

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**MODELAGEM DA PERDA DE QUALIDADE  
DE VIDEOS H.264 EM REDES SEM FIO  
CONSIDERANDO PERDAS DE PSNR E DE  
*FRAMES***

JOÃO VICTOR COSTA CARMONA

TD 16/2019

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil

2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

JOÃO VICTOR COSTA CARMONA

**MODELAGEM DA PERDA DE QUALIDADE  
DE VIDEOS H.264 EM REDES SEM FIO  
CONSIDERANDO PERDAS DE PSNR E DE  
*FRAMES***

TD 16/2019

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil

2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

JOÃO VICTOR COSTA CARMONA

**MODELAGEM DA PERDA DE QUALIDADE DE  
VIDEOS H.264 EM REDES SEM FIO CONSIDERANDO  
PERDAS DE PSNR E DE *FRAMES***

Tese submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Elétrica na área de Telecomunicações.

Orientador: Fabrício José Brito Barros

Coorientador: Gervásio Protásio dos Santos Cavalcante

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil

2019

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

---

C287m Carmona, João Victor Costa  
Modelagem da Perda de Qualidade de Vídeos H.264 em Redes  
Sem Fio considerando Perdas de PSNR e de Frames / João Victor  
Costa Carmona. — 2019.  
88 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Fabrício José Brito Barros  
Coorientador(a): Prof. Dr. Gervásio Protásio dos Santos  
Cavalcante  
Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Elétrica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará,  
Belém, 2019.

1. Modelagem. 2. Perda de Qualidade. 3. Desempenho. 4.  
Perda de PSNR. 5. Perda de Frames. I. Título.

CDD 384.5

---



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**“MODELAGEM DA PERDA DE QUALIDADE DE VIDEOS H.264 EM REDES SEM FIO  
CONSIDERANDO PERDAS DE PSNR E DE FRAMES”**

AUTOR: JOÃO VICTOR COSTA CARMONA

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO JULGADA ADEQUADA PARA A  
OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE TELECOMUNICAÇÕES.

APROVADA EM: 16/08/2019

BANCA EXAMINADORA:

**Prof. Dr. Fabrício José Brito Barros**  
(Orientador – PPGEE/UFPA)

**Prof. Dr. Gervásio Protásio dos Santos Cavalcante**  
(Co-Orientador – PPGEE/UFPA)

**Prof. Dr. Diego Lisboa Cardoso**  
(Avaliador Interno – PPGEE/UFPA)

**Prof.ª Dr.ª Jasmine Priscyla Leite de Araújo**  
(Avaliadora Interna – PPGEE/UFPA)

**Prof. Dr. Bruno Souza Lyra Castro**  
(Avaliador Externo ao Programa – CCAST/UFPA)

**Prof. Dr. Diego de Azevedo Gomes**  
(Avaliador Externo – UNIFESSPA)

VISTO:

**Prof.ª Dr.ª Maria Emília de Lima Tostes**  
(Coordenadora do PPGEE/ITEC/UFPA)

*Este trabalho é dedicado primeiramente à Deus, pela saúde, fé e perseverança que me tem dado. A todas as pessoas que direta ou indiretamente colaboraram para o desenvolvimento deste estudo. E, principalmente à minha família, em especial aos meus filhos Caio e Kevin (e ao Brayan que está para nascer), à minha esposa Suelem, e aos meus pais Bosco e Alcinéa.*

# Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por todas as bênçãos e graças proporcionadas em minha vida.

Agradeço a meus pais, Bosco e Néa, pelo sustento, estudos, carinho, amor e confiança ao longo da minha vida. Graças ao incentivo, orientação e educação repassada por eles, pude chegar até esta etapa.

Agradeço também à minha esposa Suelem Cristina que dentro do possível sempre me auxiliou cuidando dos nossos filhos na minha ausência, além de me motivar quando desanimava, dizendo “tu tens que acabar logo com isso”. Não posso deixar de agradecer aos meus filhos Caio Nicolas e Kevin Lucas, pois mesmo sem saber e entenderem direito, são minhas motivações para a constante melhora paternal, profissional e espiritual. Por vocês sempre farei tudo que for preciso!!!

Agora agradeço especialmente à duas pessoas essenciais em minha vida acadêmica e profissional, Professores Pelaes e Gervásio. Os senhores me acolheram e proporcionaram meu crescimento sob vários aspectos, desde a minha chegada a secretaria do PPGEE, entrada no mestrado, até o doutorado. O compartilhamento de suas experiências e conhecimentos foram fundamentais para minha jornada, além de servirem de exemplos para mim. Obrigado por tudo, e principalmente pela confiança depositada em meu trabalho. Saibam que vocês são referências para todos nós do LCT, e todos aqueles que os conhecem.

Agradeço ao Prof. Fabrício por aceitar essa orientação de última hora, e fora de sua área de atuação. Obrigado pela confiança também.

Não posso deixar de prestar meus agradecimentos a todos os doutores, mestres e pesquisadores do (LCT<sup>1</sup>). À professora Jasmine pela atenção, dedicação, paciência e as dúvidas sempre esclarecidas ao longo desse doutorado. Ao Prof. Bruno Lyra que sempre tem uma boa resposta aos meus questionamentos sobre vários assuntos, e que também contribuiu bastante para o desenvolvimento deste trabalho. Ao meu amigo Edemir Marcus, que ajudou a formar o grupo de avaliação e qualidade de vídeo no LCT, e que cooperou significativamente para o estudo aqui apresentado, meu muito obrigado. Agradeço aos amigos membros do laboratório, os quais compartilharam minhas angústias e vitórias diariamente, Allan Braga, Allan Costa, Regina Nascimento, Miércio Alcântara, Ramz Luiz Fraiha Lopes, Nelson Mateus, Thiago, Hélio Renato, Iury Batalha, Hugo Cruz e ao André Pacheco. Assim como Wanderley, e outros que passaram pelo laboratório.

---

<sup>1</sup><http://www.lct.ufpa.br/>

Agradeço também a todos os colegas professores da FACEEL e amigos da UNIFES-SPA. À Universidade Federal do Pará, pela oportunidade dada a mim para a realização de minha dissertação mestrado, e agora a tese de doutorado. Um agradecimento especial à secretaria do PPGEE, hoje representada pela Dona Socorro, e da qual fui bolsista por alguns anos, fazendo várias amizades, e que sempre me recebeu muito bem.

Por fim, agradeço ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA (PPGEE<sup>2</sup>).

---

<sup>2</sup><http://www.ppgee.ufpa.br>



# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Contextualização . . . . .	1
1.2	Justificativa . . . . .	4
1.3	Objetivos . . . . .	5
1.3.1	Objetivos Específicos . . . . .	5
1.4	Contribuição do Trabalho . . . . .	5
1.5	Organização da Tese . . . . .	6
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA: REDES SEM FIO, AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO E MÉTODOS MATEMÁTICOS</b>	<b>7</b>
2.1	Considerações iniciais . . . . .	7
2.2	Avaliação de Desempenho . . . . .	7
2.2.1	Aferição . . . . .	8
2.2.2	Modelagem . . . . .	9
2.2.2.1	Simulação . . . . .	10
2.3	Tipos de Análises de Desempenho . . . . .	11
2.3.1	Análise Subjetiva . . . . .	11
2.3.1.1	<i>Absolute Category Rating</i> (Categoria de Pontuação Absoluta) . . . . .	12
2.3.1.2	<i>Degradation Category Rating</i> (Categoria de Pontuação por Degradação) . . . . .	12
2.3.1.3	Métricas . . . . .	13
2.3.1.4	MOS ( <i>Mean Opinion Score</i> ) . . . . .	13
2.3.2	Análise Objetiva . . . . .	14
2.3.2.1	Relação Sinal Ruído de Pico ( <i>PSNR</i> ) . . . . .	14
2.3.2.2	<i>SSIM</i> (Índice de Similaridade Estrutural) . . . . .	16
2.3.2.3	VQM (Métrica de Qualidade de Vídeo) . . . . .	17
2.4	Métodos dos Mínimos Quadrados Lineares - <i>MMQ</i> . . . . .	20
2.4.1	Regressão Linear . . . . .	20
2.4.2	Desvio Padrão . . . . .	21
2.4.3	Raiz do Erro Médio Quadrático ( <i>RMSE</i> ) . . . . .	22
2.5	Considerações finais . . . . .	22
<b>3</b>	<b>TRABALHOS CORRELATOS</b>	<b>23</b>
3.1	Considerações iniciais . . . . .	23
3.2	Trabalhos Relacionados a Análises de Qualidade de Vídeo . . . . .	23

3.3	Considerações finais . . . . .	36
<b>4</b>	<b>MODELAGEM DA PERDA DE QUALIDADE DE VÍDEOS H.264 EM REDES SEM FIO</b>	<b>37</b>
4.1	Considerações iniciais . . . . .	37
4.2	Vídeos Utilizados . . . . .	37
4.3	Metodologia Proposta para a Modelagem de Perda de Qualidade de Vídeo	39
4.3.1	Transmissão e Recepção de Vídeos . . . . .	40
4.3.2	Coleta dos <i>Traces</i> de Vídeo . . . . .	42
4.3.3	Simulações de Perda de Pacotes . . . . .	42
4.3.4	Extração das Métricas de Desempenho . . . . .	43
4.3.5	Remoção de <i>Outliers</i> e Agrupamento de Dados por Resolução de Vídeo . . . . .	44
4.3.6	Escolha de Parâmetros via Coeficiente de Correlação . . . . .	46
4.3.7	Modelagem da Perda de Qualidade de Vídeo . . . . .	46
4.4	Considerações finais . . . . .	51
<b>5</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS</b>	<b>52</b>
5.1	Considerações iniciais . . . . .	52
5.2	Resultados . . . . .	52
5.3	Considerações finais . . . . .	55
<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	<b>56</b>
6.1	Trabalhos futuros . . . . .	56
6.2	Produções científicas durante os estudos . . . . .	56
	<b>Referências</b>	<b>58</b>

# Lista de ilustrações

Figura 1	Previsão de Consumo de Dados até 2022. . . . .	1
Figura 2	Tipo de Formato de Vídeos Trafegados na Internet e Consumo Global de Vídeo. . . . .	2
Figura 3	Processo de Aferição. . . . .	8
Figura 4	Processo de Modelagem. . . . .	9
Figura 5	Exemplos de perda de <i>PSNR</i> . . . . .	15
Figura 6	Exemplos de perda de <i>SSIM</i> . . . . .	16
Figura 7	Fluxograma de Funcionamento do <i>VQM</i> . . . . .	17
Figura 8	Valores de <i>VQM</i> para uma mesma imagem. . . . .	18
Figura 9	Abordagem <i>QoS</i> e <i>QoE</i> . . . . .	19
Figura 10	Domínio de <i>QoS</i> e <i>QoE</i> . . . . .	19
Figura 11	Relação entre <i>MOS</i> versus Perda de Pacotes. . . . .	24
Figura 12	Resultado do Modelo proposto por Ramasamy (KARTHIKEYAN; SAINARAYANAN; DEEPA, 2014). . . . .	25
Figura 13	Mapeamento <i>QoE</i> para <i>QoS</i> (ZHANG; ZHOU; JIN, 2016). . . . .	26
Figura 14	Comparação de Desempenho de Taxas de <i>SSIM</i> (PENG et al., 2014). . . . .	27
Figura 15	Resultados de <i>SSIM</i> para <i>MPEG – 2(a)</i> e <i>MPEG – 4(b)</i> (FRNDA; VOZNAK; SEVCIK, 2015). . . . .	28
Figura 16	Resultados da Variação do atraso para vídeos em <i>HD(a)</i> e <i>Full HD(b)</i> . . . . .	28
Figura 17	Diagramas de dispersão da predição <i>VQM – VFD</i> . Estudo de mobilidade(a) e Estudo de <i>Tablet PC(b)</i> . . . . .	30
Figura 18	Comparação do <i>SSIM</i> médio para diferentes sequências de vídeo. . . . .	31
Figura 19	Comparação do <i>VQM</i> médio para diferentes sequências de vídeo. . . . .	32
Figura 20	<i>SSIM</i> médio para os 100 episódios de vídeo na fase de teste ( <i>traces</i> reais). . . . .	32
Figura 21	Relação entre o índice <i>MOS</i> e a relação entre o atraso inicial do <i>buffer</i> e o comprimento total do vídeo. . . . .	33
Figura 22	Comparação de desempenho do objetivo <i>MOS</i> determinado por $V_S QM_{DASH}$ em relação ao <i>MOS</i> subjetivo. . . . .	34
Figura 23	Mapeamento <i>RNN</i> da <i>PSNR</i> predito. . . . .	35
Figura 24	Vídeos Utilizados. . . . .	38
Figura 25	Metodologia de Desenvolvimento do Trabalho. . . . .	39

Figura 26	Cenário de Testes. . . . .	41
Figura 27	Mecanismo de Remoção de linhas. . . . .	43
Figura 28	Dados Obtidos após Simulação de Perda de Pacotes para Vídeos em 720p. . . . .	45
Figura 29	Valores de Perda de <i>PSNR</i> . . . . .	47
Figura 30	Valores da Perda de <i>Frames</i> Total <i>versus</i> Perda de <i>PSNR</i> para as três Resoluções. . . . .	48
Figura 31	Comportamento das constantes “a” e “b” para as três Resoluções. . . .	50
Figura 32	Resultado da Modelagem proposta para a Resolução de 720p. . . . .	53
Figura 33	Resultado da Modelagem proposta para a Resolução de 1080p . . . . .	53
Figura 34	Resultado da Modelagem proposta para a Resolução de 2160p. . . . .	54

# Lista de tabelas

Tabela 1	Tipos de Vídeos. . . . .	2
Tabela 2	Normas de avaliação de Qualidade de dados multimídia. . . . .	11
Tabela 3	Metodologia para execução das avaliações de qualidade de vídeo. . . . .	12
Tabela 4	Avaliação subjetiva de um vídeo segundo o <i>MOS</i> . . . . .	13
Tabela 5	Relação <i>MOS</i> e <i>PSNR</i> . . . . .	15
Tabela 6	Comparação de Desempenho MDVC versus Outros modelos. . . . .	26
Tabela 7	Descrição das Dimensões do vídeo avaliadas (SCHIFFNER; MOLLER, 2018) . . . . .	28
Tabela 8	Comparação do modelo proposto <i>VQDIM</i> com outros modelos da literatura. . . . .	29
Tabela 9	Condições testadas no estudo em (HAMEED; DAI; BALAS, 2016) . . . . .	31
Tabela 10	Valor percebido de Recursos Consumidos no Dispositivo Móvel. . . . .	34
Tabela 11	Resultados de validação de modelos <i>RNN</i> (GHALUT; LARIJANI; SHAHRABI, 2015) . . . . .	34
Tabela 12	Tabela de Trabalhos Relacionados. . . . .	36
Tabela 13	Valores de <i>PSNR</i> para cada vídeo. . . . .	38
Tabela 14	Características dos dispositivos utilizados. . . . .	41
Tabela 15	Valores de Correlação dos Frames I, B, P e Total para cada resolução de Vídeo. . . . .	46
Tabela 16	Valores para as variáveis <i>a</i> e <i>b</i> . . . . .	50
Tabela 17	Resultados <i>RMSE</i> e Desvio Padrão . . . . .	54

# Lista de abreviaturas e siglas

4K UHD Ultra High Definition – 4.000 pixels

ACR Classificação categórica adjetiva (Adjectival Categorical Rating)

ADRS Avaliação de Desempenho de Redes e Sistemas

ANSI Instituto Nacional Americano de Padrões

BitRate Taxa de Transmissão de Bits

CIF Formato Intermediário Comum (Common Intermediate Format)

DCR Degradation Category Rating (Classificação da Categoria de Degradação)

DSCQS Double Stimulus Continuous Quality Scale (Escala de Qualidade Contínua de Duplo Estímulo)

DSIS Double Stimulus Impairment Scale (DSIS - Escala Dupla de Estímulo)

ETSI European Telecommunications Standards Institute

EvalVid A Video Quality Evaluation Tool-set

FPS Frames per Second (Quadros por Segundo)

FR Full Reference

Frame B Frame/Quadros Bi-Preditivos

Frame I Frame/Quadros Inter

Frame P Frame/Quadros Preditivos

GOP Group of Pictures

H.264 Padrão de Compressão de vídeo baseado no MPEG-4 parte 10

HD High Definition

HTTP Hypertext Transfer Protocol

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers

IP Internet Protocol

ISO International Organization for Standardization

ITS The Institute for Telecommunication Science

ITU International Telecommunication Union

KDD Processo de Descoberta de conhecimentos em Bases de Dados

LAN Local Area Network (Rede Local)

LTE Long Term Evolution

Mbps Mega bits por segundo

MDVC Grau de Movimento de Conteúdo de Vídeo

MOS Mean Opinion Score (Opinião Média do Usuário)

MPEG-4 Padrão de Compressão de áudio e vídeo

MSE Mean Square Error

NR No-Reference

NS-2 Network Simulator Version 2

NS-3 Network Simulator Version 3

OFDM Modulação por Divisão Ortogonal de Frequência

OPNet Optimum Network Performance Simulator

PC Peer Comparison

PSNR Peak Signal to Noise Ratio

QCIF Quarto do Formato Intermediário Comum (Quarter Common Intermediate Format)

QoE Quality of Experience

QoS Quality of Service

RMSE Root-Mean-Square Error

SAMVIQ Subjective Assessment Method for Video Quality (Metodologia de Avaliação Subjetiva para Qualidade de Vídeo)

SIF Formato de Entrada de Origem (Source Input Format)

SNR Signal-to-Noise Ratio

SSCQE Single Stimulus Continuous Quality Evaluation (Metodologia Contínua de Estímulo Único)

SSIM Structural Similarity Index

SVH Sistema Visual Humano

TIC Tecnologia de Informação e Comunicação

UDP User Datagram Protocol

UHD Ultra High Definition

VQM Video Quality Metric

WLANs Wireless Local Area Networks

YUV Formato de vídeo sem compressão



# Resumo

As aplicações multimídia vêm crescendo bastante nos últimos anos; novos consumos como jogos online, videoconferência, vídeo sob demanda e telefonia IP são algumas dessas. Porém, percebe-se um destaque maior na busca relacionada à vídeos e *streamings*, atualmente em altas resoluções e, trafegados majoritariamente sobre redes de comunicações sem fio. Principalmente por conta da proliferação de dispositivos móveis e aumento significativo das redes de acesso, que tornam mais cômodo e fácil o provimento a essas informações. Assim, como consequência imediata desse tipo de fluxo, surge a necessidade de investimentos em técnicas e mecanismos que proporcionem ao usuário final a qualidade e satisfação desejadas diante de um conteúdo de alta definição. Este trabalho visa realizar a modelagem da perda de qualidade de vídeos, através da análise de desempenho destes em diversas resoluções, especificamente padrões em HD e UHD, em 720p, 1080p e 2160p. Nesse sentido, uma investigação de correlação entre as métricas extraídas dos vídeos é aplicada, através do coeficiente de correlação de Pearson, e fundamentos da área em questão. Propõem-se também equações para a modelagem de perda de qualidade, baseadas em análise de métricas associadas à perda de pacotes, em que ao final do estudo e conforme apontamentos realizados ao longo do texto, utilizou-se para a equação geral da modelagem, os parâmetros de Perda de PSNR e Perda de *Frames* Total. O resultado obtido mostra valores máximos de RMSE e Desvio Padrão, de 0,793 dB e 0,810 dB, respectivamente, tornando o modelo desenvolvido muito bom para o conjunto de vídeos testado e suas resoluções.

**Palavras-chave:** Modelagem, Perda de qualidade, Desempenho, perda de PSNR, perda de *Frames*, H.264.

# Abstract

Multimedia applications have been growing in recent years; new consumptions like online games, video conference, video on demand and IP telephony are some of these. However, there is a greater prominence in the search related to videos and streaming, currently in high resolutions and mostly traffic over wireless networks, mainly due to the proliferation of mobile devices and significant increase of access networks, which make it more comfortable. Providing this information is easy. Thus, as an immediate consequence of this type of flow, there is a need for investments in techniques and mechanisms that provide the end user with the desired quality and satisfaction in the face of high definition content. This work aims to perform the modeling of video quality loss by analyzing their performance in various resolutions, specifically standards in HD and UHD, at 720p, 1080p and 2160p. In this sense, applying a correlation investigation between the metrics extracted from the videos, using Pearson's correlation coefficient, and fundamentals of the area in question. Also proposing equations for quality loss modeling, based on analysis of metrics associated with packet loss, in which at the end of the study and according to notes made throughout the text, we used for the general modeling equation, the parameters of Loss of PSNR and Loss of Total Frames. The result obtained shows maximum values of RMSE and Standard Deviation of 0.793 dB and 0.810 dB, respectively, making the developed model very good for the tested video set and its resolutions.

**Keywords:** Modeling, Loss of Quality, Performance, Loss PSNR, Loss of Frames, H.264.

# 1 Introdução

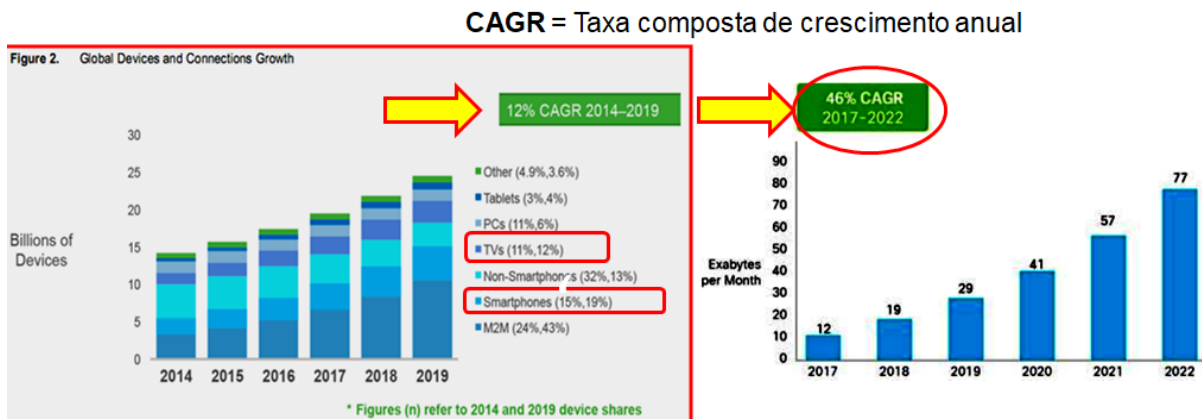
## 1.1 Contextualização

A Internet tornou-se uma ferramenta indissociável no mundo atual. Esta rede de comunicação foi capaz de criar e fortalecer laços de contato entre os indivíduos, independentemente do espaço físico ou cultural que os separe. Para isso, este meio de troca de informações suporta aplicações e serviços, dentre os quais podemos destacar o *e-mail*, consulta de informações em páginas web e serviços multimídia (ALMEIDA, 2004.).

