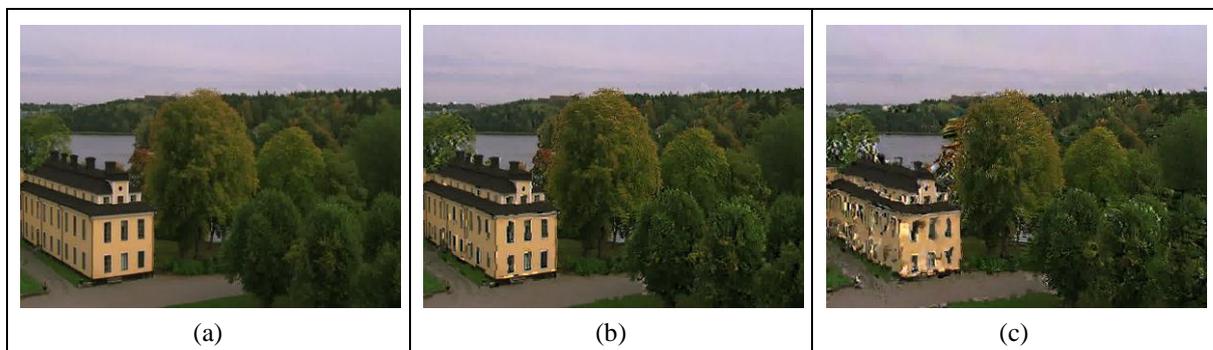
Experimento	PSNR (dB)	MOS	Qualidade
Transmissão conforme as condições normais da rede	36,73	4	Boa
Transmissão com perda de pacotes de 5%	28,52	3	Razoável
Transmissão com perda de pacotes de 10%	19,79	1	Ruim

Fonte: Elaborado pelo autor.

Diante dos resultados obtidos, pode-se observar que apenas no experimento com transmissão de vídeo conforme as condições normais da rede não houve degradação na qualidade do vídeo, com PSNR 36,73 e qualidade considerada “boa” no mapeamento de PSNR para MOS. Por outro lado, nos demais experimentos, houve degradação na qualidade do vídeo, com influência direta na QoE percebida pelo usuário final. Para o experimento com transmissão com perda de pacotes de 5%, o PSNR calculado foi 28,52, com qualidade considerada “razoável” no mapeamento de PSNR para MOS. Por sua vez, para o experimento com transmissão com perda de pacotes de 10%, o PSNR calculado foi 19,79, com qualidade considerada “ruim” no mapeamento de PSNR para MOS.

Nesse contexto, como exemplo, a Figura 11 ilustra um *frame* do vídeo (*frame* de número 115) recebido pelo *host* H2 conforme as condições normais da rede (a), com perda de pacotes de 5% (b) e com perda de pacotes de 10% (c).

Figura 11. Exemplo de *frame* do vídeo (*frame* de número 115) recebido pelo *host* H2 conforme as condições normais da rede (a), com perda de pacotes de 5% (b) e com perda de pacotes de 10% (c).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Dessa forma, diante dos resultados experimentais obtidos, pode-se observar os efeitos da perda de pacotes na degradação da qualidade do vídeo, com influência direta na QoE percebida pelo usuário final.

4.2. Efeitos do atraso e *jitter* na qualidade do vídeo e na QoE percebida pelo usuário

Os resultados experimentais obtidos nas transmissões de vídeo conforme as condições normais da rede, com atraso de 90ms e *jitter* de 45ms e com atraso de 100ms e *jitter* de 50ms são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Resultados experimentais obtidos nas transmissões de vídeo conforme as condições normais da rede, com atraso de 90ms e *jitter* de 45ms e com atraso de 100ms e *jitter* de 50ms.

Experimento	PSNR (dB)	MOS	Qualidade
Transmissão conforme as condições normais da rede	36,73	4	Boa
Transmissão com atraso de 90ms e <i>jitter</i> de 45ms	12,32	1	Ruim
Transmissão com atraso de 100ms e <i>jitter</i> de 50ms	11,42	1	Ruim

Fonte: Elaborado pelo autor.

Diante dos resultados obtidos, pode-se observar que apenas no experimento de transmissão de vídeo conforme as condições normais da rede não houve degradação na qualidade do vídeo, com PSNR 36,73 e qualidade considerada “boa” no mapeamento de PSNR para MOS. Por outro lado, nos demais experimentos, houve degradação na qualidade do vídeo, com influência direta na QoE percebida pelo usuário final. Para o experimento com transmissão com atraso de 90ms e *jitter* de 45ms, o PSNR calculado foi 12,32, com qualidade considerada “ruim” no mapeamento de PSNR para MOS. Por sua vez, para o experimento com transmissão com atraso de 100ms e *jitter* de 50ms, o PSNR calculado foi 11,42, com qualidade também considerada “ruim” no mapeamento de PSNR para MOS.