Nos últimos anos, os serviços de multimídia, especialmente a transmissão de vídeo tem se caracterizado como umas das mais importantes aplicações da internet (CUNHA., 2012.). Assim, a distribuição destes fluxos por este meio vem se popularizando bastante, devido, principalmente, a facilidade de acesso e aumento da disponibilidade aos usuários.

Como resultado desta tendência, o tráfego de *streaming* de vídeo na internet em 2017 para dispositivos móveis alcançou 59% do total de dados móveis, ou seja, este tipo de tráfego multimídia já corresponde a mais de 50% de todo o tráfego na internet (CISCO, 2019.). O relatório da CISCO ainda destaca que junto com o aumento do tráfego de dados móveis, outra tendência, é que os vídeos passem a consumir mais dados também, totalizando um aumento de cerca de 46% quando comparado ao relatório anterior, o que acarreta em uma projeção de um fluxo de 77 *exabytes* por mês no ano de 2022, conforme mostra a Fig. 1.

Figura 1 – Previsão de Consumo de Dados até 2022.

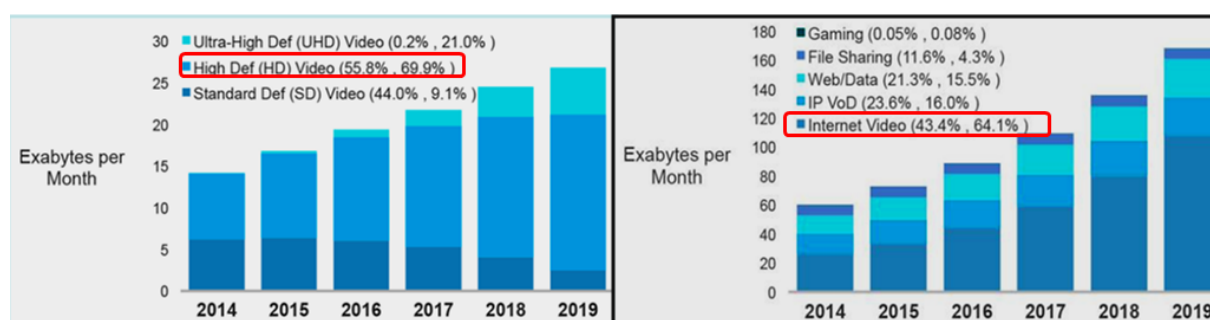


Fonte: (CISCO, 2017.)

Pode-se destacar que a *CISCO* possui outros relatórios anteriores, a exemplo de

(CISCO, 2017.), que já vinham apontando essa tendência de crescimento de consumo na internet. Outro fator a ser levado em consideração para este trabalho, é a evolução dos padrões de vídeo, que inclusive ganham destaque também nesses relatórios de 2015 e 2017, conforme mostra Fig.2.

Figura 2 – Tipo de Formato de Vídeos Trafegados na Internet e Consumo Global de Vídeo.



Fonte: CISCO 2015 e 2017 (CISCO, 2017.)

Nota-se nestes gráficos que o consumo desse tipo de tráfego vem aumentando significativamente, e chegando às classificações de *HD (High Definition)*, 2k (resolução horizontal de ordem de 2.000 pixels), e 4K *UHD (Ultra High Definition – 4.000 pixels)*, atualmente os mais conhecidos (LEMOS, 2014), porém já com perspectivas para 8K e 10K em breve. A Tabela 1 mostra a relação dos padrões de vídeo com as resoluções.

Tabela 1 – Tipos de Vídeos.

Padrão de Vídeo	Resolução
HD	1280 x 720 pixels
FULL HD	1920 x 1080 pixels
2K	2048 x 1080 pixels
4K ou Ultra HD (UHD)	3840 x 2160 pixels
8K	7680 x 4320 pixels
10K	10240 x 4320 pixels

Fonte: Adaptado de (LEMOS, 2014).

Os vídeos em *UHD* por possuírem resoluções elevadas, exigem do codificador de fonte altas taxas de *bitrate*, trazendo com consequência a necessidade de grande largura de banda ao serem transmitidos por uma rede. Por isso, estes passam a ser alvo de estudos tanto no desenvolvimento de codificadores eficientes, quanto no planejamento de redes de computadores. Dessa forma, na área de codificação, procura-se atender uma qualidade de vídeo aceitável, minimizando o espaço para armazenamento da informação, e que como consequência desse processo ocasiona perda de qualidade já na fonte. Na parte do planejamento de redes procura-se otimizar o fornecimento do serviço e, alcançar

a satisfação do usuário final, representada hoje principalmente por medidas de qualidade de experiência (*QoE – Quality of Experience*)(SANTOS, 2010).

Para (LOURENÇO, 2014) as transmissões de vídeo em alta resolução na internet, traça-se uma perspectiva de domínio no mercado de consumo de serviços pelos próximos anos, sendo que em países como, Japão e Holanda, saem na frente desse mercado e já apresentam infraestrutura para melhor suportar esses fluxos nos formatos de alta e ultra resoluções.

Dessa forma, para comparar ou estimar parâmetros de qualidade associada ao serviço que o usuário final recebe do provedor, e dependendo do formato e resolução de vídeo há uma grande quantidade de pacotes associado, constata-se uma real carência de realização de trabalhos que façam a avaliação de desempenho de redes, modelagem e otimização relacionada a qualidade de vídeo/*streamings* analisada para o usuário final.

A minimização do processo de perdas, seja na codificação, seja no processo de transmissão/recepção de vídeos. Ou seja, garantir uma qualidade satisfatória do vídeo recebido pelo usuário final torna-se um grande desafio técnico. Nesse contexto, vale ressaltar que a transmissão de *streaming* tem gerado uma série de novos problemas oriundos principalmente da concorrência por banda e *buffer*, e de bons requisitos de rede como *jitter*, *delay* e perda de pacotes. Desse modo, existem diversos desafios para garantir qualidade de serviços para os diferentes receptores, utilizando ao máximo a capacidade de cada receptor, prover o melhor aproveitamento de banda, evitar ou reagir rapidamente a congestionamentos na rede e atender a variações repentinas do número de usuários ativos (LOURENÇO, 2014).

Observando esses fatores citados anteriormente, percebe-se que, assegurar qualidade do serviço (*QoS – Quality of Service*) é fundamental, mas também se faz necessário garantir a satisfação do usuário/cliente. Isto impacta na realização de investigação sobre as principais características (ou parâmetros) de perda de qualidade, que acarretam a degradação dos vídeos, e na conseqüente insatisfação de usuário. O estudo inclusive pode servir de base para posteriores desenvolvimentos de mecanismos que garantam a qualidade perceptiva dos vídeos ou *streaming* entregues a este utilizador.

Este trabalho propõe uma Modelagem da Perda de Qualidade de Vídeo H.264 sob Redes Sem Fio. Foram analisadas várias métricas de vídeo que são afetadas pela perda de pacotes, são elas: a perda de *PSNR*, a perda de *frames* I, perda de *frames* P, perda de *frames* B, e a perda de *frames* total (inclui os três tipos de *frames*). Deste modo, esse conjunto de informações foi analisado através do Coeficiente de Correlação de Pearson, com o objetivo de obter os valores correlação de cada uma das métricas, e escolher as mais representativas para o equacionamento da modelagem. Para este trabalho, será abordada a área de modelagem da perda de qualidade de vídeos em H.264.

## 1.2 Justificativa

Com o desenvolvimento e evolução das tecnologias de informação e comunicação (*TICs*), o acesso as aplicações multimídias tornou-se mais facilitado, em que os dispositivos móveis contribuem em grande parte para este avanço.

As principais dificuldades existentes para que se possa garantir qualidade aos vídeos, residem em vários aspectos a serem observados. O processo de transmissão e recepção de vídeos, as ferramentas utilizadas (principalmente *codecs*), a rede de dados usada para o tráfego multimídia, o volume de dados transmitidos, etc. Desse modo, a transmissão, o armazenamento e a reprodução de vídeos tornam-se fatores a serem estudados, principalmente quando a resolução de vídeo é ampliada (SANTOS, 2010). Assim, QoS é mais exigido em aplicações de vídeos definindo limites a uma série de parâmetros. Ressalta-se que qualidade de experiência do usuário vem ganhando cada vez mais importância neste contexto.

Hoje há uma carência de estudos que mostrem ou avaliem o impacto causado na recepção de vídeos H.264 degradados, perdendo componentes como *frames* I, P e B. Além disso, não se encontrou no levantamento do estado da arte, relacionamentos entre estes, e métricas oriundas de outras camadas. Assim uma análise que proporciona uma correlação entre elementos de camadas diferentes (estudo *Crosslayer*) é sempre interessante.

Constata-se então, que estudos precisam ser realizados para ajudar tanto no próprio planejamento de redes de comunicação, quanto na otimização para transmissão e recepção de tráfegos como os de *streaming* de vídeo de alta definição. Visando tornar o processo de comunicação mais eficiente, do ponto de vista de estimação de qualidade, o presente trabalho apresenta uma proposta de Modelagem da Perda de Qualidade de Vídeos em H.264. Para isto, é realizado um estudo empírico baseado na transmissão e recepção de vídeos em rede sem fio do tipo *IEEE802.11ac*, uma vez que este padrão é um dos mais recentes e tentar prover uma melhor qualidade para fluxos multimídia. E na análise de métricas de desempenho destes vídeos, gerando uma base de dados por resolução, todas com porcentagens de perda de pacotes, que vão de 2 a 30%.

Outro ponto a ser destacado é que, a modelagem proposta pode ajudar em sistemas de apoio a decisão, em função do baixo custo computacional para realizar as estimativas de perda de qualidade na camada de aplicação.

Além disso, a análise realizada pode alavancar outras pesquisas e até servir de base para generalizar o modelo proposto para outras resoluções (uma vez que este trabalho testes as 3 resoluções citadas) e codificações de vídeo. Em particular objetiva-se realizar uma modelagem da perda de qualidade de vídeos H.264 levando em considerações *PSNR* e *Frames* Totais. Para a escolha desses dois parâmetros, em umas das etapas do trabalho aplicou-se o Coeficiente de Correlação de Pearson para verificar as perdas de

maior correlação, entre perda de *frames* I, P, B e total, todas estas em comparação com a perda de pacotes. Constatando assim que numericamente a perda de maior valor foi a perda de *frame* total em duas das três resoluções de vídeo em análise, tendo como opção o *frame* P (com resultados bem próximos), mas que ao analisar a facilidade de obter dados para perda total de *frames* na aplicação, optou-se por esta última. Já a perda de *PSNR* foi a outra escolhida por ser uma métrica bastante representativa e utilizada em diversos trabalhos [15, 18, 23, 32] para mensurar a qualidade de imagem e vídeo recebidos pelo usuário final. Além disso, pode ser representada por uma função logarítmica, a qual se aproxima melhor da curva dos dados.

## 1.3 Objetivos

Essa tese de doutorado tem como objetivo principal apresentar uma modelagem da perda de qualidade de vídeos H.264 em redes sem fio considerando a perda de *PSNR* e Perda de *Frames*, nas três resoluções analisadas, 720p, 1080p e 2160p.

### 1.3.1 Objetivos Específicos

- Realizar uma análise de desempenho da perda de qualidade de vídeo com resoluções de 720p, 1080p e 2160p;
- Aplicar estudo de correlação entre diversos parâmetros;
- Criar uma modelagem matemática relacionando a perda de *PSNR*, e a perda total de *frames*;
- Obter uma equação de estimativa/predição de perda de qualidade de vídeos;
- Obter valores mínimos de *RMSE* e Desvio Padrão para o conjunto de dados analisados.

## 1.4 Contribuição do Trabalho

A metodologia apresentada traz as seguintes contribuições:

- Estudo da perda de qualidade de vídeos em três diferentes resoluções, 720p, 1080p e 2160p;
- Geração de uma base de dados de vídeos degradados (2 a 30%), importantes para este trabalho e pesquisas futuras;
- Desenvolvimento de uma modelagem para perdas de qualidade de vídeos H.264;

- Possibilidade do uso da modelagem proposta para auxílio a sistemas de apoio a decisão;
- Aplicação de técnica da regressão para remoção de *outliers*, e agrupar dados por resolução de vídeo;
- Extrair métricas de desempenho como perda de *frames* I, P, B e Total, Perda de *PSNR*.

## 1.5 Organização da Tese

A presente tese esta organizada da seguinte forma:

- Este capítulo busca contextualizar o objeto de estudo, suas contribuições; a importância da pesquisa; o objetivo desta dissertação e suas contribuições;
- No Capítulo 2 será apresentada a Revisão Bibliográfica contendo os assuntos de redes locais sem fio, avaliação de desempenho de redes, e métodos matemáticos;
- O Capítulo 3 são retratados os trabalhos correlatos que serviram de subsídio para a pesquisa realizada neste documento;
- No Capítulo 4 é exibida a proposta do trabalho, contendo toda a metodologia de desenvolvimento, etapas e modelagem realizada;
- No Capítulo 5 são apresentados os resultados e suas análises;
- A conclusão, trabalhos futuros e produção científica são abordados no Capítulo 6.



## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA: REDES SEM FIO, AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO E MÉTODOS MATEMÁTICOS

### 2.1 Considerações iniciais

Este capítulo tem por objetivo abordar os principais fundamentos da área central deste trabalho, a avaliação de desempenho de transmissão/recepção de vídeo, pois é a parte central do estudo e que envolve conhecimentos desta área da computação. Neste capítulo serão apresentados as principais métricas utilizadas, tipos de metodologias de análises, e outros aspectos relacionados.

### 2.2 Avaliação de Desempenho

A avaliação (ou análise) de desempenho é um mecanismo essencial no ciclo de funcionamento de um sistema, pois durante o planejamento pode ser usado para averiguar o comportamento do sistema. Já após implantação pode ser utilizado para encontrar problemas de perda de performance, e assim facilitar a manutenção, e obter melhorias necessárias.

A avaliação de desempenho é um estudo que pode ser aplicado em várias áreas de conhecimento (JAIN, 1991), e de diversas maneiras seja através de Aferição (*benchmarks*, protótipos ou monitores), ou de Modelagem (através de soluções Analíticas ou soluções por Simulação). Nesse contexto devem-se observar três conceitos importantes:

- Desempenho: conceito subjetivo que pode ser abordado de vários aspectos ou pontos de vista;
- Avaliação de Desempenho: estratégia que a partir de métrica(s), apresenta um diagnóstico sobre o comportamento do sistema;
- Métricas: critério usado para quantificar o desempenho de um sistema.

Segundo (JAIN, 1991), as etapas básicas para um estudo de avaliação de desempenho são:

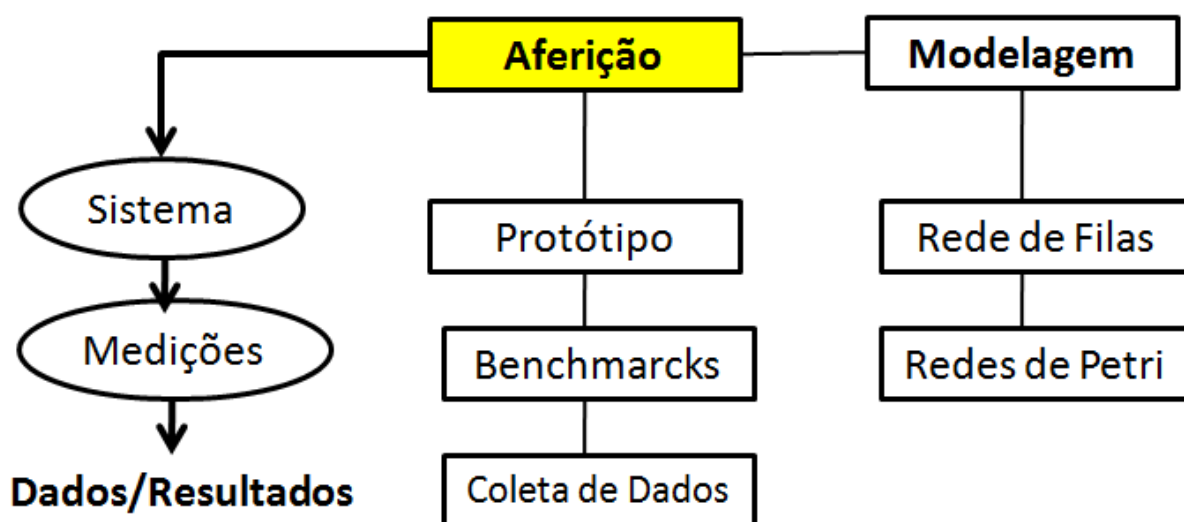
- 1 Definir os objetivos e limites do sistema;
- 2 Selecionar as métricas;
- 3 Selecionar a(s) técnica(s) de avaliação;
- 4 Analisar e interpretar os dados;
- 5 Refazer todo o estudo, se necessário;
- 6 Apresentar os resultados.

### 2.2.1 Aferição

A técnica de aferição consiste em coletar dados sobre o desempenho de um sistema existente para posterior análise. Uma definição mais precisa enfatiza que a aferição é um processo de monitoramento, ou seja, medição e entendimento dos eventos internos e suas inter-relações, de modo a permitir que pequenas alterações no hardware e/ou no software possam acarretar considerável melhoria em seu desempenho (SANTANA, 2018).

Em casos que o sistema já está em funcionamento e seu desempenho pode ser investigado empiricamente, as técnicas de aferição geralmente são mais recomendadas. A Fig. 3 exemplifica sua atuação dentro da área de avaliação de desempenho.

Figura 3 – Processo de Aferição.



Fonte: Adaptado de (SANTANA, 2018)

Assim, umas das técnicas de aferição, a Prototipação, nada mais é que uma implementação simplificada do sistema real, onde há abstração das características essenciais do

sistema. Já os *benchmarks* são Programas escritos em linguagens de alto nível, são representativos para uma classe de aplicações, e bastante utilizados para medir o desempenho de um dado sistema, ou para comparar diferentes sistemas em fase de projeto. Por fim a Coleta de Dados pode ser utilizada através de duas abordagens Monitores de *Software* ou de *Hardware*, é uma técnica voltada inteiramente para a avaliação de sistemas existentes (JAIN, 1991), pois apresenta as seguintes características: resultados mais precisos; e coleta não intrusiva.

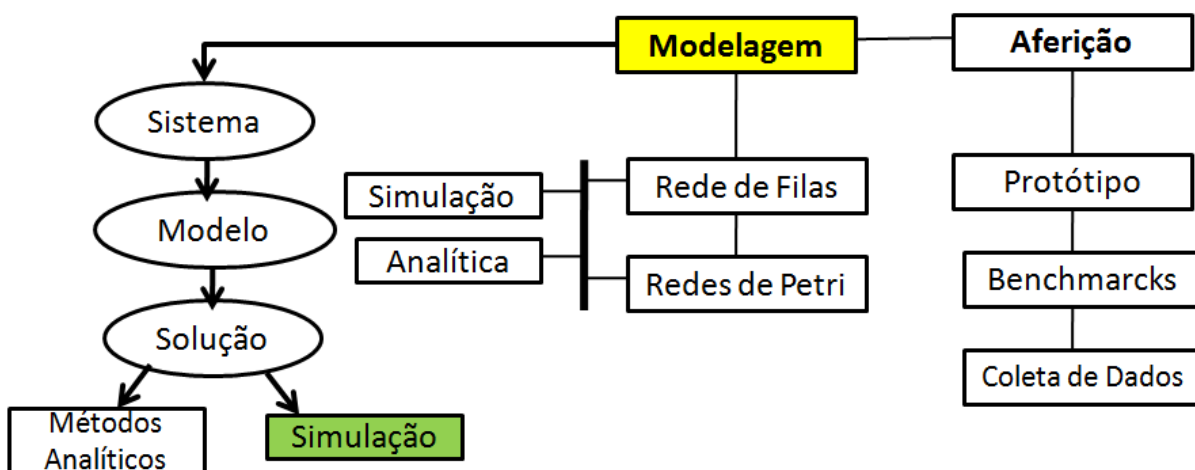
Resumindo, as técnicas de aferição são indicadas para serem aplicadas quando um sistema existe parcialmente ou totalmente, onde as medidas de desempenho são extraídas a partir de experimentos desse sistema.

### 2.2.2 Modelagem

Ao contrário do que a aferição, para sistemas que ainda não existem, geralmente aplica-se a modelagem, um procedimento comumente complexo, com rigor matemático, que visa caracterizar atributos essenciais de um sistema real.

A modelagem é um processo através do qual cria-se uma abstração que represente fielmente o sistema, e geralmente é representada por equações matemáticas (SANTANA, 2018). Esta técnica mapeia as características do sistema em um modelo tratável matematicamente, em que quanto mais variáveis esse modelo utilizar, mais próximo de uma caracterização ideal o modelo de sistema chegará. O processo de modelagem pode ser exemplificado na Fig. 4.

Figura 4 – Processo de Modelagem.



Fonte: Adaptado de (SANTANA, 2018)

A técnica matemática Rede de Petri, de acordo com (FRANCÊS, 2003) é uma técnica de modelagem que permite a representação de sistemas, utilizando como alicerce uma

forte base matemática. Possui a particularidade de permitir modelar sistemas paralelos, concorrentes, assíncronos e não-determinísticos.

Já a Rede (ou Teoria) de Filas, de acordo com (REZENDE, 2011), é um corpo de conhecimentos matemáticos, aplicado ao fenômeno das filas. Sendo assim, podem ser descritos, genericamente, por um processo de chegada de clientes a um sistema de atendimento. Esse sistema recebe um ou mais serviços, executados por certa quantidade de servidores. Nesse sentido, há formações de filas, que acontecem porque a procura pelo serviço, é maior que a capacidade de o sistema atender a esta demanda.

Com tudo que já foi mencionado, conclui-se que o processo de avaliação de desempenho por meio da modelagem, consiste de um conjunto de estágios intimamente relacionados. Podendo ser exemplificadas na seguinte ordem:

- **Especificação do Modelo:** inicialmente cria-se uma especificação do sistema, onde devem estar presente os componentes mais relevantes (essenciais) à análise, além de detalhes do relacionamento entre as variáveis. Não pode haver ambiguidades, e o objetivo dessa etapa é apontar os parâmetros a serem passados como entrada para a etapa de solução. Os métodos mais comuns utilizados nesta especificação são: Redes de Petri, Redes de Fila, *Statecharts*, e Diagramas de Estados (JAIN, 1991);
- **Parametrização do Modelo:** uso dos parâmetros indicados pela especificação coerente com o sistema;
- **Solução:** nesta etapa as métricas de desempenho devem representar de forma qualitativa o comportamento do sistema, em função das entradas do modelo. Podem ser utilizados para isso mecanismos matemáticos automatizados ou não. Alguns métodos analíticos utilizados são: Cadeias de *Markov* e Teoria de Filas, ou simulações (JAIN, 1991). Como resultados desta etapa são gerados gráficos ou arquivos textos para possíveis identificações de pontos críticos do sistema.
- **Resultados:** para validação dos resultados geralmente são utilizadas medidas estatísticas como *MSE*, *RMSE* e Desvio padrão. Para assim constatar a necessidade ou não de melhorar a especificação do sistema ou a parametrização do modelo.

### 2.2.2.1 Simulação

No processo de simulação busca-se reunir recursos matemáticos e computacionais para modelar atributos do mundo real, esta é a principal característica que faz a simulação ser frequentemente utilizada, considerando que dependendo do tamanho do sistema a ser representado, costumam ser caros e complexos. Uma vez utilizada esta técnica pode verificar o desempenho de um sistema para verificar seu comportamento, desta forma é comum

encontrar trabalhos com realizam estimativas/predições que auxiliam em otimizações de sistemas.

Dessa forma, listam-se alguns fatores positivos no uso de simulações:

- 1 Verificação de detalhes só encontrados com um número significativo de repetições;
- 2 Velocidade na obtenção de resultados, já se pode economizar tempo e custos;
- 3 Ganhos de produtividade e qualidade.

Na academia é comum encontrar trabalhos que usufruem dessa vertente da análise de desempenho de redes e sistemas, uma vez que existe uma gama significativa de ferramentas que dão suporte a esta técnica em diversas áreas. Em redes de computadores há alguns desses simuladores como *NS-2* e *NS-3*, *OPNET*. Neste trabalho utilizaremos o *framework Evalvid* e seu conjunto de ferramentas para enviar, receber e ser monitor da rede.

## 2.3 Tipos de Análises de Desempenho

### 2.3.1 Análise Subjetiva

A abordagem de avaliação de desempenho subjetiva de dados multimídia é guiada por normas internacionais, que recomendam como devem ser realizadas as etapas do processo de avaliação (UNION, 2008). A Tabela 2 apresenta algumas normas importantes em relação à avaliação de qualidade de dados multimídia (não apenas vídeo) com uma breve descrição de seu conteúdo.

Tabela 2 – Normas de avaliação de Qualidade de dados multimídia.

Nome	Descrição
ITU-R BT.500	Metodologias para avaliação subjetiva da qualidade de vídeo em televisores
ITU-R P.910	Métodos para avaliação subjetiva de vídeos em aplicações multimídia
ITU-R P.911	Métodos para avaliação subjetiva de dados audiovisuais em aplicações multimídia
ITU-T J.144	Técnicas para avaliação objetiva de vídeo para televisão a cabo na presença de referência (vídeo de referência sem degradação, erros de transmissão, etc.)
ITU-R BS.1387	Avaliação de sistemas de áudio de alta qualidade

Para a análise de vídeo, a norma que mais se aplica é a P.910 (UNION, 2008), que corresponde a uma atualização e adaptação da BT.500, norma direcionada a sistemas de televisão (UNION, 2012). Uma das etapas mais importantes nesse processo é a definição da metodologia a ser utilizada (testes junto aos usuários). A Tabela 3 mostra algumas metodologias especificadas nas duas normas citadas anteriormente.

Um aspecto importante que diferencia as metodologias desse tipo de análise, é em relação à apresentação ou não de uma referência durante a avaliação. Esta é uma versão

Tabela 3 – Metodologia para execução das avaliações de qualidade de vídeo.

Referência	Nome	Sigla
ITU-R BT.500	<i>Double Stimulus Continuous Quality Scale</i>	DSCQS
ITU-R BT.500	<i>Double Stimulus Impairment Scale</i>	DSIS
ITU-R BT.500	<i>Single Stimulus Continuous Quality Evaluation</i>	SSCQE
ITU-R BT.500, ITU-R P.910	<i>Adjectival Categorical Rating</i>	ACR
ITU-R P.910	<i>Degradation Category Rating</i>	DCR
ITU-R P.910	<i>Pair Comparison</i>	PC
EBU	<i>Subjective Assessment Method for Video Quality</i>	SAMVIQ

do vídeo sem degradações (pelo menos imperceptíveis ao olho humano), e a qual servirá de base para a comparação a ser realizada com o(s) vídeo(s) degradado(s). Assim existe uma classificação de metodologias voltadas à este aspecto, divididas em FR (*Full Reference*, necessitam de uma referência) e NR (*No-Reference*, não necessitam de referência).

Com relação à exibição outra classificação é atribuída à avaliação, *Single Stimulus* (estímulo único) ou *Double Stimulus* (estímulo duplo). Ou seja, exibir apenas o vídeo que está sendo analisado pelo avaliador naquele momento, ou, exibir o vídeo que está sendo analisado e uma referência deste ao mesmo tempo (UNION, 2008)(UNION, 2012). Baseando-se nesses aspectos abordados, serão citadas as principais metodologias.

### 2.3.1.1 *Absolute Category Rating* (Categoria de Pontuação Absoluta)

A metodologia de Categoria de Pontuação Absoluta, adota o estímulo único, em que os telespectadores observam o vídeo em teste sem referência. Atribuem uma nota para a qualidade global (absoluta) usando uma escala de cinco níveis distintos variando de Péssimo, Ruim, Regular, Bom e Excelente (ordem ascendente de pontuação). O fato de não ser mostrada um vídeo de referência, torna o método mais rápido.

### 2.3.1.2 *Degradation Category Rating* (Categoria de Pontuação por Degradação)

Esta metodologia, Categoria de Pontuação por Degradação, adota o mecanismo de duplo estímulo, onde a avaliação é feita em pares (primeiro estímulo deve ser o vídeo de referência, e o segundo o vídeo degradado, ou em avaliação). Uma observação interessante é apresentada em (UNION, 2012), quando os vídeos avaliados possuem resoluções baixas (*CIF, QCIF, SIF* – abaixo de 352x240 linhas), em que estes (referência e degradado) devem ser visualizados no mesmo monitor simultaneamente. A escala de notas recebe uma nomenclatura diferente do *ACR*, relacionadas à percepção ou não de falhas/degradações, Imperceptível, Perceptível sem incômodo, Ligeiramente Incômodo, Incômodo e Muito Incômodo.

### 2.3.1.3 Métricas

As métricas subjetivas de *QoE* avaliam a qualidade das aplicações multimídias baseadas na opinião do usuário. O usuário qualifica o vídeo de acordo com a “experiência” que teve diante do mesmo. Esta qualificação é feita através de uma “nota” atribuída pelo usuário ao vídeo assistido. As métricas subjetivas dependem exclusivamente da opinião/avaliação do usuário final, pois o grande objetivo é justamente melhorar os serviços para os clientes finais. A principal métrica relacionada é o *MOS* (*Mean Opinion Score*).

#### 2.3.1.4 MOS (*Mean Opinion Score*)

De forma resumida, o processo de avaliação de forma subjetiva obedece a uma sequência de ações, começando pela construção de um painel de observadores que irá avaliar um vídeo, interpretá-lo e atribuir uma nota de acordo com o nível de qualidade (a exemplo da Tabela 4). O que talvez seja uma dificuldade deste tipo de avaliação é o tempo demandado para execução total, pois para dar mais confiabilidade necessita de um elevado número de avaliadores, implicando também em custos e investimentos adicionais.

Para o caso de reprodução de vídeos, a abordagem mais precisa para se avaliar a qualidade, é a metodologia subjetiva, pois não existe melhor indicador do que a percepção humana. A questão a ser considerada, é que essa avaliação de qualidade dada por uma pessoa depende de vários aspectos, como experiência, humor e outros sentimentos presentes nos seres humanos, e que podem variar bastante de indivíduo para indivíduo.

Assim como algumas (ou a maioria) das métricas objetivas, a análise subjetiva é regulada por padrões internacionais, como a ITU-T. Existem normas específicas para diversas aplicações, como TV a cabo, *broadcast*, aplicações multimídias, etc. Nelas são disponibilizadas recomendações a serem seguidas nas etapas de análise. Há algumas específicas para análise de vídeo, dentre estas, pode-se destacar a BT.500 (UNION, 2012), e a P.910 (UNION, 2008) ambas da ITU, uma do ano de 2000 e a outra de 2008. Para exemplificar esta análise subjetiva, a Tabela 4 faz referência aos possíveis resultados de usuário avaliador de vídeo por exemplo, levando em consideração o parâmetro *MOS*, apresentando a escala de valores de *MOS* com a respectiva qualificação (*ITU-R Recommendation BT.500 / ITU-R Recommendation P.910*).

Tabela 4 – Avaliação subjetiva de um vídeo segundo o *MOS*.

MOS	Avaliação	Dano ao vídeo
1	Ruim ( <i>bad</i> )	Muito Incômodo
2	Pobre ( <i>poor</i> )	Incômodo
3	Razoável ( <i>fair</i> )	Pouco Incômodo
4	Bom ( <i>good</i> )	Perceptível, mas não incômodo
5	Excelente ( <i>excellent</i> )	Imperceptível

### 2.3.2 Análise Objetiva

Os métodos de análise de qualidade chamados objetivos são aqueles em que não é necessária a ação/interação humana para a visualização e avaliação dos vídeos. O motivo de sua utilização é o simples fato de facilitar e tornar mais rápido o processo de avaliação, em termos de tempo e custo, principalmente. Além esta abordagem pode se beneficiar das “repetições”, uma vez que na prática os resultados através de formulações matemáticas ou algoritmos são obtidos de forma mais rápida quando comparados à abordagem subjetiva. Assim, na maioria das vezes, usam-se equações para calcular as métricas nesse tipo de diagnóstico, ao invés de “confiar” no exame feito pelos observadores/avaliadores de vídeo (o que pode trazer algumas imprecisões) (FONSECA., 2009).

As métricas objetivas estimam a qualidade do vídeo recebido pelo usuário através de modelos matemáticos quantitativos, cujos valores computados são mapeados em valores subjetivos de qualidade. As principais métricas são *PSNR* (*Peak Signal to Noise Ratio*), *SSIM* (*Structural Similarity Index*) e *VQM* (*Video Quality Metric*) (BEGAZO, 2012), além de *MSE* (*Mean Squared Error*), *SNR* (*Signal-to-Noise*), e outros.

#### 2.3.2.1 Relação Sinal Ruído de Pico (*PSNR*)

É uma métrica de avaliação de qualidade simples baseada no erro médio entre o vídeo original (geralmente transmitido por um servidor de conteúdo) e o vídeo processado (recebido pelo usuário final). É derivado do *MSE* em relação ao máximo valor possível de luminância (NASCIMENTO, 2012). O *MSE* é apresentado em 2.1 e a *PSNR* é apresentada em 2.2.

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [f(1, j) - F(i, j)]^2}{M.N} \quad (2.1)$$

$$PSNR = 20 \log_{10} \left( \frac{255}{\sqrt{MSE}} \right) \quad (2.2)$$

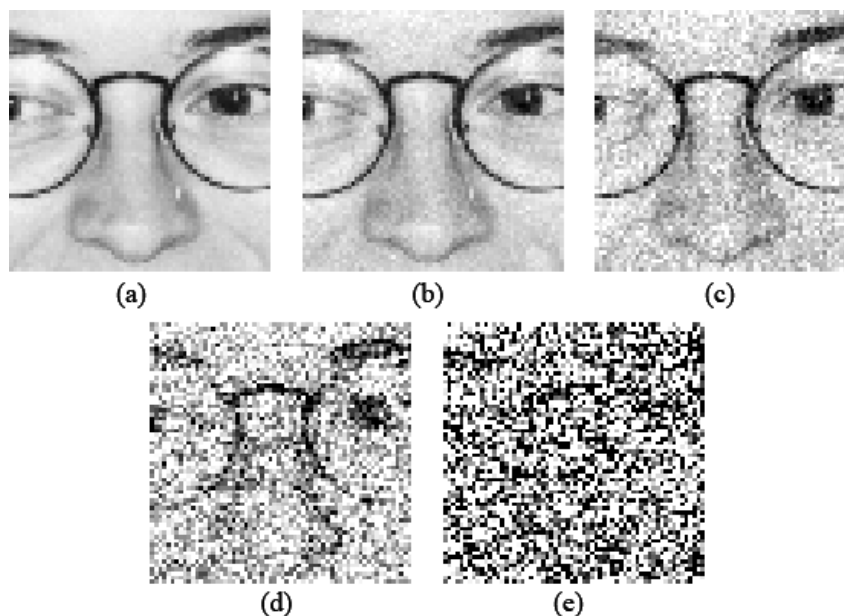
Onde  $f(i, j)$  é o valor original do *pixel*( $i, j$ ),  $F(i, j)$  é o sinal reconstruído, e  $M \times N$  representam o número de linhas de colunas da imagem. O resultado é um único número em decibéis. O *PSNR* considera somente componente de luminância e deixa de lado os componentes de crominância, que é importância para a percepção humana (JAILTON et al., 2013).

A Figura 5 mostra o impacto que um *frame* (ou quadro), pode sofrer devido à perda de *PSNR* em detrimento a algum ruído ao longo do processo de transmissão e recepção do vídeo. Onde em (a) mostra a imagem com *PSNR* igual a 40 dB, em (b) com 30 dB, em (c) com 20 dB, em (d) com 10 dB e por fim, em (e) com *PSNR* igual a 0 dB, respectivamente.



O que a literatura tenta representar é a degradação da imagem por conta da diminuição da *PSNR* original, que pode acontecer por causa de perdas no *codec*, durante a transmissão por conta de instabilidade da rede devido à concorrência, congestionamento, na recepção devido a má qualidade de dispositivo do usuário final, etc.

Figura 5 – Exemplos de perda de *PSNR*.



Fonte: Adaptado de (JAILTON et al., 2013).

Outra observação importante de ser destacada é o mapeamento que pode ser obtido através da *PSNR* para o *MOS*. A Tabela 5 demonstra essa relação entre as duas métricas (MIGLIORINI; MINGOZZI; VALLATI, 2011), onde basicamente quanto maior a *PSNR*, melhor o *MOS*.

Tabela 5 – Relação *MOS* e *PSNR*.

<b>MOS</b>	<b>PSNR (dB)</b>
Excelente (5)	>37
Bom (4)	31 - 37
Razoável (3)	25 - 31
Pobre (2)	20 - 25
Péssimo (1)	<20

Através da Tabela 5, percebe-se que geralmente o usuário sente-se satisfeito quando o vídeo reproduzido possui um mínimo de 31 dB de média, e conseqüentemente, um *MOS* considerado BOM. Estas equivalências são apresentadas pela ITU (MIGLIORINI; MINGOZZI; VALLATI, 2011).

### 2.3.2.2 SSIM (Índice de Similaridade Estrutural)

A métrica *SSIM* avalia o vídeo recebido em relação ao vídeo original, usando parâmetros do sistema visual humano (*SVH*), como similaridade de estrutura, cores e luminosidade (WANG; LU; BOVIK, 2004). Sua fórmula é apresentada por 2.3.

$$SSIM_{(x,y)} = \frac{(2\mu_x\mu_y + c_1)(2\sigma_{xy} + c_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)} \quad (2.3)$$

Onde:

$\mu_x$  e  $\mu_y$  : são as médias de  $x$  e  $y$ , respectivamente;

$x$  e  $y$  : são as dimensões do quadro;

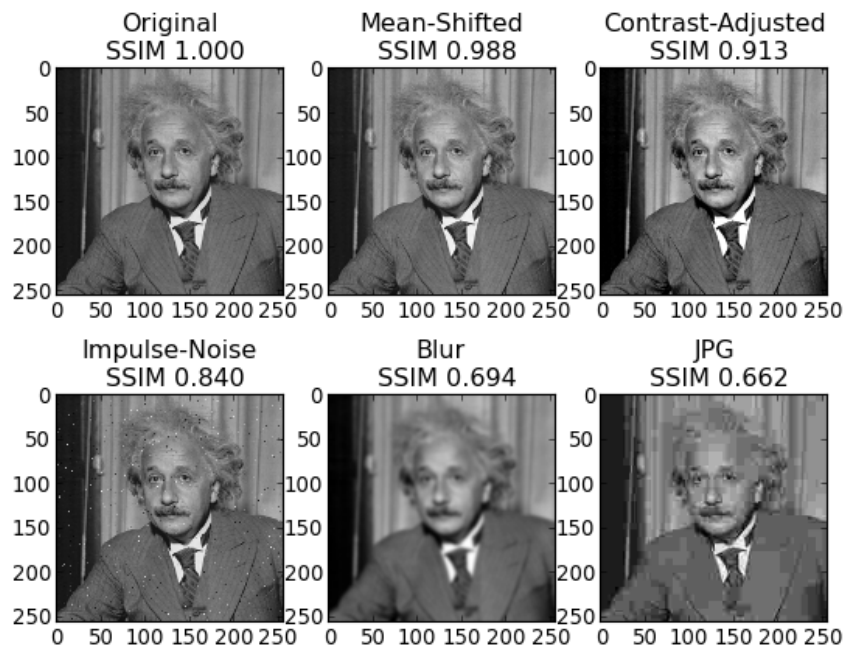
$\sigma_x^2$  e  $\sigma_y^2$  : são as variâncias de  $x$  e  $y$ , respectivamente;

$\sigma_{xy}$  : é a variância de  $x$  e  $y$ ;

$c_1$  e  $c_2$  : são variáveis para estabilizar a divisão por um mínimo.

Onde comparada os *frames* recebidos aos *frames* transmitidos, expressando em um valor decimal entre 0 e 1, onde quanto mais próximo de 1, melhor será a qualidade do vídeo ou mais similar ao vídeo original. Um exemplo dessa relação pode ser observado na Fig. 6.

Figura 6 – Exemplos de perda de *SSIM*.



Fonte: Retirado de (WANG; LU; BOVIK, 2004).

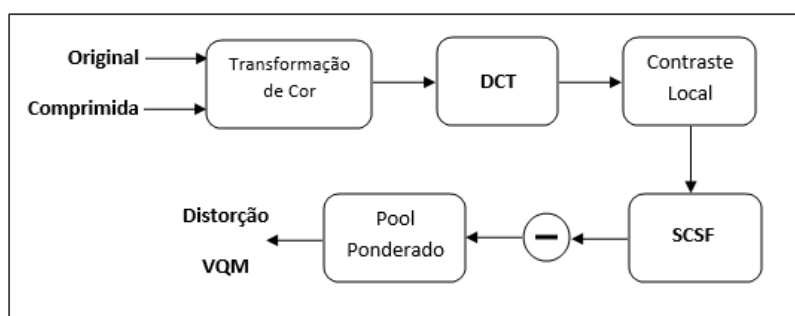
O índice de Similaridade estrutural (*SSIM*) é um método utilizado para medir a semelhança/similaridade entre duas imagens. O índice *SSIM* pode ser visto como uma medida comparativa de qualidade, onde temos uma imagem de referência que será confrontada com outra provavelmente ruidosa (WANG; LU; BOVIK, 2004).

### 2.3.2.3 VQM (Métrica de Qualidade de Vídeo)

Esta métrica foi desenvolvida pelo *ITS* (*The Institute for Telecommunication Science*) para fornecer uma avaliação objetiva da qualidade do vídeo. A avaliação do percentual de defeitos do vídeo inclui borrão, movimento brusco, ruído global, blocos e cores distorcidas, combinados dentro de uma única métrica.

Para ilustrar o funcionamento desta métrica, apresenta-se o fluxograma da visão geral do *VQM* (XIAO, 2000) na Fig.7 .

Figura 7 – Fluxograma de Funcionamento do *VQM*.



Fonte: Autor

Resultados de testes mostram que o *VQM* possui alta correlação com a avaliação de qualidade subjetiva do vídeo e tem sido adotada pelo *ANSI* como um padrão de qualidade de vídeo objetiva (FRNDA; VOZNAK; SEVCIK, 2015). Esta medida é feita através da comparação do vídeo original e o vídeo processado, levando em consideração os seguintes aspectos:

**Calibração:** realiza a estimação e correção do deslocamento espacial e temporal, além de averiguar o contraste e a luminosidade do vídeo;

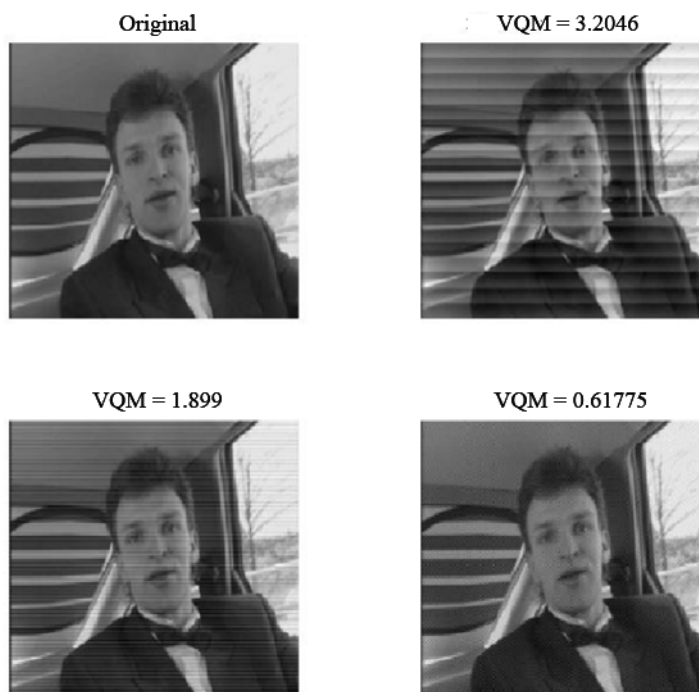
**Extração de Recursos de Qualidade:** é obtido um conjunto de recursos que caracterizam as mudanças de qualidade espacial, temporal e de crominância, usando funções matemáticas;

**Cálculo do *VQM*:** o modelo geral utiliza uma combinação de vários parâmetros, quatro baseados em recursos de extração do gradiente do componente de luminância, dois baseados em recursos de extração do vetor formato, dois componentes de

prominência, e mais um parâmetro baseado em contraste e informações temporais. Pelo fato desta métrica analisar todas essas variáveis e se aproximar das características perceptíveis ao sistema visual humano (*SVH*), ela se torna uma das mais completas, expressando em um número real, escala de 0 a 5, onde quanto mais próximo do zero o valor for, menor será a perda de qualidade em relação ao vídeo original.

Para representar os efeitos causados por degradação do *VQM*, a Fig. 8 mostra uma variação de valores desta medida.

Figura 8 – Valores de *VQM* para uma mesma imagem.



Fonte: (FOUDANTION, 2016).

Uma mudança de paradigma que pode ser observada no mercado, é a importância das exigências do usuário final. Principalmente se tratando de serviços multimídia, pois neste tipo de fluxo (hoje em altas resoluções) este usuário buscar usufruir da qualidade visual de determinado padrão de vídeo. Assim, avaliações subjetivas de perda de qualidade podem fazer com um cliente insatisfeito com o serviço, migre para outro provedor por exemplo, ou faça com que a sua operadora melhore seu serviço.