Nesse contexto, como exemplo, a Figura 12 ilustra um *frame* do vídeo (*frame* de número 115) recebido pelo *host* H2 conforme as condições normais da rede (a), com atraso de 90ms e *jitter* de 45ms (b) e com atraso de 100ms e *jitter* de 50ms (c).

Figura 12. Exemplo de *frame* do vídeo (*frame* de número 115) recebido pelo *host* H2 conforme as condições normais da rede (a), com atraso de 90ms e *jitter* de 45ms (b) e com atraso de 100ms e *jitter* de 50ms (c).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Dessa forma, diante dos resultados experimentais obtidos, pode-se observar os efeitos do atraso e *jitter* na degradação da qualidade do vídeo, com influência direta na QoE percebida pelo usuário final.

4.3. Efeitos da limitação das taxas de transmissão na qualidade do vídeo e na QoE percebida pelo usuário

Os resultados experimentais obtidos nas transmissões de vídeo conforme as condições normais da rede, com taxas de transmissão limitadas em até 10 Mbps e com taxas de transmissão limitadas em até de 5 Mbps são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Resultados experimentais obtidos nas transmissões de vídeo conforme as condições normais da rede, com taxas de transmissão limitadas em até 10 Mbps e com taxas de transmissão limitadas em até 5 Mbps.

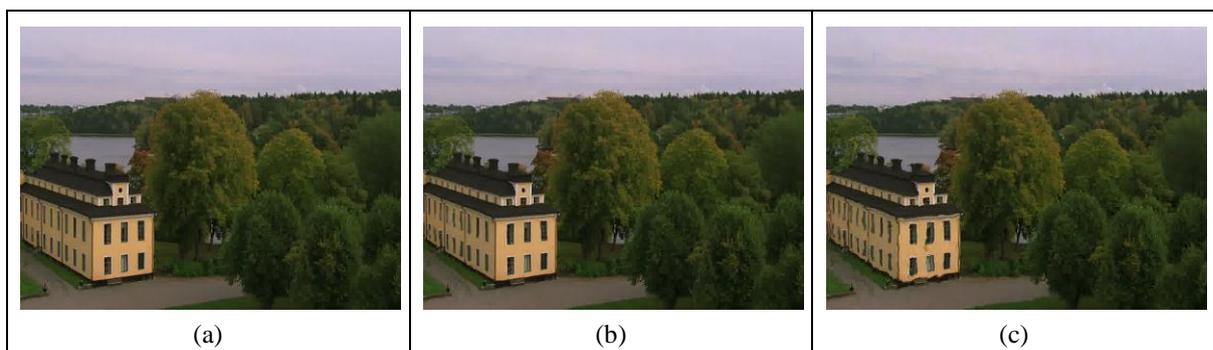
Experimento	PSNR (dB)	MOS	Qualidade
Transmissão conforme as condições normais da rede	36,73	4	Boa
Transmissão com taxas limitadas em até 10 Mbps	32,97	4	Boa
Transmissão com taxas limitadas em até 5 Mbps	26,18	3	Razoável

Fonte: Elaborado pelo autor.

Diante dos resultados obtidos, pode-se observar que apenas no experimento com transmissão de vídeo conforme as condições normais da rede não houve degradação na qualidade do vídeo, com PSNR 36,73 e qualidade considerada “boa” no mapeamento de PSNR para MOS. Por outro lado, nos demais experimentos, houve degradação na qualidade do vídeo, com influência direta na QoE percebida pelo usuário final. Para o experimento com transmissão com taxas limitadas em até 10 Mbps, o PSNR calculado foi 32,97, com qualidade também considerada “boa” no mapeamento de PSNR para MOS. Por sua vez, para o experimento com transmissão com taxas limitadas em até 5 Mbps, o PSNR calculado foi 26,18, com qualidade considerada “razoável” no mapeamento de PSNR para MOS.

Nesse contexto, como exemplo, a Figura 13 ilustra um *frame* do vídeo (*frame* de número 115) recebido pelo *host* H2 conforme as condições normais da rede (a), com taxas de transmissão limitadas em até 10 Mbps (b) e com taxas de transmissão limitadas em até 5 Mbps (c).

Figura 13. Exemplo de *frame* do vídeo (*frame* de número 115) recebido pelo *host* H2 conforme as condições normais da rede (a), com taxas de transmissão limitadas em até 10 Mbps (b) e com taxas de transmissão limitadas em até 5 Mbps (c).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Dessa forma, diante dos resultados experimentais obtidos, pode-se observar os efeitos da limitação das taxas de transmissão na degradação da qualidade do vídeo, com influência direta na QoE percebida pelo usuário final.

5. Conclusão e Trabalhos Futuros

Este trabalho apresentou os resultados obtidos a partir de um estudo prático sobre transmissões de vídeo sob condições adversas na rede. Para tal, a partir de um cenário de referência, um ambiente computacional foi utilizado para fins de experimentação e discussão, com transmissões de vídeo realizadas sob as condições normais da rede, bem como com emulações de perda de pacotes, de atrasos e com limitações de taxas de transmissão.

Nesse contexto, a partir de sete experimentos distintos, discutiu-se os efeitos da perda de pacotes, do atraso e *jitter* e de limitações de taxas de transmissão no comprometimento da qualidade do vídeo, bem como na degradação da QoE percebida pelo usuário final. Essa discussão é importante, por exemplo, para conciliar teoria e prática em atividades de ensino relacionadas ao tema, bem como para que outras contribuições possam ser realizadas no âmbito de comunicações multimídia.

Trabalhos futuros serão realizados para avaliar a percepção dos alunos sobre a abordagem empregada neste trabalho. Além disso, outros estudos práticos serão propostos, explorados e avaliados.

Referências

- Adeyemi-Ejeye, A. O., Alreshoodi, M., Al-Jobouri, L., & Fleury, M. (2019). Impact of packet loss on 4K UHD video for portable devices. *Multimedia Tools and Applications*, 78(22), 31733-31755.
- Bouraqia, K., Sabir, E., Sadik, M., & Ladid, L. (2020). Quality of experience for streaming services: measurements, challenges and insights. *IEEE Access*, 8, 13341-13361.
- Cisco. (2018). *VNI Complete Forecast Highlights*. Recuperado em 23 julho, 2021, de https://www.cisco.com/c/dam/m/en_us/solutions/service-provider/vni-forecast-highlights/pdf/Global_2022_Forecast_Highlights.pdf.
- Diorio, R. F. (2020, October). Video Transmissions in Networks with Packet Loss: A Practical Study for Teaching and Learning on Computer Networks. In *Brazilian Technology Symposium* (pp. 168-177). Springer, Cham.
- Fan, Q., Yin, H., Min, G., Yang, P., Luo, Y., Lyu, Y., ... & Jiao, L. (2018). Video delivery networks: Challenges, solutions and future directions. *Computers & Electrical Engineering*, 66, 332-341.
- Frnda, J., Voznak, M., & Sevcik, L. (2016). Impact of packet loss and delay variation on the quality of real-time video streaming. *Telecommunication Systems*, 62(2), 265-275.
- Klaue, J., Rathke, B., & Wolisz, A. (2003, September). Evalvid—A framework for video transmission and quality evaluation. In *International conference on modelling techniques and tools for computer performance evaluation* (pp. 255-272). Springer, Berlin, Heidelberg.

- Korhonen, J. (2018). Study of the subjective visibility of packet loss artifacts in decoded video sequences. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 64(2), 354-366.
- Kurose, J. F., & Ross, K. W. (2013). *Redes de computadores e a Internet: uma abordagem top-down* (6a ed.). São Paulo: Pearson Education do Brasil.
- Laghari, A. A., He, H., & Channa, M. I. (2018). Measuring effect of packet reordering on quality of experience (QoE) in video streaming. *3D Research*, 9(3), 1-11.
- Mrvelj, Š., & Matulin, M. (2018). Impact of packet loss on the perceived quality of UDP-based multimedia streaming: a study of user quality of experience in real-life environments. *Multimedia systems*, 24(1), 33-53.
- Pande, A., Ahuja, V., Sivaraj, R., Baik, E., & Mohapatra, P. (2013). Video delivery challenges and opportunities in 4G networks. *IEEE MultiMedia*, 20(3), 88-94.
- Paudyal, P., Battisti, F., & Carli, M. (2016). Impact of video content and transmission impairments on quality of experience. *Multimedia Tools and Applications*, 75(23), 16461-16485.
- Paudyal, P., Battisti, F., & Carli, M. (2017). Evaluation of the effects of transmission impairments on perceived video quality by exploiting ReTRiEVED dataset. *Journal of Electronic Imaging*, 26(2), 023003.
- Turner, J. S., & Taylor, D. E. (2005, December). Diversifying the internet. In *GLOBECOM'05. IEEE Global Telecommunications Conference, 2005*. (Vol. 2, pp.755-760). IEEE.
- Wang, J., & bin Hou, Y. (2018). Packet loss rate mapped to the quality of experience. *Multimedia Tools and Applications*, 77(1), 387-422.
- Wu, D., Hou, Y. T., Zhu, W., Zhang, Y. Q., & Peha, J. M. (2001). Streaming video over the Internet: approaches and directions. *IEEE Transactions on circuits and systems for video technology*, 11(3), 282-300.
- Yang, M., Wang, S., Calheiros, R. N., & Yang, F. (2018). Survey on QoE assessment approach for network service. *IEEE Access*, 6, 48374-48390.
- Zink, M., Sitaraman, R., & Nahrstedt, K. (2019). Scalable 360 video stream delivery: Challenges, solutions, and opportunities. *Proceedings of the IEEE*, 107(4), 639-650.