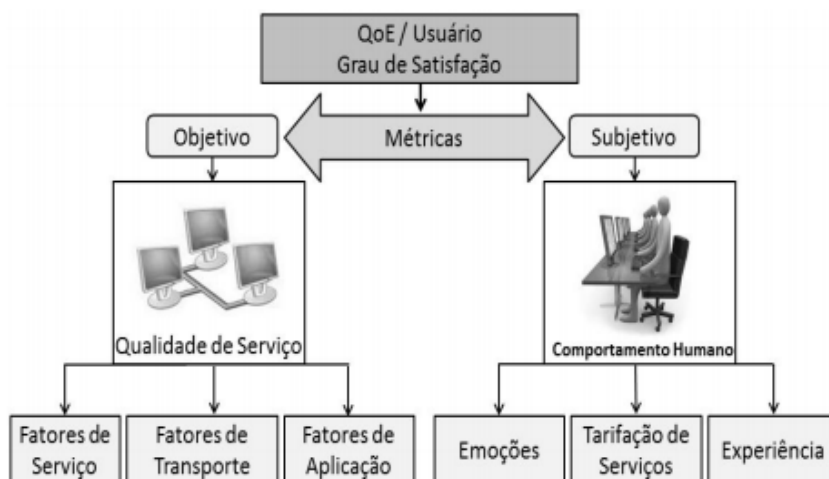
Uma área que vem despertando interesse é a de Avaliação de Desempenho de Redes e Sistemas ou *ADRS*. Assim *ADRS* tem por objetivo quantificar e qualificar serviços, aplicações ou sistemas, no sentido de verificar os requisitos mínimos de acordo com algumas normas nacionais ou internacionais, dependendo da situação em questão. Alguns órgãos e institutos que fazem parte dessa padronização são: *ITU* (*International Telecommuni-*

ation Union), ISO (International Organization for Standardization), ETSI (European Telecommunications Standards Institute). Onde especialmente a alguns anos atrás o foco maior eram as investigações relacionadas a fatores de *QoS*. Porém, com a mudança de paradigma do mercado, hoje busca-se principalmente analisar aspectos relacionados ao *QoE* sem deixar de lado atributos da qualidade de serviço.

Essa mudança aconteceu por conta da importância que deve ser levada em consideração da óptica humana, ou seja, sensações de incômodo ou não, de satisfação ou não, causado ao usuário diante de um serviço a ele prestado, e assim tentar quantificar geralmente em escalas esse “sentimento”, que é subjetivo a cada pessoa.

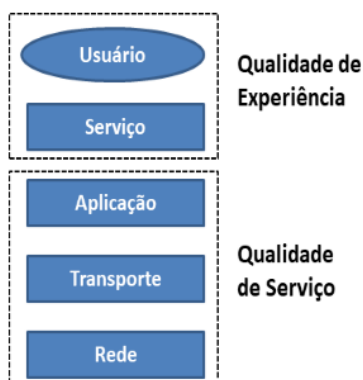
A Fig. 9 ilustra essa relação entre qualidade de serviço e qualidade de experiência, entre avaliação objetiva e avaliação subjetiva.

Figura 9 – Abordagem *QoS* e *QoE*.



Retirado de (OLIVEIRA, 2011).

Figura 10 – Domínio de *QoS* e *QoE*.



Fonte: Autor

De acordo com a Fig. 9, é possível observar que quando é utilizado o *QoS*, analisa-se características puramente técnicas, no padrão do serviço, etc. Não atentando ao aspecto comportamental do usuário, o qual investiga-se através do *QoE*. Assim, comparando-se essas definições, constata-se que as relações com o modelo *TCP/IP* são representadas pela Fig. 10.

## 2.4 Métodos dos Mínimos Quadrados Lineares - *MMQ*

O objetivo deste tópico é apresentar o método dos mínimos quadrados (*MMQ*) como forma de aproximação de funções. Ao contrário de outros mecanismos como o polinômio interpolador, esta técnica não requer que o ajuste passe exatamente por cima dos pontos ajustados (HELENE, 2006). Em outras palavras, com esse método encontramos uma função  $y(x)$  de certo tipo pré-estabelecido (ex. reta, parábola, senoide), a qual é encontrada de forma que melhor ajusta um conjunto de pontos ou uma função dada. Surge então a necessidade de se ajustar a estas funções tabeladas uma função que seja uma “boa aproximação” para as mesmas e que permita “extrapolar” com certa margem de segurança. Assim, o objetivo deste processo é aproximar uma função  $f(x)$  por outra função  $y(x)$ , escolhida de uma família de funções ou por uma soma de funções.

### 2.4.1 Regressão Linear

A análise de regressão é baseada na realização de uma investigação estatística, com o objetivo de encontrar a existência de uma relação funcional entre uma variável dependente com uma ou mais variáveis independentes. Deste modo, pode-se dizer que esta técnica visa obter de uma equação que tenta explicar a variação da variável dependente pela variação do(s) nível(is) da(s) variável(is) independente(s) (PETERNELLI, 2016).

Para tentar estabelecer uma equação que representa o fenômeno em estudo pode-se fazer um gráfico, chamado de diagrama de dispersão, para verificar como se comportam os valores da variável dependente ( $Y$ ) em função da variação da variável independente ( $X$ ). O comportamento de  $Y$  em relação a  $X$  pode se apresentar de diversas maneiras: linear, quadrático, cúbico, exponencial, logarítmico, etc.

Para se estabelecer o modelo para explicar o fenômeno, deve-se verificar qual tipo de curva e equação de um modelo matemático que mais se aproxime dos pontos representados no diagrama de dispersão (PETERNELLI, 2016).

Contudo, pode-se verificar que os pontos do diagrama de dispersão não se ajustam perfeitamente à curva do modelo matemático proposto. Haverá na maior parte dos pontos, uma distância entre os pontos do diagrama e a curva do modelo matemático. Isto acontece, devido ao fato do fenômeno que está em estudo ser um fenômeno estatístico matemático, ou seja, sujeito à influências que acontecem ao acaso. Assim, o objetivo da regressão é

obter um modelo matemático que melhor se ajuste aos valores observados de  $Y$  em função da variação dos níveis da variável  $X$ .

Este mecanismo matemático é definido como sendo Método estatístico que utiliza entre duas ou mais variáveis de modo que uma variável pode ser estimada (ou predita) a partir da outra ou das outras (NETER et al., 1996).

As relações mais simples envolvendo duas variáveis são as relações lineares (RUGGIERO, 2000). Muitos fenômenos da natureza e outros oriundos de atividades humanas podem ser modelados conforme uma relação linear entre variáveis. Por exemplo: a função  $P$  que relaciona o peso de um corpo e a sua massa  $m$ , dada por  $P(m) = gm$ , onde  $g$  representa o valor, constante nas proximidades da superfície da Terra, da aceleração gravitacional. Outro exemplo, é a função  $V$  que retorna o valor de uma prestação, no regime de juros simples, em função de  $d$  dias de atraso, a uma taxa fixa  $i$ , dada por  $V(d) = V_0 + diV_0$ , onde  $V_0$  é o valor da prestação original.

Uma relação de linearidade simples pode ser completamente definida por 2.4.

$$f(x) = \alpha_0 + \alpha_1 x \quad (2.4)$$

Observamos a existência de uma única variável independente  $x$ . Neste caso, num procedimento de ajuste, o esforço consiste na determinação de valores adequados para os parâmetros  $\alpha_0$  e  $\alpha_1$ . Assim sendo, suponhamos novamente um conjunto de  $n$  pontos como referência para a obtenção de uma função de ajuste linear, expressa na forma de 2.4.

### 2.4.2 Desvio Padrão

Para se ter uma medida de variabilidade com a mesma unidade do conjunto utiliza-se a raiz quadrada da variância, que é denominada de desvio padrão. Assim a expressão para o desvio é mostrada em 2.5.

$$Desvio = \sqrt{\sum \frac{(X_i^2 - X)^2}{N}} \quad (2.5)$$

Onde:

$X_i$  é o valor individual da posição  $i$  no conjunto de dado;

$X$  é a média aritmética dos dados;

$N$  é a quantidade de valores, amostras ou dados;

$\Sigma$  indica a soma de todos os termos, desde a primeira posição até a última posição.

Esta medida estatística é um parâmetro muito usado, e que indica o grau de variação de um conjunto de elementos, mostrando quanto os valores dos quais se extraiu a média são próximos ou distantes da própria média (NETER et al., 1996).

O Desvio Padrão permite visualizar o nível de dispersão entre os resultados obtidos dentro de um determinado conjunto de dados. Essa informação pode ser utilizada para verificar se determinado resultado pode ser considerado normal, ou se ele se encontra fora da estimativa realizada.

### 2.4.3 Raiz do Erro Médio Quadrático (*RMSE*)

O *RMSE* (*Root Mean Square Error*) é comumente utilizado para expressar a precisão dos resultados numéricos, com a vantagem de apresentar valores do erro nas mesmas dimensões da variável analisada [24]. O *RMSE* é definido por 2.6 .

$$RMSE = \sqrt{\sum \frac{(Y_{pred} - Y_{ref})^2}{N}} \quad (2.6)$$

Onde:

$Y_{pred}$  são valores preditos/estimados;

$Y_{ref}$  são valores de referência;

$N$  é a quantidade de valores, amostras ou dados;

Ao contrário de outros indicadores, possui uma unidade (dimensão), igual à dimensão dos valores observados (ou de referência) e preditos. Interpreta-se seu valor como uma medida do desvio médio entre estes, porém observe que as diferenças entre  $Y_{pred}$  e  $Y_{ref}$  são elevadas ao quadrado.

Neste trabalho tanto o desvio padrão quanto o *RMSE* serão utilizados para avaliar a modelagem proposta para os dados simulados, e assim, identificar a melhor representação matemática para os dados medidos.

## 2.5 Considerações finais

Neste capítulo, foram descritos os fundamentos básicos de avaliação de desempenho e métodos matemáticos que serão utilizados na modelagem da perda de qualidade, foco deste estudo, e que auxiliarão na leitura do mesmo. No próximo capítulo uma breve explanação sobre técnicas de suporte à tomada de decisão será demonstrada.



## 3 TRABALHOS CORRELATOS

### 3.1 Considerações iniciais

Após a apresentação dos capítulos de Fundamentação Teórica e Ferramentas, faz-se necessário realizar o levantamento do estado da arte, ou seja, trabalhos e pesquisas que abordam as formas de analisar a qualidade de vídeo ou *streaming*.

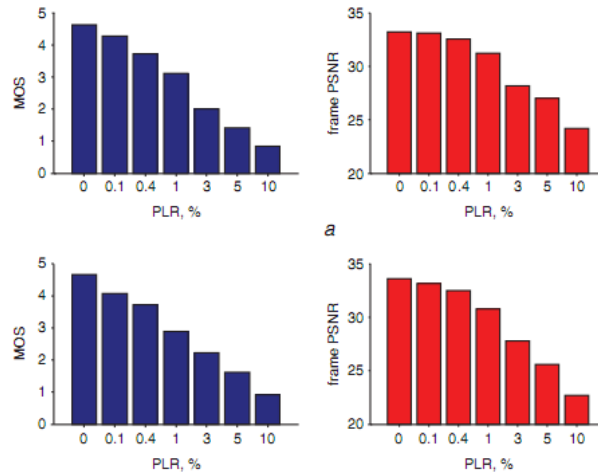
Os modelos de predição qualidade começam a ganhar destaque nos últimos anos, geralmente o objetivo central destes é proporcionar ao usuário final a qualidade perceptiva esperada, e aos provedores, fornecem a possibilidade de melhorias na distribuição do serviço.

### 3.2 Trabalhos Relacionados a Análises de Qualidade de Vídeo

**Performance of peak signal-to-noise ratio quality assessment in video streaming with packet losses (B.P. BONDZULIC et. al – 2016)**

O trabalho desenvolvido por (BONDZULIC et al., 2016), realizou a análise de desempenho da *PSNR* em relação com a perda de pacotes de um vídeo, demonstrando que essa métrica objetiva é um fator confiável quando associado a perda de pacotes. Além disso, o autor faz uma relação do *MOS* com a perda de pacotes, através de uma avaliação subjetiva de usuário baseada na percepção do vídeo recebido. A Fig.11 mostra os gráficos dessa associação.

Outras análises também foram realizadas pelo autor: uma análise da perda de pacotes x *PSNR*, e outra de perda de pacotes x *MOS*, isto para vídeo nos formatos *CIF* e *4CIF*.

Figura 11 – Relação entre *MOS* versus Perda de Pacotes.

Fonte: (BONDZULIC et al., 2016)

### Perceptual vídeo quality assessment in H.264 video coding standard using objective modeling (Ramasamy Karthikeyan1 et. al – 2014)

Outro trabalho, implementado por (KARTHIKEYAN; SAINARAYANAN; DE-EPA, 2014) realiza avaliação de desempenho de vídeos no padrão H.264 através de modelagem objetiva. O equacionamento utiliza parâmetros espaciais e temporais introduzidos no processo de codificação, assim este calcula ao final uma métrica de qualidade objetiva baseada em características de degradação visual como *blockiness*, *blur* e *jerkiness*.

Como referência para o trabalho considerou-se a definição dada pelo ITU-T G.1070 que formula 3.1 para uma taxa ótima de *frames I*.

$$I_{coding} = \left( V_3 - \frac{V_3}{1 + \left( \frac{Br_V}{V_4} \right) V_5} \right) \quad (3.1)$$

Onde:

$I_{coding}$ : é a codificação de avaliação de artefatos de qualidade cujo valor varia de 0 a 4;

$Br_V$ : é a taxa de bits;

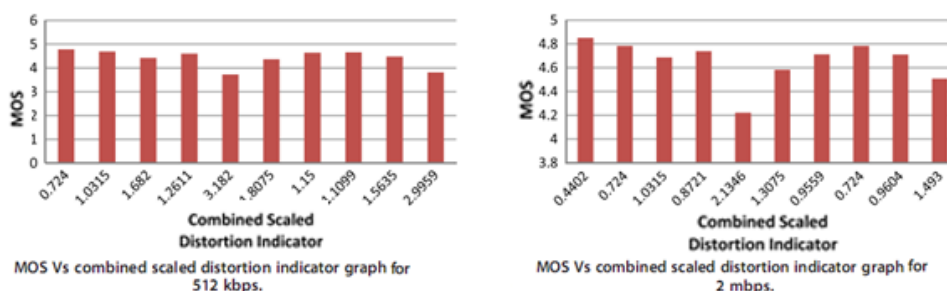
$V_3, V_4, V_5$ : são componentes de *blockiness*, *blur* e *jerkiness*.

Dessa forma o *MOS* interrompe as deficiências de qualidade baseadas em codificação e fornece a métrica de qualidade no *headend* na forma de 3.2.

$$MOS = 1 + I_{coding} \quad (3.2)$$

Com isso a métrica *MOS* será composta por uma combinação entre três constantes:  $V3, V4eV5$ ; fazendo com que qualquer alteração nos valores de *blockiness*, *blur* e *jerkiness*, o qual são chamados de “indicadores de distorção”, afete o resultado do *MOS*. Os resultados obtidos para *bitrates* de 512 Kbps e 2 Mbps são apresentados na Fig. 12.

Figura 12 – Resultado do Modelo proposto por Ramasamy (KARTHIKEYAN; SAINARAYANAN; DEEPA, 2014).



Fonte: (KARTHIKEYAN; SAINARAYANAN; DEEPA, 2014)

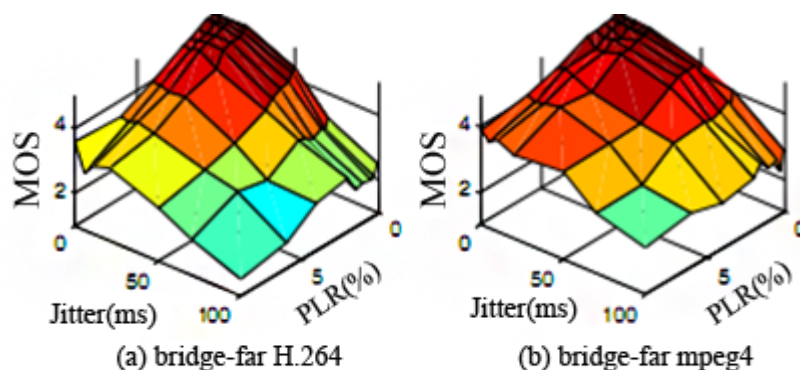
Para avaliar o desempenho do modelo foi calculado o *RMSE* que obteve valor médio de 0.571, mostrando a possibilidade de usar parâmetros subjetivos para uma modelagem de qualidade de vídeos.

**A content-adaptive video quality assessment method for online media service (Dalu Zhang et. al – 2017).**

O trabalho desenvolvido em (ZHANG; ZHOU; JIN, 2016), é utilizado como referência para provedores de serviços, ou empresas que fornecem serviços em tempo real, podendo trazer melhoria em seus serviços baseadas no estudo apresentado. Os autores realizam uma avaliação adaptativa de conteúdo em tempo real para analisar a qualidade da experiência para serviços de mídia *on-line*. O método descrito é chamado *GraudeMovimentodeConteúdodeVídeo(MDVC)*. Este analisa a relação entre o ganho de entropia de informações e o tamanho do quadro dos quadros I, P e B e, em seguida, avalia o grau de movimentação dos vídeos. Os resultados de *QoE* são utilizados para aplicar um mapeamento para parâmetros de *QoS*, conforme resultado percebido na Fig. 13.

Com essa abordagem proposta, o modelo de avaliação de *QoE* adaptável ao conteúdo, e baseado na classificação dos vídeos pela movimentação dos quadros, consegue alcançar um coeficiente de correlação de 0,94, considerando *MOS* e *Frames*, quando comparado com outros modelos da literatura, conforme mostra Tabela 6 .

Figura 13 – Mapeamento QoE para QoS (ZHANG; ZHOU; JIN, 2016).



MOS results for ‘bridge-far’ is relatively high

Fonte: (ZHANG; ZHOU; JIN, 2016)

Tabela 6 – Comparação de Desempenho MDVC versus Outros modelos.

Modelo	Correlação
MDVC	0.940
CAPL	0.933
G.1070	0.891
DT	0.868
Péssimo (1)	<20

Fonte: (ZHANG; ZHOU; JIN, 2016)

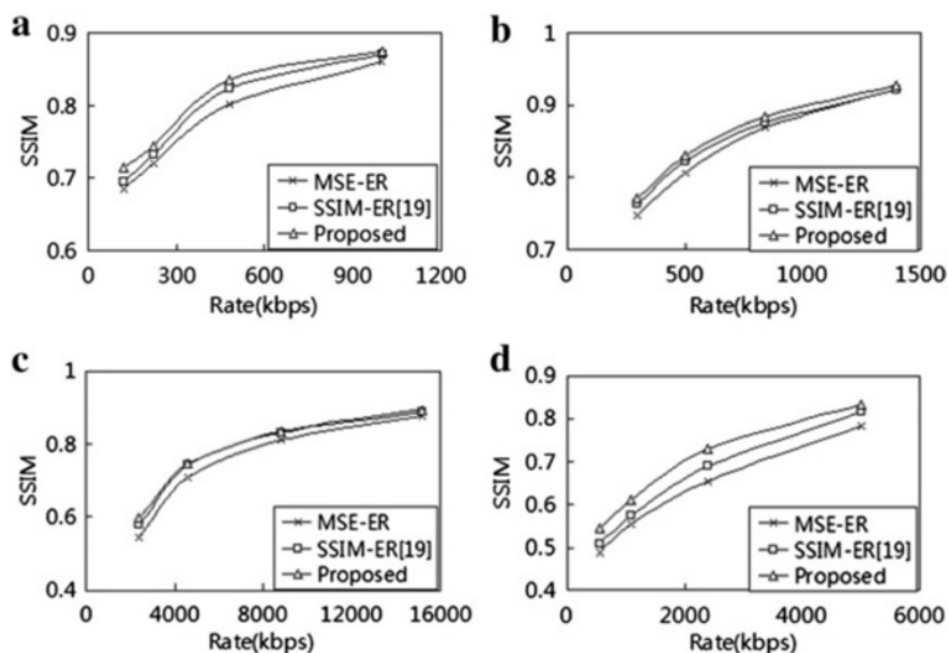
### Modeling of SSIM based end-to-end distortion for error-resilient vídeo coding (Qiang Peng et. al – 2014).

Para (PENG et al., 2014), há uma carência de modelos de investigação um fator comum entre as diversas distorções geradas em um vídeo, seja na codificação, na transmissão (canal), ou no conteúdo do vídeo. Assim, os autores desenvolveram um modelo de distorção chamado de “ponta-a-ponta”, baseado no *SSIM*.

As simulações realizadas foram para taxas de perdas de pacotes de 5, 10 e 20%. Os resultados são comparados com a proposta de outro trabalho, e são apresentadas na Fig. 14.

Observa-se que com a elevação da taxa de *bits*, há um incremento nos valores de *SSIM*, considerando que há perdas de pacotes, constata-se que a partir de 900kbps o *SSIM* obtém seus melhores resultados, mostrando que o vídeo possui uma boa qualidade diante desse cenário.

As simulações foram realizadas para vídeo com o *codec H.264/AVC*, obtendo melhores resultados para redes comutadas por pacotes, sendo este um modelo útil para estimação da distorção percebida por um usuário.

Figura 14 – Comparação de Desempenho de Taxas de *SSIM* (PENG et al., 2014).

Fonte: (PENG et al., 2014)

### Impact of packet loss and delay variation on the quality of real-time vídeo streaming (Jaroslav Frnda et. al 2016).

Já o trabalho de (FRNDA; VOZNAK; SEVCIK, 2015), apresenta a análise de desempenho do serviço de *streaming* de vídeo. Sabendo que uma rede IP não foi projetada para suportar adequadamente um fluxo de áudio e/ou vídeo, fatores como perda de pacotes e variação do atraso (*jitter*), influenciam diretamente na qualidade do serviço.

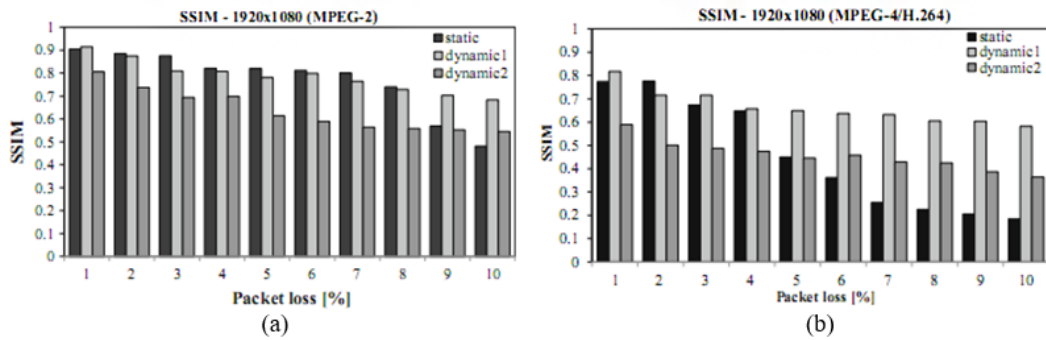
Deste modo é gerado um modelo simulado para métodos objetivos de avaliação, baseados em *SSIM*, *VQM*, *PSNR* e *MSE*, modelo este de estimativa de qualidade para serviços *triple play*. Seguindo esta ideia, os resultados para diferentes *codecs*, e diferentes resoluções de vídeo são mostrados nas Fig. 15 e 16 .

Analisando os gráficos conclui-se que para vídeos considerados “*static*” e “*dynamic 1*”, alcançam os melhores resultados de *SSIM* para *codecs* *MPEG – 2*, diminuindo a qualidade para o padrão *MPEG – 4* com a mesma resolução (*Full HD*).

A Fig. 16 , mostra os resultados do *SSIM* para valores diferentes de *jitter*.

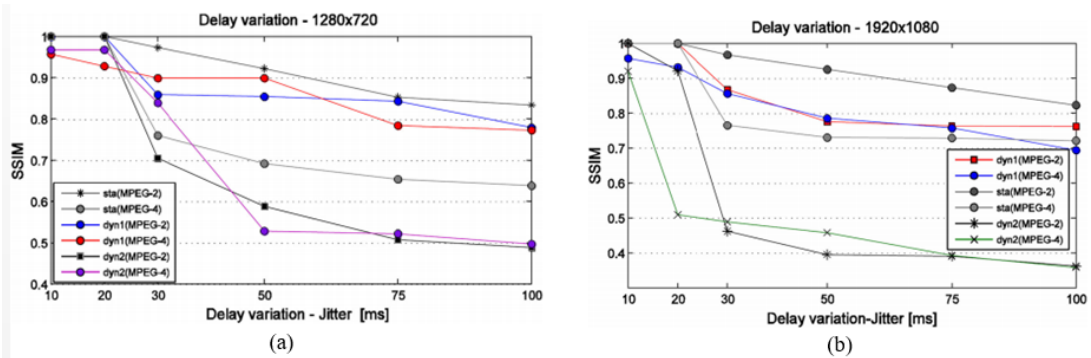
Outra constatação do trabalho é que, a partir de um *jitter* de 30ms os valores de *SSIM* passam a ser ruins, representando uma má qualidade de imagem, com cerca de 50% de perda de *SSIM*.

Figura 15 – Resultados de *SSIM* para *MPEG-2*(a) e *MPEG-4*(b) (FRNDA; VOZNAK; SEVCIK, 2015).



Fonte: (FRNDA; VOZNAK; SEVCIK, 2015)

Figura 16 – Resultados da Variação do atraso para vídeos em *HD*(a) e *Full HD*(b).



Fonte: (FRNDA; VOZNAK; SEVCIK, 2015)

**Direct Scaling & Quality Prediction for perceptual Video Quality Dimensions (Falk Schiffner e Sebastian Moller – 2018)**

Os autores de (SCHIFFNER; MOLLER, 2018) apresentam um método para classificar “dimensões” de qualidade perceptiva, além de um modelo de previsão de qualidade baseado nas dimensões analisadas do vídeo, conforme Tabela 7. Dessa maneira os resultados do modelo são comparados com as classificações obtidas a partir de testes subjetivos, como mostra a Tabela 8 .

Tabela 7 – Descrição das Dimensões do vídeo avaliadas (SCHIFFNER; MOLLER, 2018)

VQD	NAME	EXAMPLE IMPAIRMENT
I	Fragmentation (FRA)	Packet Loss
II	Unclearness (UCL)	Blurring
III	Discontinuity (DIC)	Jerkinnes
IV	Noisiness (NOI)	Salt & Pepper Noise
V	Suboptimal luminosity (LUM)	Luminance Value reduce/raised

Tabela 8 – Comparação do modelo proposto *VQDIM* com outros modelos da literatura.

CONDITION	MOS VQDIM	MOS SD-PCA	DSCAL MODEL	SD MODEL
Reference	4.32	4.07	4.18	4.11
H.264 Bitrate 28kbps	1.34	1.45	1.08	1.49
H.264 Bitrate 56kbps	1.99	2.01	1.85	1.90
RISV Artificial Blockiness 8x8	1.37	1.52	1.49	1.54
RISV Artificial Blockiness 5x5	1.77	2.09	1.93	2.11
RISV Artificial Blurring Filter7	1.74	1.93	1.85	1.96
RISV Artificial Blurring ITU (F1)	2.57	2.67	2.56	2.64
Luminance Impair. I (darker)	2.72	3.05	2.57	3.03
Luminance Impair. II (lighter)	2.83	3.08	3.02	3.07
RISV Artificial Jerkiness 11	2.09	2.56	2.15	2.62
RISV Artificial Jerkiness 6	2.44	2.94	2.41	2.90
RISV Artificial NoiseQ 15%	1.78	1.95	1.71	2.02
RISV Artificial NoiseQ 3%	2.33	2.42	2.42	2.34
Packet Loss 1.5%	2.08	1.74	2.22	1.75
Packet Loss 0.5%	2.99	2.82	2.92	2.77

Os desenvolvedores do trabalho criaram um modelo de *MOS* que composições de luminância, ruído, fragmentação, descontinuidade, e falta de clareza, conforme observado em 3.3.

$$MOS_{pre-lin} = -5.94 + (0.21 * FRA) + (0.73 * UCL) + (0.53 * DIC) + (0.47 * NOI) + (0.31 * LUM) \quad (3.3)$$

Para a obtenção de 3.3, considerando uma metodologia subjetiva, utilizaram para os testes um grupo de vinte e oito pessoas: treze homens e quinze mulheres com média de idade de 28,9 anos; um vídeo de dez segundos com resolução de  $640 \times 480$  pixels, e 25 frames por segundos, onde o avaliador atuou a uma distancia aproximada de 60 cm do monitor. A duração dos testes foi de 50 a 60 minutos, com intervalos regulares de 5 minutos. Como resultado obteve-se a 3.3.

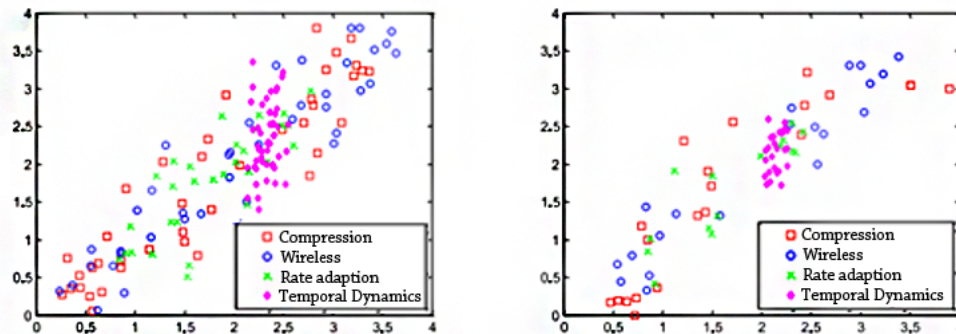
### Temporal Video Quality Model Accounting for Variable Frame Delay Distortions (Margaret H. Pinson et. al – 2014)

O estudo em (PINSON; CHOI; BOVIK, 2014), apresenta outro modelo de qualidade de vídeo considerando o impacto na qualidade perceptiva ocasionada pelos atrasos de frames do vídeo, denominado *VQM<sub>V</sub>FD*. Utiliza recursos extraídos de mapeamentos espaço-temporais do vídeo. A eficácia do modelo também é verificada, comparando com outros modelos.

Para os testes, os avaliadores observaram os vídeos seguindo a metodologia contínua de estímulo único (SSCQE) com referências ocultas. Os participantes assistiram a

um total de 200 vídeos em um *smartphone* de 4 polegadas, e outros 100 vídeos em outro telefone de 10,1 polegadas, todos em *MPEG-4*. A Fig.17 mostra o resultado obtido através da metodologia proposta.

Figura 17 – Diagramas de dispersão da predição  $VQM - VFD$ . Estudo de mobilidade(a) e Estudo de *Tablet PC*(b) .



Fonte: (PINSON; CHOI; BOVIK, 2014)

As conclusões que os autores chegaram foram o desempenho do  $VQM_{VFD}$  foi avaliado no recém-lançado banco de dados *LIVE Mobile VQA*, que engloba uma ampla variedade de distorções, incluindo distorções de variação dinâmica, bem como compactação uniforme e perda de pacotes sem fio. Isso confirma que os atrasos de *frames* têm um impacto importante nos julgamentos subjetivos humanos da qualidade visual, e que o  $VQM_{VFD}$  contribui significativamente para o progresso dos algoritmos de *VQA*. Baseado em código não otimizado, o  $VQM_{VFD}$  leva cinco vezes mais tempo para computar como *PSNR*.

**A Decision-Tree-Based Perceptual Video Quality Prediction Model and Its Application in FEC for Wireless Multimedia Communications (Abdul Haameed et. al – 2016).**

Ainda dentro dessa área em questão de Modelagem de qualidade perceptiva de vídeos, os autores (HAMEED; DAI; BALAS, 2016), é proposto uma estrutura de suporte a *QoE* com eficiência energética para comunicações de vídeo sem fio. Consistindo em dois componentes: 1) um modelo de qualidade de vídeo perceptivo que permite a previsão da qualidade do vídeo em tempo real e com baixa complexidade; e 2) um esquema de correção de erros antecipada (*FEC*) de eficiência energética e prevenção da degradação da qualidade causada por perdas de pacotes de rede. O modelo de qualidade de vídeo perceptivo caracteriza fatores relacionados ao conteúdo de vídeo, bem como a distorção causada pela compressão e transmissão. A previsão da qualidade perceptiva é obtida por meio de uma árvore de decisão usando um conjunto de recursos observáveis do fluxo de



bits compactado e da rede. As configurações dos testes são apresentadas na Tabela 9.

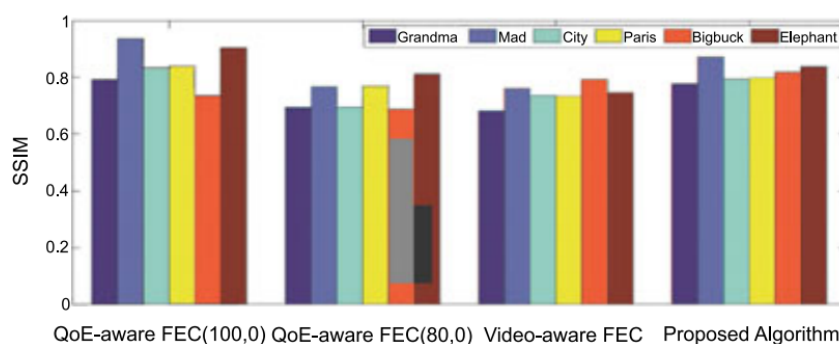
Tabela 9 – Condições testadas no estudo em (HAMEED; DAI; BALAS, 2016)

<b>Encoder</b>	JM18.5 High Profile
<b>Resolution</b>	CIF (352 x 288)
<b>Duration</b>	20 s
<b>GOP size</b>	16
<b>GOP format</b>	IPPP, IBBP
<b>Rate control</b>	Enable
<b>Frame rate</b>	15,30
<b>Bit rate (Mb/s)</b>	1.5,4
<b>PLR(%)</b>	1, 5, 10

O modelo proposto pode alcançar precisão de previsão de 88,9% e 90,5% em dois conjuntos de testes distintos. Com base no modelo de qualidade proposto, é introduzido um esquema *FEC* para proteger os pacotes de vídeo das perdas durante a transmissão.

Dado um requisito de qualidade perceptual definido pelo usuário, o esquema *FEC* ajusta o nível de proteção para diferentes componentes em um fluxo de vídeo para minimizar a sobrecarga da rede. Os resultados da simulação mostram que o esquema *FEC* proposto pode melhorar a qualidade perceptual dos vídeos. Em comparação com os métodos convencionais *FEC* para comunicações de vídeo, o esquema *FEC* proposto pode reduzir a sobrecarga de rede em 41% em média. Alguns resultados são apresentados nas Fig. 18 e 19 .

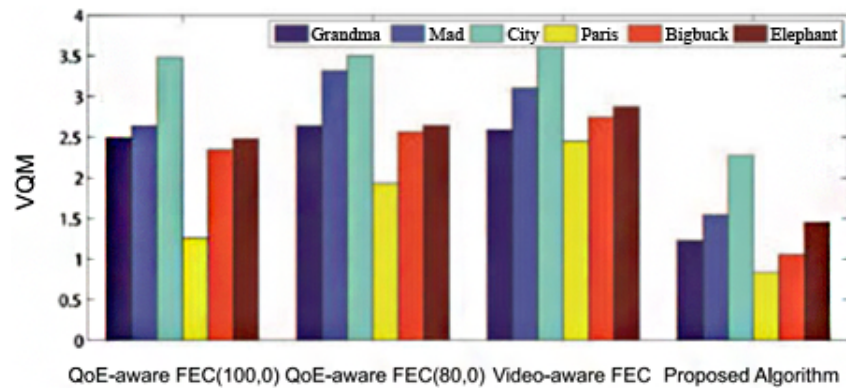
Figura 18 – Comparação do SSIM médio para diferentes sequências de vídeo.



Fonte: (HAMEED; DAI; BALAS, 2016)

Concluindo portanto, que o modelo de predição de qualidade pode revelar as relações não lineares entre qualidade perceptiva e recursos relacionados ao conteúdo de vídeo, parâmetros de codificação de origem, e condições de rede. Resultados experimentais mostraram que ele consegue um bom desempenho de previsão em vídeos com características diferentes.

Figura 19 – Comparação do VQM médio para diferentes sequências de vídeo.



Fonte: (HAMEED; DAI; BALAS, 2016)

### D-DASH: A Deep Q-Learning Framework for DASH Video Streaming (Matteo Gadaleta et. al – 2017)

Do estudo realizado em (GADALETA et al., 2017), desenvolveu-se o modelo *D – DASH*, baseado no modelo *DASH* bastante referenciado na área de esquema adaptativo para fluxos multimídia. Os autores produziram um estudo que aplica uma rede neural para otimização da qualidade de experiência da rede. Como resultado da proposta, foram comparados os valores do *SSIM* com outros algoritmos e modelos de aprendizagem, como pode ser observado na Fig.20

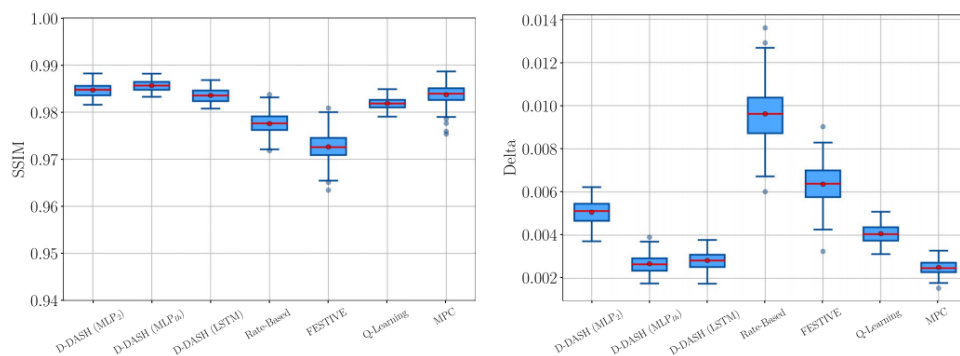
Figura 20 – *SSIM* médio para os 100 episódios de vídeo na fase de teste (*traces* reais).

Fig. 12. Boxplot of the average SSIM for the 100 video episodes in the *test* phase (synthetic traces).

Fig. 13. Boxplot of the average SSIM variation for the 100 video episodes in the *test* phase (synthetic traces).

Fonte: (GADALETA et al., 2017)

De posse desses resultados e após o uso de vários algoritmos de adaptação do *DASH* baseados no Aprendizado por Reforço realizado pelos autores, que exploraram redes Q profundas para acelerar a convergência e a adaptabilidade do sistema e melhorar a eficiência. Os quadros *D – DASH* usam diferentes estruturas de aprendizagem profunda para aproximar os valores Q, tomando o estado bruto do sistema como entrada e não requerendo escolhas arbitrárias de projeto que possam influenciar seu desempenho.

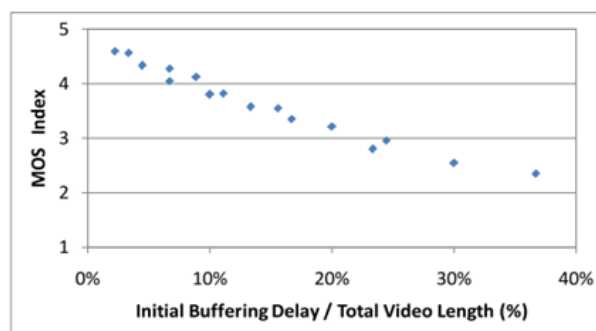
Os algoritmos de aprendizagem profunda também têm pouca memória e requisitos computacionais após uma fase inicial de treinamento e, embora este treinamento possa ser computacionalmente pesado para um dispositivo móvel, ele pode ser executado uma só vez por todos servidores dedicados e, em seguida, passar para o dispositivo móvel com o mínimo de sobrecarga de sinalização.

Desse modo o trabalho representa uma melhoria significativa quando comparado com outros projetos de adaptação de aprendizado *DASH*, além do que o *D-DASH* apresentou melhor desempenho do que várias das abordagens de adaptação mais populares da literatura, mantendo uma alta qualidade de vídeo sem custo computacional significativo.

### Video Quality Metric for Streaming Service Using DASH Standard (Demóstenes Zegarra Rodríguez – 2016)

Já (RODRIGUEZ et al., 2016), trabalha o esquema adaptativo de *streaming* para o protocolo *HTTP (DASH)*, que é usado para mudar a resolução de vídeo de acordo com a capacidade de rede dos usuários finais. Como esta solução pode diminuir a *QoE*, os autores propõem otimizações em três fatores: atraso inicial de *buffer*, interrupções temporais ou pausas, e mudanças de resolução de vídeo durante a transmissão. A Fig.21, demonstra a influência do atraso de *buffer* no *MOS*.

Figura 21 – Relação entre o índice *MOS* e a relação entre o atraso inicial do *buffer* e o comprimento total do vídeo.



Fonte: (RODRIGUEZ et al., 2016)

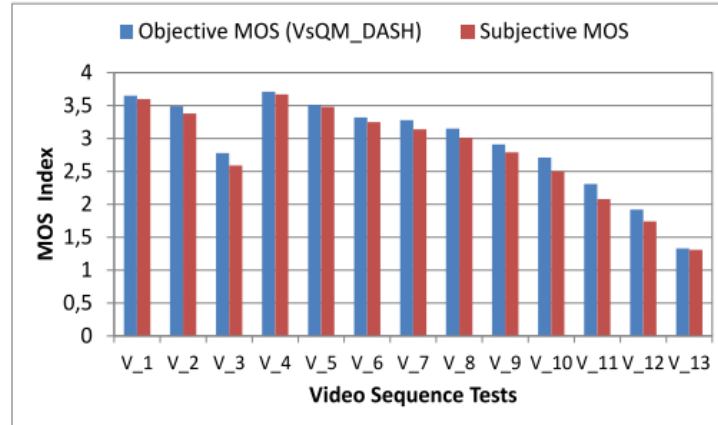
O modelo  $V_SQM_{DASH}$  apresentou coeficiente de correlação de 0,99. Além disso, os resultados experimentais demonstraram que a metodologia proposta tem baixa complexidade já que se baseia nos parâmetros de aplicação, e na energia consumo, que é irrelevante em relação à energia consumida por vídeo, portanto, pode ser facilmente implementado em dispositivos móveis, por exemplo, como pode ser visto na Tabela 10.

Além disso, é apresentada uma comparação entre o *MOS* subjetivo e *MOS* do  $V_SQM_{DASH}$ , afim de validar a proposta, conforme visualizado na Fig. 22.

Constata-se que a proposta apresenta resultados superiores quando comparada com o *MOS* tradicional, para as sequências de vídeos testadas. Comprovando assim que

Tabela 10 – Valor percebido de Recursos Consumidos no Dispositivo Móvel.

Parameter	Average Value (1-5)
Processing consumption and latency	4.7
Energy consumption	4.5

Figura 22 – Comparação de desempenho do objetivo  $MOS$  determinado por  $V_SQM_{DASH}$  em relação ao  $MOS$  subjetivo.

Fonte:(RODRIGUEZ et al., 2016)

a nova composição desta métrica através dos parâmetros citados pode ser utilizada para esta abordagem de avaliação de desempenho subjetiva.

### Content-Based Video Quality Prediction using Random Neural Networks for Video Streaming over LTE Networks (T. Ghalut et. al. – 2015).

Para (GHALUT; LARIJANI; SHAHRABI, 2015) é evidente que a qualidade de experiência pode variar consideravelmente de acordo com o conteúdo do *streaming* de vídeo, portanto propõe um modelo para estimar a qualidade desses *streaming* baseado na classificação de movimentação e *Hypertext Transfer Protocol*, em redes *LTE*.

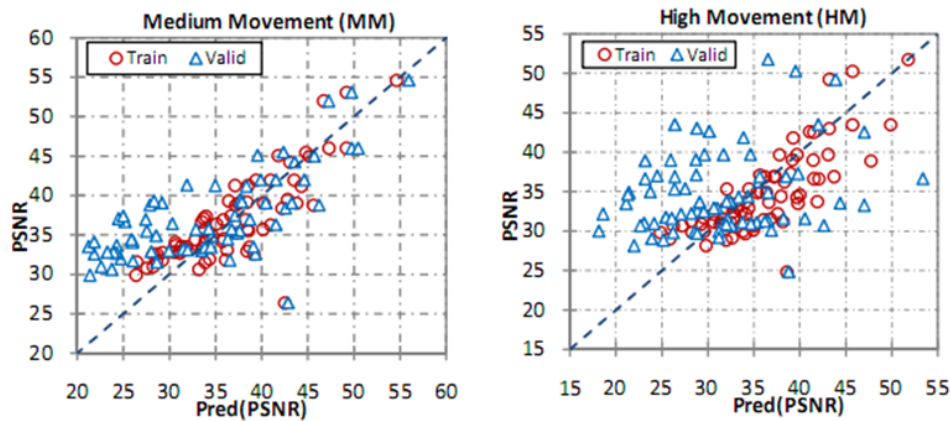
No estudo utiliza-se a técnica de redes neurais para efetuar a classificação desses conteúdos. Além disso, compara-se com outras técnicas de inteligência computacional, conforme a Tabela 11.

Tabela 11 – Resultados de validação de modelos *RNN* (GHALUT; LARIJANI; SHAHRABI, 2015)

Content Type	Correlation coefficient		RMSE	
	Our RNN	ANFI [18]	Our RNN	ANFIS [18]
LM	0.8056	0.7007	0.0866	0.1545
MM	0.9236	0.8056	0.0933	0.1846
HM	0.8209	0.754	0.0781	0.5659
RM	0.9559	0.754	0.0818	0.5659

Os resultados da predição de qualidade realizada pela rede neural são mostrados na Fig. 23 abaixo, divididas por grau de movimentação.

Figura 23 – Mapeamento *RNN* da *PSNR* predito.



Fonte: (GHALUT; LARIJANI; SHAHRABI, 2015)

Os resultados apresentam uma precisão para o modelo de previsão proposto de 93% de acertos, utilizando uma rede neural do tipo *RNN*, concluindo que este novo modelo de classificação de conteúdos possui melhores resultados que os modelos produzidos anteriormente.

Com o objetivo de resumir os trabalhos relacionados apresentados nesta tese de doutorado, e comparar com o estudo desenvolvido, apresentamos a Tabela 12.

Em nenhum dos trabalhos relacionados foi encontrado a geração de um modelo ou modelagem da perda de qualidade de vídeo/*streaming* utilizando a relação perda de *PSNR* e Perda de *Frames*, e nem trabalho que tenha realizado um estudo de correlação de métricas por qualquer método matemático ou técnica de Inteligência computacional para a escolha das métricas que mais influenciam na perda de qualidade de um vídeo. Por tanto, este trabalho implementa uma modelagem de perda de qualidade de vídeo, que utiliza em uma das etapas, a busca pela melhor métrica através do coeficiente de correlação de Pearson. No caso, os resultados desta verificação somados aos aspectos desse tipo de modelagem, apontaram a perda de *PSNR* e a perda de *frames* total para o *codec* H.264, como melhores instrumentos para a geração do modelo de estimação de qualidade.

Tabela 12 – Tabela de Trabalhos Relacionados.

Referências	Principais Características	Lacunas
MARGARET H. PINSON, et. al. (IEEE Transactions On Broadcasting, 2014) (PINSON; CHOI; BOVIK, 2014)	Modelo de Qualidade de Vídeo Temporal para Distorções de Atraso de Quadro Variável.	Avalia característica espaço-temporais de vídeos de baixa resolução (dispositivos móveis), resultado apresentado através do <i>DMOS</i> . Testes exclusivamente subjetivos.
QIANG PENG et. al. (Eurasip Journal on Image and Video Processing, 2014) (PENG et al., 2014)	Neste outro trabalho é proposto uma Modelagem de distorção fim a fim baseada em <i>SSIM</i> para codificação de vídeo resiliente a erros.	Apresenta resultados apenas em valores de <i>MSE</i> , além de que utilizar apenas aspectos de <i>SSIM</i> para estimar a percepção do usuário, e aparentemente vídeos de baixas resoluções.
RAMASAMY KARTHIKEYAN et. al. (SpringerPlus, 2014) (KARTHIKEYAN; SAINARAYANAN; DEEPA, 2014)	Os autores trazem a proposta de um modelo de predição de qualidade perceptiva de vídeos em H.264, considerando aspectos de blockiness, blur e jerkiness.	Neste trabalho não são esclarecidos a quantidade de testes realizados, e considerando que este padrão de vídeo é composto por frames I, P e B, apenas utiliza o I e o MOS para o equacionamento gerado.
GHALUT et. al. (IEEE International Conference on Computer and Information Technology, 2015) (GHALUT; LARIJANI; SHAHRABI, 2015)	Neste trabalho é implementado um modelo de predição de perda de qualidade de vídeo tendo como base o conteúdo desses vídeos trafegados sobre uma rede LTE.	Realiza a predição da PSNR através de uma rede neural. Ou seja, é um modelo computacional apenas, não há modelagem matemática com os parâmetros de qualidade do vídeo. E, para funcionar precisa classificar o conteúdo dos vídeos de acordo com a movimentação.
ABDUL HAMEED, et. al. (IEEE Transactions On Multimedia, 2016) (HAMEED; DAI; BALAS, 2016)	Apresenta um modelo de previsão de qualidade de vídeo perceptual baseado em árvore de decisão e sua aplicação no <i>FEC</i> para comunicações multimídia sem fio.	Utiliza baixas resoluções para os padrões atuais de telefones (CIF 352 x 288), com vídeos formados por <i>GOPs</i> com apenas frames I e P.
BONDZULIC et. al. (IET Electronic Letters, 2016) (BONDZULIC et al., 2016)	O artigo realiza uma análise de desempenho de vídeo baseado perda de pacotes, PSNR e MOS.	Não realiza modelagem, apenas mede o desempenho de um grupo de vídeos.
DEMÓSTENES ZEGARRA RODRÍGUEZ, et. al. (IEEE Transactions On Broadcasting, 2016) (RODRIGUEZ et al., 2016)	Apresenta “Métrica de qualidade de vídeo para serviço de streaming usando o padrão DASH”.	Apresenta os fatores de camada de aplicação (HTTP) que afetam a QoE do usuário. Avaliando MOS e PCC, quando há o impacto do buffer, e das interrupções, na reprodução do streaming de vídeo.
JAROSLAV FRNDA et. al. (Springer/Telecommun Syst, 2016) (FRNDA; VOZNAK; SEVCIK, 2015)	Os autores efetuam uma avaliação de desempenho do impacto da perda de pacotes e variação de atraso (jitter) na qualidade do streaming de vídeo em tempo real.	Analisa-se vídeos MPEG-2 e MPEG-4, com resolução PAL e HD. Porém apresentam resultados apenas para <i>SSIM</i> .
MATTEO GADALETA, et. al. (IEEE Transactions On Cognitive Communications And Networking, 2017) (GADALETA et al., 2017)	Os autores desenvolvem o D-DASH: Uma estrutura profunda de Q-Learning para streaming de vídeo DASH.	O artigo avalia apenas aspectos da distribuição de vídeos sobre o protocolo HTTP, ou seja, melhorias do algoritmo DASH, analisados sob a ótica de buffer e <i>SSIM</i> .
ZHANG et. al. (Springer/Multimedia Tools Appl, 2017) (ZHANG; ZHOU; JIN, 2016)	Neste artigo propõe-se um método de avaliação de qualidade de vídeo adaptável ao conteúdo para o serviço de mídia on-line (MDVC). Este realiza um mapeamento de QoS para QoE.	Para validar o modelo simulado, os autores utilizam apenas o coeficiente de correlação de Pearson, além de ser uma avaliação de desempenho de QoS.
FALK SCHIFFNER e SEBASTIAN MOLLER. (IEEE/ (QoMEX), 2018) (SCHIFFNER; MOLLER, 2018)	O artigo apresenta duas propostas, um novo método para avaliar as dimensões de qualidade perceptiva, e um modelo geral de previsão de qualidade com base nas dimensões perceptivas antes investigadas.	Utiliza apenas a metodologia subjetiva para avaliar o resultado do trabalho.

### 3.3 Considerações finais

Este capítulo apresentou uma revisão acerca de trabalhos e pesquisas envolvendo as temáticas de análise objetiva, subjetiva, e modelagens matemáticas e computacionais. Onde foram feitas divisões a respeito das áreas de pesquisa as quais este tipo de abordagem pode ser aplicado. Os diversos trabalhos apresentados utilizam ferramentas que vão desde a modelagem analítica até a metodologia empírica, baseada em medições. Nos próximos capítulos, serão apresentados a metodologia desta tese de doutorado, e seus resultados.

# 4 MODELAGEM DA PERDA DE QUALIDADE DE VÍDEOS H.264 EM REDES SEM FIO

## 4.1 Considerações iniciais

Neste capítulo será abordada a forma com que se desenvolveu o referido trabalho, desde a fase inicial de coleta de dados até a implementação e uso das ferramentas necessárias. Também serão apresentadas seções sobre os vídeos utilizados, definição de parâmetros, metodologia, simulação, análise dos dados e das métricas selecionadas, e por fim a modelagem efetuada.

## 4.2 Vídeos Utilizados

Os vídeos utilizados neste trabalho foram obtidos da *Xiph.Org Foundation (2016)* (FOUDANTION, 2016) organização que disponibiliza uma base de dados multimídia gratuita para utilização no desenvolvimento de protocolos abertos e *softwares*.

Assim, foram escolhidos vídeos bastante usados em outros trabalhos acadêmicos: “*crowd\_run*”, “*ducks\_take\_of*”, “*in\_to\_tree*” e “*park\_joy*”. Essa escolha se justifica, pela variação de mudança de quadros ao longo de suas reproduções, uns com pouca, outro com mediana, e outros com bastante movimentação. Todos no formato *YUV* (formato sem compressão, chamado “puro”), com resoluções de 720p, 1080p e 2160p, taxa de amostragem de 4:2:0, 50 fps e duração de 10 segundos.

Para a realização do trabalho foi necessário a utilização das ferramentas *EVALVID* (EVALVID, 2014) (*framework* utilizado para transmissão e recepção do vídeo), *WINDUMP* (WINDUMP, 2016) (responsável por habilitar as placas de rede tanto do receptor como do transmissor).

A Fig.24 demonstra os vídeos utilizados, com um *frame* de cada vídeo. Dessa forma, com base na observação e não em testes espaciais e temporais, percebe-se vídeos pouca movimentação, e outros bastante movimentação. Se baseando somente na avaliação visual ao longo da reprodução dos mesmos.

Vale ressaltar outros detalhes deste processo de escolha e aferição, para que os vídeos fossem transmitidos e recebidos, necessitou-se comprimi-los para um padrão comum



Figura 24 – Vídeos Utilizados.



Fonte: (FOUDANTION, 2016)

utilizado na internet.

Para isso utilizou-se o *codec H.264/AVC*, com as seguintes configurações de vídeo: *bitrate* de 32 Mbps (valor comumente utilizado para este tipo de fluxo), grupo de imagens (GOP) de 25 *frames* (uma taxa bastante implementada para vídeos nessas resoluções aqui abordadas), taxa de *frames* por segundo igual a 50 fps, além de usar o protocolo de transporte UDP (*user datagram protocol*) com pacotes de 1024 *bytes*.

Outro ponto importante a ser destacado, foi que para cada vídeo transmitido calculou-se a média de *PSNR*. Esta será usada como referência de comparação para as medidas obtidas após recepção dos vídeos pelo usuário (agora com degradação sofrida ao longo do processo de transmissão/recepção). Neste sentido a Tabela 13 apresenta os valores de referência de cada vídeo.

Tabela 13 – Valores de *PSNR* para cada vídeo.

Vídeo	<i>PSNR</i> (dB)		
	720p	1080p	2160p
Crowd Run	39,21	36,67	32,72
DucksTake Off	36,96	31,61	28,58
Park Joy	37,93	32,49	31,16
In to Tree	41,67	37,61	35,16

Através desta tabela pode-se perceber que para esses vídeos existe uma relação de proporção entre *PSNR* e resolução de vídeo. Neste sentido nota-se um decréscimo de qualidade à medida que se aumenta a resolução de vídeo, isso se deve ao uso de um valor de *bitrate* fixo neste trabalho.

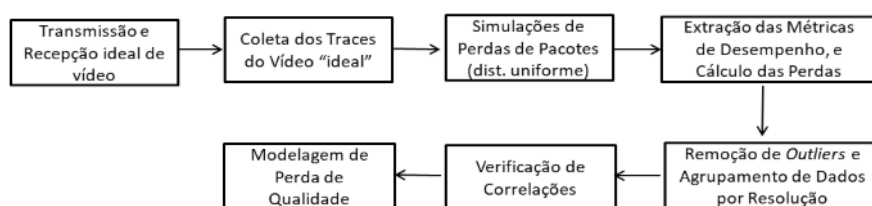


Ressalta-se que nesta fase de pré-processamento (preparação), os vídeos sofreram apenas perdas relacionadas ao processo de codificação, ou seja, os *traces* do vídeo não passaram ainda pela rotina de remoção de pacotes (esta etapa será detalhado mais a frente).

### 4.3 Metodologia Proposta para a Modelagem de Perda de Qualidade de Vídeo

O padrão de rede de comunicação escolhido foi o IEEE 802.11ac, como justificado anteriormente, um dos mais recente e projetado para suportar com qualidade o tráfego multimídia. A metodologia do trabalho terá início e será apresentada em 7 partes, conforme a ilustra a Fig.25.

Figura 25 – Metodologia de Desenvolvimento do Trabalho.



Fonte: o Autor.

A primeira etapa da metodologia consiste em realizar transmissões entre dois computadores conectados via rede sem fio em uma curta distância entre computadores e ponto de acesso, para minimizar possíveis ruídos, concorrência ou perdas. A finalidade é coletar pacotes dos vídeos enviados e recebidos, os quais precisam conter o mesmo número de pacotes no transmissor e no receptor, para que assim seja caracterizado com um transmissão/recepção ideal, ou seja, sem perdas.

Posteriormente, de posse dos arquivos de vídeos codificados (com seus valores originais de *PSNR*, *Frames* e *Pacotes*), procedimento de envio e recebimento feito via *Evalvid*, coletam-se informações dos traces referentes ao envio e transmissão do servidor (chamados de *sd* e *st*), e o de recepção do lado cliente (chamado de *rd*). Seguindo a metodologia, a etapa 3, de inserção de perdas de pacotes, é desenvolvida. Neste momento utiliza-se o trace do cliente (*rd*), e aplica-se uma rotina desenvolvida no *MATLAB* para a remoção de linhas que compõe o arquivo de vídeo, através de uma distribuição uniforme (para que haja uma probabilidade igual de haver perdas no início, meio e fim dos vídeos), onde escolhe a porcentagem de perdas de pacotes a ser implementa o referido arquivo.

De posse desses novos arquivos gerados, reconstroem-se os vídeos, simulando nesta etapa, vídeos recebidos por um usuário com porcentagens diferentes de perdas de pacotes. Deste modo, para cada vídeo gerado, serão extraídas as métricas a serem analisadas: *PSNR*, *Frames I, P, B*, e total. Somente após a coleta dessas informações é que as equações para obter as perdas de *PSNR* (*PSNR* de referência dos vídeos originais subtraído da *PSNR* dos vídeos degradados), e perdas de *frames* (Frame totais do vídeo original subtraído dos frames totais dos vídeos degradados) serão calculadas, e uma nova base de dados é montada, agora com perdas.

A próxima etapa, a quinta, é uma fase de análise desse novo conjunto de dados obtido, em que o objetivo é descrever o comportamento dos dados. Então uma análise gráfica prévia é efetuada baseada na média dos valores de perdas, e nesta observa-se a necessidade de remoção de pontos que não representam o comportamento da curva processada. Neste sentido após a retirada dessas imperfeições, e com esta base estratificada, realiza-se o agrupamento dos dados de acordo com a resolução de vídeo, 720p, 1080p, 2160p.

Na fase consecutiva os grupos de dados por resolução, organizados anteriormente, servirão de base de dados para análise de correlação pelo coeficiente de Pearson. O objetivo é verificar dentre as métricas de perdas de *frames I, P, B* e Total, qual a de maior valor, ou seja, a mais correlacionada.

Finalizando a ordem de desenvolvimento da proposta de modelagem de perda de qualidade dos vídeos, utiliza-se a Perda de *Frames Total*, parâmetro de maior correlação de Pearson, e que também é um parâmetro que facilita a aferição da métrica que alimenta a modelagem. E a perda de *PSNR* (pelos motivos já citados) para modelar o sistema nas três resoluções de vídeo. Dessa forma todo o equacionamento desenvolvido será baseado nestas duas medidas. Consecutivamente a equação encontrada é aplicada nos dados simulados, e posteriormente sob os dados medidos em ambiente real, para validação do modelo. Mais detalhes sobre cada uma dessas etapas são mostrados nas seções seguintes.

### 4.3.1 Transmissão e Recepção de Vídeos

Para este estudo, a coleta de dados foi feita da seguinte forma: um ponto de acesso com operação no padrão IEEE 802.11ac, dois notebooks e um adaptador wireless USB, a descrição dos dispositivos pode ser vista na Tabela 14.

Com o objetivo de obter parâmetros precisos, as primeiras transmissões dos vídeos ocorrem em condições favoráveis a fluxos em redes sem fio, ou seja, sem concorrência de tráfego, com mínimo ruído possível em um ambiente controlado. Dessa forma verifica-se a validade da coleta comparando a quantidade de pacotes enviados e recebidos, afim de auferir os mesmos valores de pacotes de dados no cliente (receptor) e servidor (transmis-

Tabela 14 – Características dos dispositivos utilizados.

Dispositivo	Fabricante	Modelo	Configurações
Roteador	D-Link	DIR-803	Wireless AC750 Dual Band
Adaptador Wireless USB	D-Link	DWA-171	Wireless AC Dual-Band Nano USB Adapter
Notebook 1 (Servidor)	Dell	Vostro-3460	Ubuntu 16.04 LTS
Notebook 2 (Cliente)	Dell	Inpiron-3421	Ubuntu 16.04 LTS

sor).

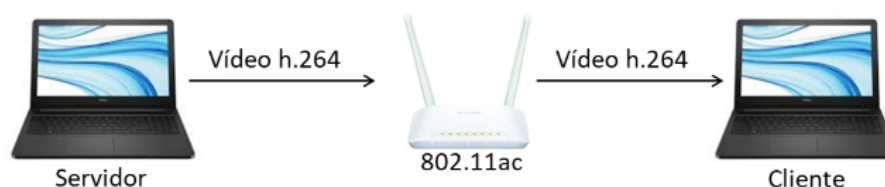
Para a geração de dados de referência o processo de coleta de dados constitui a primeira etapa na realização do estudo e modelagem. Uma "transmissão ideal" foi conduzida em um ambiente controlado, ou seja, uma transmissão simultânea sem perdas entre apenas dois computadores dedicados.

Assim, neste ambiente controlado, um total de doze transmissões foi realizado para o conjunto de vídeos, nos quais foram verificados os pacotes enviados pelo computador do servidor e os pacotes recebidos pelo computador do cliente. O resultado foi que os arquivos que incluíam o número de pacotes enviados eram o mesmo que o número recebido, e isso representavam fielmente cada vídeo.

O número de pacotes enviados e recebidos durante o estágio de transmissão de vídeo foi determinado com o auxílio da ferramenta *WINDUMP*, que, após seleção das portas de envio e recebimento (via linha de comando), registra as quantidades de pacotes nas máquinas servidor e cliente. Dessa forma, o número de pacotes enviados e recebidos em cada transmissão é obtido e salvo em um arquivo texto (SCHIFFNER; MOLLER, 2018).

Assim, ilustra-se na Fig.26 o cenário que foi configurado para os testes.

Figura 26 – Cenário de Testes.



Fonte: o autor

Utilizando este esquema de transmissão/recepção mostrado na Fig. 26, foram realizados 16 testes utilizando o *framework Evalvid* com cenário dedicado a esta tarefa, ou seja, sem concorrência, a uma distância de 1 metro entre roteador, servidor e cliente. Ge-

rando para cada teste, três arquivos de codificação de vídeo: “*st* – arquivo de transmissão com informações de frames”, “*sd* – arquivo de transmissão com informações de pacotes no servidor” e “*rd* – arquivo com informações de pacotes no cliente”; que contém dentre outras as seguintes informações: número e tamanho de pacotes, *frames*, protocolo de transporte, porta de comunicação e *IPs*. E que posteriormente servirão para a reconstrução dos vídeos.

### 4.3.2 Coleta dos *Traces* de Vídeo

A partir da coleta desses arquivos gerados para cada porcentagem de perda de pacotes inserida, realiza-se o cálculo do número das perdas de *frames* individuais e totais, e perda de *PSNR*. Levando em consideração sempre os valores originais dos vídeos, subtraídos dos novos valores da base degradada de vídeos.

Seguindo a metodologia, a etapa 3 de inserção de perdas de pacotes é desenvolvida. Neste momento, utiliza-se o trace do cliente (*rd*), e aplica-se uma rotina desenvolvida no *MATLAB* para a remoção de linhas que compõe o arquivo de vídeo, através de uma distribuição de probabilidade do tipo uniforme, em que se escolhe a porcentagem de perdas de pacotes a ser implementado no referido arquivo.

### 4.3.3 Simulações de Perda de Pacotes

O canal de comunicação sem fio é essencialmente aleatório, portanto, assume-se que a relação com a perda de pacotes pode ser descrita por uma distribuição de probabilidade do tipo uniforme, na prática uma distribuição discreta. Com base nos arquivos de codificação sem perda de vídeo, que foram obtidos no estágio anterior, a função massa de probabilidade foi aplicada para definir as linhas que tinham que ser removidas do arquivo recebido, como mostrado em 4.1.

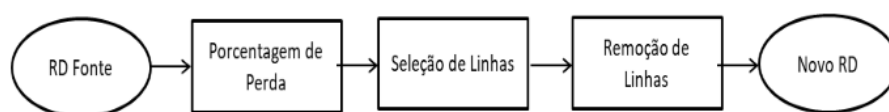
$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & , se \ a \leq x \leq b; \\ 0 & , de \ outra \ forma \end{cases} \quad (4.1)$$

Onde *b* representa o número total de pacotes de um determinado vídeo, e *a* a porcentagem a ser excluída de pacotes. Assim, existe a mesma probabilidade de todos os pacotes que compõem o vídeo serem removidos do arquivo codificado.

Assim, a rotina para simular a perda de pacotes foi estabelecida da seguinte forma: o arquivo de manipulação é o *RD Fonte*, contendo linhas que equivalem a pacotes do vídeo codificado. Então basicamente implementou-se um código que exclua uma quantidade determinada dessas linhas de forma não repetida. Portanto, efetuaram-se perdas (exclusões) de 2% até 30%, variando de dois em dois porcentos (2% em 2%), o objetivo é tentar se aproximar de uma porcentagem mais recorrente de perdas em uma rede real, extrapolando essa taxa até um máximo de 30%.

Essa rotina se aplica a cada conjunto de vídeos nos arquivos que correspondem ao recebimento do arquivo. Deste modo, haverá 15 novos arquivos codificados para cada vídeo, com perdas, que agora possuem porcentagens diferentes. O procedimento para remover a linha está ilustrado na Fig.27, onde: *RDFonte* é o arquivo original contendo os *traces* de vídeo transmitidos, *Porcentagemdeperda* denota a variação de perda (de 2% a 30%), *Seleçãodelinhas*, as linhas a serem removidas, *Remoçãodelinhas* é a função para remover as linhas do arquivo original, e *NovoRD* é o novo arquivo (alterado).

Figura 27 – Mecanismo de Remoção de linhas.



Fonte:o Autor

Vale ressaltar a importância dessa rotina de remoção. Vários arquivos criados que correspondem aos vídeos degradados são obtidos após sua aplicação, e possuem uma taxa de perda de pacotes. Esses arquivos são de importância crucial para extrair a métrica *PSNR* (em dB) das transmissões simuladas com base na porcentagem de perdas de pacotes.

Estes valores são obtidos através da reconstrução do vídeo recebido através do *software EvalVid* (EVALVID, 2014). No total, foram 50 simulações completas para cada tipo de vídeo, ou seja, uma vez que temos um conjunto de 4 vídeos (*Duck*, *Crowd*, *Park*, *Into*), cada um nas 3 resoluções, tem-se um total de 12 vídeos. Lembrando que foram gerados 15 novos vídeos com perdas de pacotes, com as taxas de 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28 e 30%, o que resulta em uma base de 180 vídeos (12 x 15), e todos simulados 50 vezes, totalizando 9.000 amostras com perdas. Sendo divididos em grupos de 750 amostras para cada vídeo.

#### 4.3.4 Extração das Métricas de Desempenho

Nesta fase do estudo, basicamente remonta-se toda a base vídeos deteriorados, para a partir da junção dos arquivos *sd*, *sterd*, via comando no *framework Evalvid*, verifique-se os resultados para *PSNR*, *Frames I*, *P*, *B* e *Total*. O objetivo desta fase é verificar o impacto causado da perda de pacotes, nas métricas de *PSNR*, *Frames* individuais e *Total*. Pois assim pode-se começar a plotar os gráficos de comportamentos desses parâmetros.

### 4.3.5 Remoção de *Outliers* e Agrupamento de Dados por Resolução de Vídeo

Como pode ser constatado pela literatura, o processo de simulação computacional pode gerar resultados que não representam com fidelidade a realidade, tais resultados são conhecidos como *outliers* (JAIN, 1991). Logo, no processo de análise dos dados resultantes das simulações é preciso remover as informações que não descrevem o comportamento da variável a ser avaliada. Nesta tese esta etapa é denominada como remoção dos *outliers* e será descrita a seguir.

O objetivo desta tese é desenvolver uma modelagem de perda de qualidade de vídeo considerando as métricas Perda de *Frames* Total, após investigação de correlação, e *PSNR*, na verdade a perda de *PSNR*, por ser um dos métodos objetivos de avaliação de qualidade de vídeos e imagens mais aceitos na comunidade científica hoje é o *PSNR*.

Para a remoção dos valores fora da zona válida de análise, foi adotado avaliar separadamente cada vídeo. Assim os valores obtidos fora dos limites superiores e inferiores de corte, foram removidos.

O corte superior é definido a partir da média dos dados mais o seu desvio padrão, de forma similar o corte inferior considera a subtração da média dos dados pelo seu desvio padrão, definidos por 4.2.

$$L_i = \{outlier, L_{fit} - D_{padr\tilde{a}o} < L_i > L_{fit} + D_{padr\tilde{a}o}\} \quad (4.2)$$

Onde:

$L_{fit}$ : é o ajuste dos dados do valor da média;

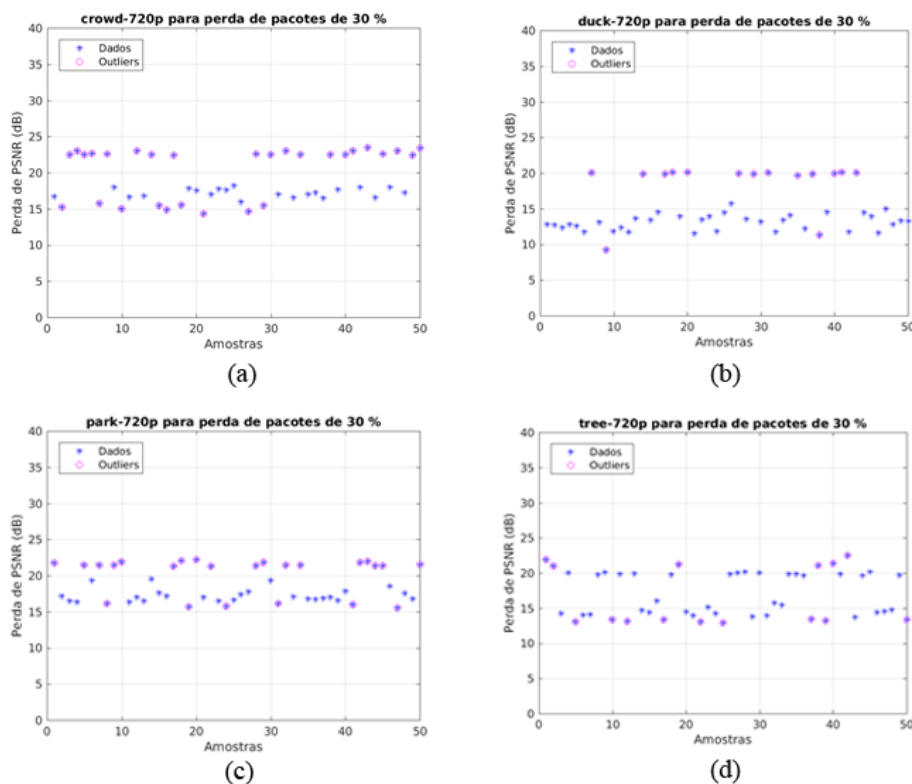
$D_{padr\tilde{a}o}$ : representa o valor para a dispersão dos dados;

$L_i$ : é o limite usado para o corte/exclusão dos dados fora desta aproximação.

Nesta fórmula calcula-se a média dos dados representada pelo  $L_{fit}$ , onde ocorre a subtração do desvio padrão, e também a adição deste desvio, encontrando assim um intervalo no qual a maioria dos dados devem pertencer, chamada limite ( $L_i$ ). Aqueles que após esse *fitting* (curva de ajuste aos dados) ficarem fora do intervalo, serão desconsiderados para a análise.

Para exemplificar esta etapa, os gráficos da Fig.28, mostram os valores de perda de *PSNR* nos vídeos utilizados no estudo, [(a) *Crowd Run*, (b) *Ducks Take of*, (c) *Park Joy* e (d) *In to Tree*] para a taxa de perda de pacotes de 30% (taxa máxima no estudo em questão) e os valores circulos em *magenta* representam estes pontos discrepantes. E que foram removidos para que a modelagem tenha uma melhor precisão.

Figura 28 – Dados Obtidos após Simulação de Perda de Pacotes para Vídeos em 720p.



Fonte: o Autor

Este processo se repete para todos os valores de perda de pacotes e para todo o conjunto de vídeos, 720p, 1080p e 2160p. Dessa forma constatou-se que para 50 amostras de cada simulação uma pequena quantidade de dados difere bastante dos demais.

Após esta exclusão de pontos fora do padrão de corte, agruparam-se os vídeos por resolução, construindo três bases de dados, uma para cada resolução (720p, 1080p e 2160p).

Em seguida calcularam-se as médias dos quatro vídeo para cada uma das resoluções, ressalta-se que os valores de perda de qualidade possuem valores distintos para cada vídeo, devido as características inerentes de cada grupo. Logo, nesta tese não é considerado a complexidade do vídeo, com relação à quantidade de movimentação, portanto não se faz a classificação dos mesmos por características espaço-temporais.

Tal divisão (caso haja) poderá resultar em um significativo aumento de complexidade para o modelo. Contudo, a proposta é equacionar um modelo capaz estimar a perda de qualidade do vídeo por resolução desconsiderando esse fator.

### 4.3.6 Escolha de Parâmetros via Coeficiente de Correlação

Um coeficiente de correlação mede o grau pelo qual duas variáveis tendem a mudar juntas. O coeficiente descreve a força e a direção da relação. A correlação de Pearson avalia a relação linear entre duas variáveis contínuas. Uma relação é linear quando a mudança em uma variável é associada a uma mudança proporcional na outra variável.

Para avaliar a correlação entre as métricas extraídas dos vídeos, com o objetivo de modelar o sistema usando aquelas que mais influenciam no processo de perda de qualidade, utilizou-se o coeficiente de correlação de Pearson. Ou seja, analisam-se estatisticamente as perdas de *frames* I, P, B, e Total, em relação à perda de pacotes, para encontrar a que possui maior valor de correlação. O resultado é apresentado na Tabela 15.

Tabela 15 – Valores de Correlação dos Frames I, B, P e Total para cada resolução de Vídeo.

Coeficiente de Correlação				
Resolução / Frames	I	P	B	Total
<b>720p</b>	0,997	1	0,9996	0,9998
<b>1080p</b>	0,9963	0,9998	0,9998	0,9999
<b>2160p</b>	0,9986	0,9996	0,9996	0,9997
<b>Média</b>	0,9973	0,9998	0,9996	0,9998

Com estes resultados, observa-se que a perda de *frames* total obteve melhor resultado para as resoluções de 1080p e 2160p, mesmo que a diferença seja em casas decimais. Já para a resolução mais baixa, a de 720p, a maior correlação foi encontrada pela perda de B.

De posse da média desses valores, conclui-se que: tanto a perda de *frame* P quanto a perda de *frames* total poderia ser escolhida, já que apresentaram a mesma média. Porém vale ressaltar o que se informou anteriormente, a opção pela métrica de perda de *frames* total, se justifica também por ficar claro que a composição deste parâmetro é feita por “porções” de todos os *frames* individuais do *codec h.264* (uma vez que é o somatório de I, P e B, dividido pelo número total de *frames*), além do que, se tratando de camada de aplicação, a facilidade e a rapidez auxiliam a aferição desta medida, referida por algumas ferramentas como *Overall*.

### 4.3.7 Modelagem da Perda de Qualidade de Vídeo

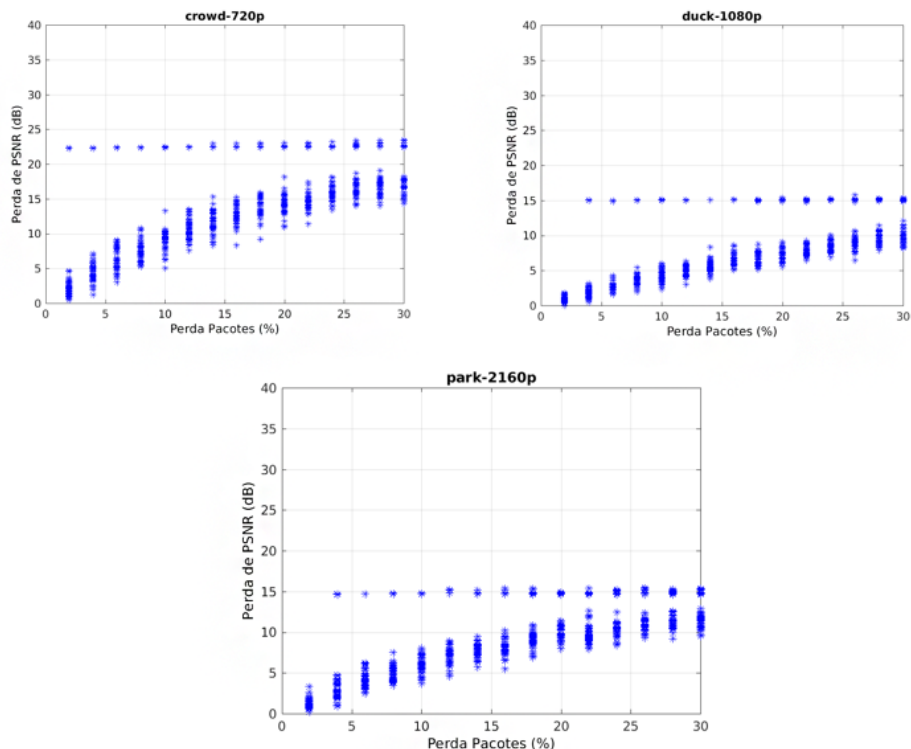
Após a escolha das métricas a serem utilizadas no equacionamento da modelagem, empregou-se os valores das perdas de *PSNR* de referência ( $L_{ref}$ ) de cada vídeo analisado, e que foram apresentados na Tabela 13.

Para cada configuração de vídeo e resolução obteve-se a *LPSNR* (perda de *PSNR*) referente a cada uma das 50 simulações, um exemplo de obtenção dos valores desse parâ-



metro é mostrado na Fig. 29.

Figura 29 – Valores de Perda de  $PSNR$ .



Fonte: o Autor.

Para os gráficos que expõem as perdas de  $PSNR$  com a perda de pacotes é possível observar uma relação direta com as perdas de pacotes. Nestes, chama-se atenção para alguns valores que não estão em concordância com os demais, estes valores são considerados *outliers* e devem ser removidos a fim de melhorar a interpretação dos resultados.

O processo de remoção descrito anteriormente será repetido e aplicado para estes dados, obtendo o resultado mostrado na Fig. 30.

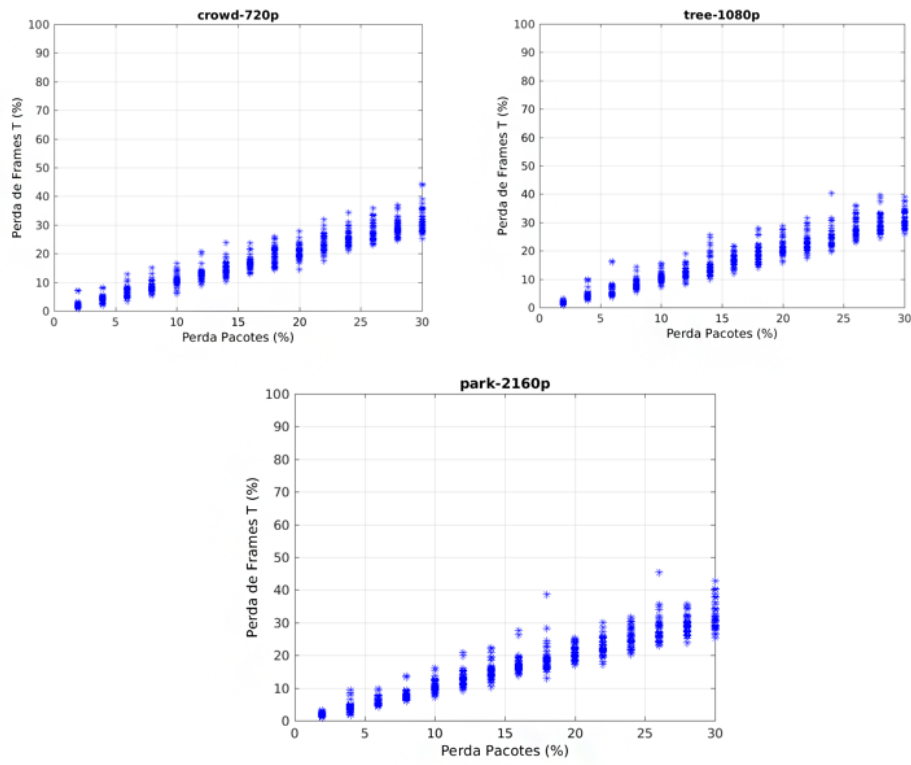
Dessa forma após a remoção dos *outliers* a perda de pacotes será substituída pela perda de *frames* total. Parâmetro que junto com a perda de  $PSNR$  são de fato utilizados na modelagem da perda de qualidade.

De posse dos dados tratados, a modelagem se torna mais eficiente. Portanto a partir da realização desta etapa, adota-se 4.3, para encontrar a perda de  $PSNR$ .

$$L_{PSNR} = L_{ref} - L_{sim} \quad (4.3)$$

Onde,  $L_{PSNR}$  é a perda média de  $PSNR$  em dB,  $L_{ref}$  é o valor médio de  $PSNR$  do vídeo transmitido e  $L_{sim}$  o valor médio de  $PSNR$  do vídeo simulado.

Figura 30 – Valores da Perda de *Frames* Total *versus* Perda de *PSNR* para as três Resoluções.



Fonte: o Autor

Após a seleção dos dados, um total de 37 amostras de cada um dos vídeos nas três resoluções foi removido.

Neste estudo, em média, 76% dos dados simulados foram utilizados para estimar a perda de *PSNR* nas porcentagens de perda de pacotes implementadas.

Os valores de perda de *PSNR* para os quatro vídeos de cada resolução (totalizando 12) são obtidos dessa forma para cada resolução, e adota-se a estratégia de agrupar seus valores por resolução.

Portanto, para cada resolução do estudo há uma perda média de *PSNR* em função dos valores de perda de pacotes. A análise do modelo proposto será baseada no cálculo de perda simulada ( $L_{sim}$ ), representado por 4.4.

$$L_{sim}(L_{Ftotal}) = \frac{\sum_{k=1}^n L_r(K)}{F} \quad (4.4)$$

Onde,  $L_{Ftotal}$  é a porcentagem de perda de pacotes,  $L_r$  a perda do *PSNR* e  $F$  o valor do número de amostras.

Após a filtragem dos dados, obteve-se a melhor expressão para representar a perda

do *PSNR*. Como resultado, uma função logarítmica foi definida por 4.3.

$$L_{PSNR} = a + b \log_{10}(L_{Ftotal}) \quad (4.5)$$

Para a obtenção de 4.3, foi utilizada a fórmula matemática do Método dos Mínimos Quadrados (HELENE, 2006), que é expressa por 4.6.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \log_{10}(L_{Ftotal}) \\ 1 & \log_{10}(L_{Ftotal}) \end{bmatrix}; coef = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}; coef = (A'A)^{-1} A'B \quad (4.6)$$

Assim, os coeficientes  $a$  e  $b$  foram obtidos para cada tipo de resolução (720p, 1080p e 2160p). Um método idêntico foi usado para determinar a expressão geral para estimar a perda de *PSNR* como uma função de resolução e perda de *frames* total relacionada. No entanto, a função objetivo relacionada à resolução depende de uma função exponencial decrescente.

Na Fig. 29, os gráficos mostram o comportamento das três resoluções de vídeo. Estas curvas foram usadas para encontrar os valores dos coeficientes de expressão de cada resolução de vídeo de acordo com 4.5.

Como resultado da aplicação de 4.6, seus coeficientes apropriados foram determinados por 4.7, por 4.8, por 4.9

$$L_{720p} = 21,329 + 12,5978x \log_{10}(L_{Ftotal}) \quad (4.7)$$

$$L_{1080p} = 16,806 + 9,809x \log_{10}(L_{Ftotal}) \quad (4.8)$$

$$L_{2160p} = 13,3968 + 7,9220x \log_{10}(L_{Ftotal}) \quad (4.9)$$

Como as equações são baseadas na função logarítmica, quando diferenciadas pelos coeficientes ( $a$  e  $b$ ), e como cada resolução possui uma equação (4.7, por 4.8, por 4.9), pode-se concluir que seus coeficientes estão relacionados à resolução.

Nesta fase, uma análise deve ser feita para determinar os coeficientes  $a$  e  $b$ . Inicialmente, os valores são determinados em termos da variável relacionada à resolução. Neste estudo, a resolução será representada por  $R$  e poderá assumir os seguintes valores: 1 (um), 1,5 (um e meio) e 3 (três) para 720p, 1080p e 2160p, respectivamente.

Esta representação foi estabelecida para simplificar o domínio da função, usando para isso a *Razão*, ou seja, utilizou-se a menor resolução (720p) como base.

Dessa forma aplica-se esta como divisora das razões 720/720, 1080/720 e 2160/720. Resultando nos valores citados anteriormente. A expressão que melhor descreve o coeficiente são as exponenciais (expressões 4.10 e 4.11), pois ambas declinam quando há um aumento de resolução (vide os coeficientes 4.7, por 4.8, por 4.9 e Tabela 16).

$$C_a = D_a + G_a e^{(-R)} \tag{4.10}$$

$$C_b = D_b + G_b e^{(-R)} \tag{4.11}$$

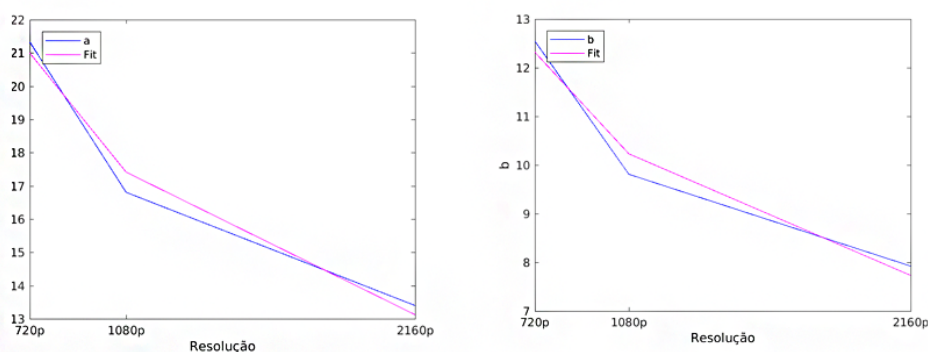
Onde,  $C$  é a função para analisar os dados,  $D$  e  $G$  são constantes e  $R$  é o tipo de resolução.

Tabela 16 – Valores para as variáveis  $a$  e  $b$ .

Variáveis \	Resoluções		
	720p	1080p	2160p
A	21,37	16,8	13,3
B	12,5	9,8	7,9

Desta forma, o comportamento das constantes  $C_a$  e  $C_b$  para cada resolução de vídeo é apresentada nos gráficos da Fig. 31.

Figura 31 – Comportamento das constantes “a” e “b” para as três Resoluções.



Fonte: o Autor.

Ao analisar os gráficos da Fig. 31, pode-se interpretar, e juntamente com os valores de “a” e “b”, que estes com o aumento da resolução, tem seus valores diminuídos, decrescentes. Isso indica que as resoluções menores são mais sensíveis a perda de pacote que os vídeos de maior resolução e acredita-se que este resultado acontece por conta do número de pacotes que cada resolução possui. Os vídeos de resolução mais baixa possuem menos pacotes, proporcionalmente, os de maiores resoluções necessitam de um número elevado de pacotes.

Dessa forma, para estimar  $a$  e  $b$  são utilizadas 4.12 e 4.13, respectivamente. Onde  $R$  está relacionado à resolução (valores estipulados de 1, 1,5 e 3).

$$C_a = 14,89 + 27,4e^{(-R)} \quad (4.12)$$

$$C_b = 9,07 + 15,2e^{(-R)} \quad (4.13)$$

Com o auxílio dos dados simulados e do tratamento de dados, é possível descrever a perda de  $PSNR$ , pois há perdas de *frames* para cada resolução. Resultando em 4.14.

$$L_{PSNR} = C_a + C_b \log_{10}(L_{Ftotal}) \quad (4.14)$$

Onde,  $L_{PSNR}$  é a porcentagem de perda de *frames* total e  $C_a$  e  $C_b$  são dadas por 4.12 e 4.13, respectivamente.

Expandindo 4.14, afim de estimar as três resoluções de vídeo examinadas, tem-se 4.15.

$$L_{PSNR}(R, L_{Ftotal}) = (11,8885 + 24,7618e^{(-R)}) + (7,0125 + 14,4232e^{(-R)}) \log_{10}(L_{Ftotal}) \quad (4.15)$$

Onde:

$L_{PSNR}(R, L_{Ftotal})$ : é a estimativa de perda do  $PSNR$ , em função da resolução e perda de *frames* total;

$R$ : é o tipo de resolução (valores 1, 1, 5 e 3);

$L_{Ftotal}$ : é a porcentagem de perda de *frames* total.

A equação acima estima a perda de  $PSNR$  causada pela perda de *frames* total e resolução de vídeo. Os resultados da equação quando aplicados aos dados simulados serão analisados nas próximas seções.

## 4.4 Considerações finais

Este capítulo apresentou o diagrama a ser seguido ao longo da tese de doutorado, sendo que para esta qualificação serão apresentados resultados referente a parte simulada do estudo. Onde posteriormente servirá de base para a comparação com a aferição realizada em ambiente real.

# 5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

## 5.1 Considerações iniciais

No capítulo anterior, uma modelagem foi proposta para estimar a perda de qualidade de vídeos em três resoluções, à medida que ocorram perdas de pacotes sobre uma determinada rede de comunicação sem fio, e estabelecendo que a perda de pacotes pode ser substituída pela perda de *PSNR* e Perda de *Frames* Total para representar o sistema em questão. Assim, neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos para as simulações implementadas no trabalho.

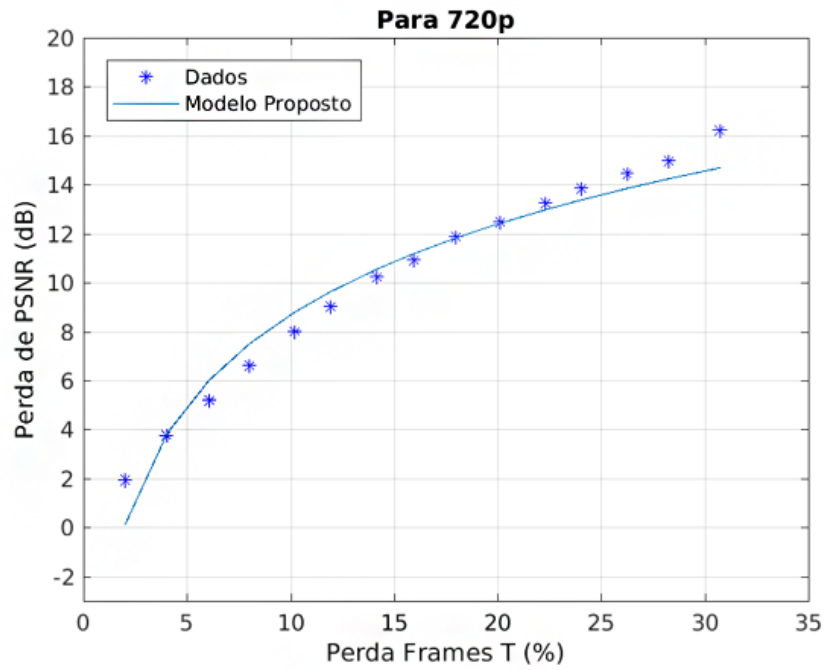
## 5.2 Resultados

Com o objetivo de avaliar a precisão da modelagem desenvolvida neste trabalho e proposta por esta tese, aplica-se a equação final aos dados sem *outliers* agrupados por resolução. Os resultados são apresentados para às três resoluções em estudo. A partir de toda a metodologia desenvolvida, e da modelagem realizada através da perda de *PSNR* e perda de *frames* total, obtém-se 4.15.

Lembrando que  $L_{PSNR}$  é a perda de *PSNR* (em dB), o  $R$  é o valor atribuído para cada resolução (1, 1,5 ou 3), e  $L_{Ftotal}$  é a perda de *frames* total.

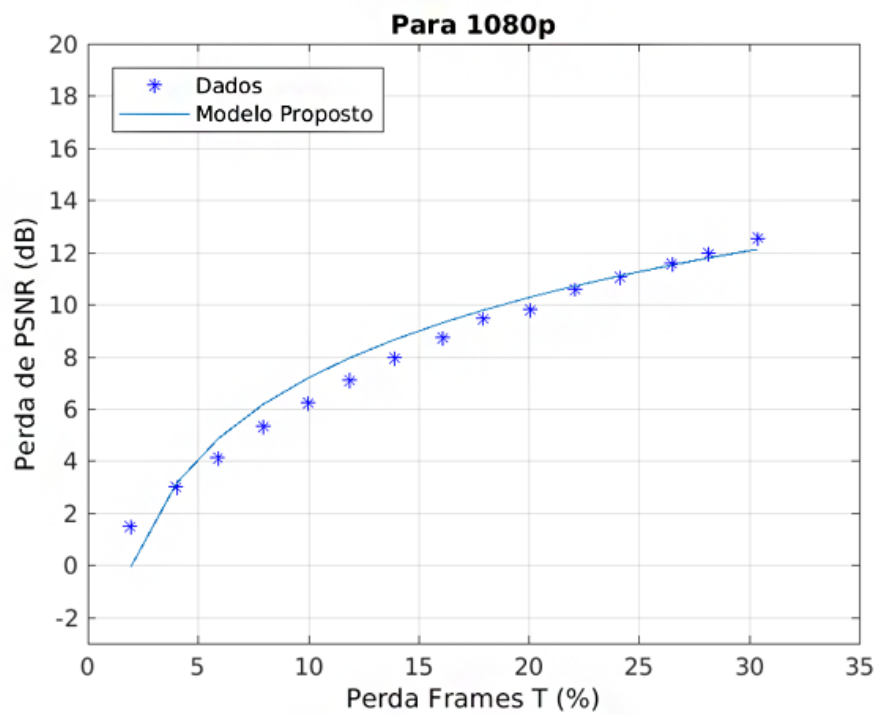
Aplicando 4.15 resultante, a estimativa de perda de qualidade baseada nas métricas de desempenho citadas anteriormente, mostra-se o seguinte resultado nas Fig. 32, 33 e 34. Apresentando a média de perda de *PSNR* (eixo y), pela média da perda de *frames* totais (eixo x), demonstrando um bom ajuste para o modelo proposto, e para este conjunto de dados analisados.

Figura 32 – Resultado da Modelagem proposta para a Resolução de 720p.



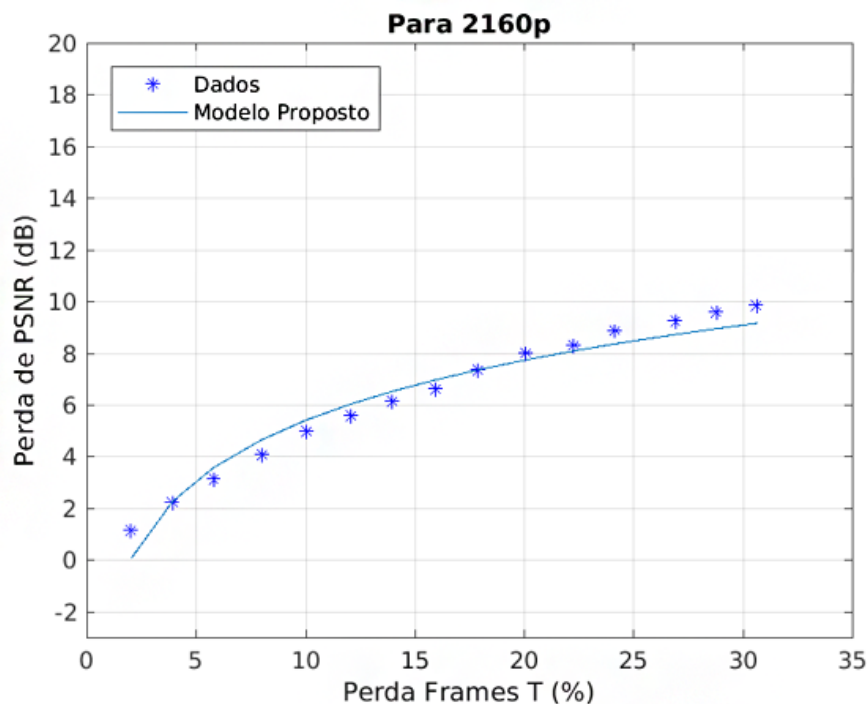
Fonte: o Autor.

Figura 33 – Resultado da Modelagem proposta para a Resolução de 1080p



Fonte: o Autor.

Figura 34 – Resultado da Modelagem proposta para a Resolução de 2160p.



Fonte: o Autor.

De acordo com o resultado apresentado nos gráficos acima, observa-se que a modelagem proposta obteve valores satisfatórios, com menos de 1 dB de *RMSE* e Desvio Padrão para todas as resoluções utilizadas nesse estudo. Os quais são exibidos na Tabela 17.

Tabela 17 – Resultados *RMSE* e Desvio Padrão

	<i>RMSE</i> (dB)	Desvio Padrão (dB)
<b>720p</b>	0,793	0,8102
<b>1080p</b>	0,6780	0,5131
<b>2160p</b>	0,5131	0,5196

De acordo com a Tabela 17, os vídeos com maior resolução, 2160p, foram os que apresentaram melhor desempenho, com valores de *RMSE* igual a 0,513 dB e desvio padrão de 0,519 dB, valores bem próximos. Em contrapartida, os vídeos com resolução de 720p alcançaram os “piores” resultados, ou seja, obtiveram maiores valores tanto para *RMSE* quanto para desvio padrão, 0,793 dB e 0,810 dB, respectivamente. Já a resolução de 1080p, obteve valores intermediários de 0,678 dB de *RMSE* e 0,651 dB de desvio.

Em todas as análises apresentadas, os valores de erro médio e de desvio padrão (medida de dispersão da média de valores), são considerados bem pequenos. O que mostra uma boa precisão do modelo gerado.



### 5.3 Considerações finais

A modelagem proposta apresentou bons resultados, atestados através do *RMSE* e Desvio Padrão. Considerando que as métricas de perda de *PSNR* e perda de *frames* podem ser utilizadas para modelar a perda de qualidade de vídeos em redes de comunicação no padrão 802.11ac.

## 6 Conclusões

Este trabalho apresentou um estudo de análise de perda de qualidade de vídeos codificados em H.264 sob redes sem fio 802.11ac, levando em consideração as métricas de desempenho perda de  $PSNR$  e perda de  $frames$  total. Para isso foram utilizados quatro vídeos em três resoluções (720p, 1080p e 2160p), o que totaliza 12 vídeos analisados, sem levar em consideração qualquer classificação de movimentação ao longo de sua reprodução. Uma base de dados resultante do processo de inserção de perdas de pacotes foi gerada, podendo ser utilizada para trabalhos futuros, já que possui uma quantidade significativa de amostradas agrupadas por resolução de vídeo. Outra contribuição obtida ao longo do desenvolvimento do estudo, é a possibilidade desta modelagem ser utilizada como ferramenta de auxílio à sistemas de apoio a decisão, pois esta pode diminuir o tempo gasto pela aplicação para prever perdas de qualidade de vídeo. O modelo proposto demonstrou ser bem representativo. Alcançando resultados satisfatórios com dados simulados, e apresentando o melhor resultado com valores médios de  $RMSE$  de 0,513 dB e desvio padrão de 0,519 dB para a resolução de 2K de 2160 *pixels*, a maior neste estudo. Para as outras resoluções de 720p e 1080, os resultados também podem ser considerados bons, pois em nenhuma se obteve valor 0,810 dB para  $RMSE$  e Desvio padrão. O que significa erros muito pequenos. Ao final do estudo, conclui-se que através da perda de pacotes, pode-se inferir que as perdas de  $PSNR$  e Perda de  $Frames$  podem ser utilizadas para modelar um sistema com as condições especificadas neste trabalho, alcançando resultados satisfatórios.

### 6.1 Trabalhos futuros

Como trabalhos futuros pretende-se desenvolver:

- Medições em ambiente real utilizando redes no padrão 802.11ac, e vídeos em HD, 2K e 4K;
- Criar uma base de dados significativa com a coleta das medições;
- Validar o modelo proposto com o comparativo de dados simulados e dados reais

### 6.2 Produções científicas durante os estudos

Os trabalhos publicados durante o doutorado são:

- **CARMONA, JOÃO VICTOR COSTA**; CARVALHO DE MATOS, EDEMIR MARCUS ; CASTRO, BRUNO SOUZA LYRA ; BARROS, FABRÍCIO JOSÉ BRITO ; NETO, MIÉRCIO CARDOSO DE ALCÂNTARA ; PELAES, EVALDO GONÇALVES . Video loss prediction model in wireless networks. PLoS One, v. 14, p. e0212407, 2019;
- MEDEIROS, G. O. ; **CARMONA, J. V. C.** ; VIEIRA, A. S. . Simulação e Avaliação de Desempenho do padrão IEEE 802.11b para Transmissões de Streaming de Video MPEG-4. In: Escola Regional de Informática do Piauí, 2016, Picos. ERIPI 2016, 2016;
- BRAGA, A. S. ; **CARMONA, J. V. C.** ; ARAUJO, J. P. L. ; RODRIGUES, J. C. ; GOMES, H. ; FRAIHA, S. G. C. ; CAVALCANTE, G. P. S. . Wireless Indoor Networks Planning Considering QoE Metrics on Multimedia Applications. In: The 9th European Conference on Antennas and Propagation, 2015, Lisboa. European Conference on Antennas and Propagation 2015. Lisboa: Eucap 2015, 2015. v. 15. p. 123-128;
- ● CARVALHO, A. P. ; **CARMONA, J. V. C.** ; ARAUJO, J. P. L. ; FRAIHA, S. G. C. ; GOMES, H. ; CAVALCANTE, G. P. S. . Prediction Metrics for QoE/QoS in Wireless Video Networks for Indoor Environmental Planning: a Bayesian Approach. In: The Fourteenth International Conference on Networks, 2015, Barcelona. The International Symposium on Advances in Software Defined Networks. Barcelona: Softnetworking, 2015. v. 15. p. 171-17;
- CARVALHO, A. P. ; BRAGA, A. ; **CARMONA, J. V. C.** ; COSTA, A. B. ; LOPES, R. L. F. ; ARAUJO, J. P. L. ; FRAIHA, S. G. C. ; GOMES, H. ; CAVALCANTE, G. P. S. . Prediction Metrics in Indoor Wireless Networks Considering Multimedia Applications: a Bayesian Approach. Dubai: Dubai, 2015 (Conferencia Internacional);
- **CARMONA, J. V. C.**; Pelaes, E. Gonçalves . Analysis and Performance of Traffic of Voice and Video in Network Indoor PLC. Revista IEEE América Latina , v. 10, p. 1268-1273, 2012.

## Referências

- ALMEIDA, R. J. dos S. *Transmissão de vídeo em Tempo Real na Internet*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Aveiro, 2004. Disponível em: <<https://ria.ua.pt/bitstream/10773/1862/1/2005001710.pdf>>. Citado na página 1.
- BEGAZO, D. C. *Avaliação objetiva e subjetiva de qualidade de vídeo via rede IP com variação de atraso*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2012. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3142/tde-16072013-122005/pt-br.php>>. Citado na página 14.
- BONDZULIC, B. et al. Performance of peak signal-to-noise ratio quality assessment in video streaming with packet losses. *Electronics Letters*, 2016. Institution of Engineering and Technology (IET), v. 52, n. 6, p. 454–456, mar 2016. Citado 3 vezes nas páginas 23, 24 e 36.
- CISCO. *Relatório Cisco® Visual Networking Index (VNI) Global Forecast and Service Adoption 2014-2019*. [S.l.], 2017. Disponível em: <[http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/ip-ngn-ip-next-generation-network/white\\_paper\\_c11-481360.html](http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/ip-ngn-ip-next-generation-network/white_paper_c11-481360.html)>. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 2.
- CISCO. *CISCO Visual Networking Index: Global ,mobile Data Traffic Forecast Update*. [S.l.], 2019. Citado na página 1.
- CUNHA., V. C. *Avaliação da Qualidade de Vídeo Escalável em Rede Sem Fio de 3ª Geração*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília., 2012. Disponível em: <<http://repositorio.unb.br/handle/10482/10609>>. Citado na página 1.
- EVALVID. Evalvid - a video quality evaluation tool-set. Online. 2014. Disponível em: <<http://www2.tkn.tu-berlin.de/research/evalvid/fw.html>>. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 43.
- FONSECA., W. B. S. A. de A. P. P. K. V. O. *Um Modelo de Referência Completa Para Avaliação Objetiva da Qualidade de Vídeo em Dispositivos Móveis em Ambientes do Sistema Brasileiro de TV Digital (SBTVD)*. [S.l.], 2009. Disponível em: <<http://set6.tempsite.ws/revistaeletronica/index.php/revistaderadiodifusao/article/view/155>>. Citado na página 14.
- FOUDANTION, X. Xiph.org video test media [derf's collection]. Online. 2016. Disponível em: <<https://media.xiph.org/video/derf/>>. Citado 3 vezes nas páginas 18, 37 e 38.
- FRANCÊS, C. R. L. Introdução às redes de petri. Universidade Federal do Pará. 2003. Disponível em: <[https://www.dca.ufrn.br/~affonso/FTP/DCA409/redes\\_de\\_petri.pdf](https://www.dca.ufrn.br/~affonso/FTP/DCA409/redes_de_petri.pdf)>. Citado na página 9.
- FRNDA, J.; VOZNAK, M.; SEVCIK, L. Impact of packet loss and delay variation on the quality of real-time video streaming. *Telecommunication Systems*, 2015. Springer Science and Business Media LLC, v. 62, n. 2, p. 265–275, apr 2015. Citado 5 vezes nas páginas IX, 17, 27, 28 e 36.

- GADALETA, M. et al. D-DASH: A deep q-learning framework for DASH video streaming. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2017. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 3, n. 4, p. 703–718, dec 2017. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 36.
- GHALUT, T.; LARIJANI, H.; SHAHRABI, A. Content-based video quality prediction using random neural networks for video streaming over LTE networks. In: *2015 IEEE International Conference on Computer and Information Technology; Ubiquitous Computing and Communications; Dependable, Autonomic and Secure Computing; Pervasive Intelligence and Computing*. [S.l.]: IEEE, 2015. Citado 4 vezes nas páginas XI, 34, 35 e 36.
- HAMEED, A.; DAI, R.; BALAS, B. A decision-tree-based perceptual video quality prediction model and its application in FEC for wireless multimedia communications. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2016. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 18, n. 4, p. 764–774, apr 2016. Citado 5 vezes nas páginas XI, 30, 31, 32 e 36.
- HELENE, O. A. M. *Método dos mínimos quadrados com formalismo matricial guia do usuário*. [S.l.]: Editora Livraria da Física, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 49.
- JAILTON, J. et al. A quality of experience handover architecture for heterogeneous mobile wireless multimedia networks. *IEEE Communications Magazine*, 2013. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 51, n. 6, p. 152–159, jun 2013. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 15.
- JAIN, R. *The Art of Computer Systems Performance Analysis: Techniques for Experimental Design, Measurement, Simulation, and Modeling*. 2 ed.. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons., 1991. Citado 5 vezes nas páginas 7, 8, 9, 10 e 44.
- KARTHIKEYAN, R.; SAINARAYANAN, G.; DEEPA, S. N. Perceptual video quality assessment in h.264 video coding standard using objective modeling. *SpringerPlus*, 2014. Springer Nature, v. 3, n. 1, apr 2014. Citado 4 vezes nas páginas IX, 24, 25 e 36.
- LE MOS, V. B. B. P. G. *Evolução da Definição e Resolução do Vídeo*. [S.l.], 2014. Citado na página 2.
- LOURENÇO, A. G. R. Internet live streaming. Instituto Superior Técnico, Lisboa. 2014. Disponível em: <<http://docplayer.com.br/2224247-Internet-live-streaming-ana-gomes-68370-rodrigo-lourenco-69924.html>>. Citado na página 3.
- MIGLIORINI, D.; MINGOZZI, E.; VALLATI, C. Performance evaluation of h.264/SVC video streaming over mobile WiMAX. *Computer Networks*, 2011. Elsevier BV, v. 55, n. 15, p. 3578–3591, oct 2011. Citado na página 15.
- NASCIMENTO, R. A. M. T. Y. I. V. S. A. G. L. H. Avaliação objetiva de qualidade de vídeo no padrão h.264 para sistemas de transmissão de tv digital. *Revista Ciência e Tecnologia*, 2012. v. 15, n. 27, p. 45–50, 2012. ISSN 2236-6733. Disponível em: <<http://www.revista.unisal.br/sj/index.php/123/article/view/206>>. Citado na página 14.
- NETER, J. et al. *Applied Linear Statistical Models*. [S.l.]: McGraw-Hill/Irwin, 1996. ISBN 978-0256117363. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.

- OLIVEIRA, R. de S. *Predição de Qualidade de Experiência em Redes Wimax em Aplicações de Video baseada em Aspectos de Qualidade de Serviço*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Pará, 2011. Disponível em: <<http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/2974>>. Citado na página 19.
- PENG, Q. et al. Modeling of SSIM-based end-to-end distortion for error-resilient video coding. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 2014. Springer Nature, v. 2014, n. 1, sep 2014. Citado 4 vezes nas páginas IX, 26, 27 e 36.
- PETERNELLI, P. L. A. Regressão linear e correlação. In: \_\_\_\_\_. INF 162, 2016. cap. Capítulo 9, p. 1 – 11. Disponível em: <<http://www.dpi.ufv.br/~petercelli/inf162.www-16032004/materiais/CAPITULO9.pdf>>. Citado na página 20.
- PINSON, M. H.; CHOI, L. K.; BOVIK, A. C. Temporal video quality model accounting for variable frame delay distortions. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2014. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 60, n. 4, p. 637–649, dec 2014. Citado 3 vezes nas páginas 29, 30 e 36.
- REZENDE, F. G. de Moraes; Gircirley Francisco da S. T. A. Introdução à teoria das filas. Universidade Federal do Mato Grosso. 2011. Disponível em: <<http://www.kurims.kyoto-u.ac.jp/EMIS/journals/em/docs/coloquios/CO-2.06.pdf>>. Citado na página 10.
- RODRIGUEZ, D. Z. et al. Video quality metric for streaming service using DASH standard. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2016. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 62, n. 3, p. 628–639, sep 2016. Citado 3 vezes nas páginas 33, 34 e 36.
- RUGGIERO, M. A. G. *Cálculo Numérico. Aspectos Teóricos e Computacionais (Em Portuguese do Brasil)*. [S.l.]: Pearson, 2000. ISBN 978-8534602044. Citado na página 21.
- SANTANA, M. J. S. R. H. C. Avaliação de desempenho de sistemas computacionais. USP. 2018. Disponível em: <<http://wiki.icmc.usp.br/images/3/33/Aula3tecnicas1.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 9.
- SANTOS, M. A. dos. Medição de qoe para fluxos de vídeo. 2010. 2010. Disponível em: <<http://www.midiacom.uff.br/~deborafsmm/trab-2010-1/qoe.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 4.
- SCHIFFNER, F.; MOLLER, S. Direct scaling & quality prediction for perceptual video quality dimensions. In: *2018 Tenth International Conference on Quality of Multimedia Experience (QoMEX)*. [S.l.]: IEEE, 2018. Citado 4 vezes nas páginas XI, 28, 36 e 41.
- UNION, I. T. *ITU-T P.910: Subjective video quality assessment methods for multimedia applications*. [S.l.], 2008. Disponível em: <<https://www.itu.int/rec/T-REC-P.910-200804-I>>. Citado 3 vezes nas páginas 11, 12 e 13.
- UNION, I. T. *ITU-R BT.500-13. Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures*. [S.l.], 2012. Disponível em: <[https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.500-13-201201-I!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.500-13-201201-I!!PDF-E.pdf)>. Citado 3 vezes nas páginas 11, 12 e 13.

- WANG, Z.; LU, L.; BOVIK, A. C. Video quality assessment based on structural distortion measurement. *Signal Processing: Image Communication*, 2004. Elsevier BV, v. 19, n. 2, p. 121–132, feb 2004. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 17.
- WINDUMP. Windump overview. version 4.7.4. Online. 2016. Disponível em: <<https://www.winpcap.org/windump/>>. Citado na página 37.
- XIAO, F. *DCT-based Video Quality Evaluation*. [S.l.], 2000. Disponível em: <[https://www.compression.ru/video/quality\\_measure/vqm.pdf](https://www.compression.ru/video/quality_measure/vqm.pdf)>. Citado na página 17.
- ZHANG, D.; ZHOU, D.; JIN, X. A content-adaptive video quality assessment method for online media service. *Multimedia Tools and Applications*, 2016. Springer Science and Business Media LLC, v. 76, n. 5, p. 7175–7195, mar 2016. Citado 4 vezes nas páginas IX, 25, 26 e 36.