

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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ROSINEI DE SOUSA OLIVEIRA

PREDIÇÃO DE QUALIDADE DE EXPERIÊNCIA EM REDES WIMAX EM  
APLICAÇÕES DE VIDEO BASEADA EM ASPECTOS DE QUALIDADE DE  
SERVIÇO

**BELÉM – PA**

**2011**

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

ROSINEI DE SOUSA OLIVEIRA

PREDIÇÃO DE QUALIDADE DE EXPERIÊNCIA EM REDES WIMAX EM  
APLICAÇÕES DE VIDEO BASEADA EM ASPECTOS DE QUALIDADE DE  
SERVIÇO

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará como requisito de obtenção do título de “Mestre em Engenharia Elétrica”, sob orientação do Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa.

BELÉM - PA

2011

PREDIÇÃO DE QUALIDADE DE EXPERIÊNCIA EM APLICAÇÕES DE VIDEO  
BASEADA EM ASPECTOS DE QUALIDADE DE SERVIÇO

ROSINEI DE SOUSA OLIVEIRA

Este trabalho foi julgado adequado para o **Título de Mestre em Engenharia Elétrica**, na área de Computação Aplicada, e aprovado na sua forma final pela banca examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará em 01 de julho de 2011.

**BANCA EXAMINADORA:**

---

Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa - ORIENTADOR

---

Prof. Dr. Eduardo Coelho Cerqueira - COORIENTADOR

---

Prof. Dr. Nandamudi Lankalapalli Vijaykumar(INPE) - MEMBRO EXTERNO

---

Prof. Dr. Diego Lisboa Cardoso (UFPA)

VISTO:

---

Prof. Dr. Marcus Vinicius Alves Nunes - Coordenador do PPGEE/ITEC/UFPA

BELÉM - PA

2011

## DEDICATÓRIA

À Deus:

“Porque dele e por ele, e para ele, são todas as coisas; glória, pois, a ele eternamente. Amém” - Rm 11:36

## AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo suas infinitas bênçãos em minha vida, e pela Fé que me deu forças pra lutar por esse grande sonho.

Aos meus pais Rosivaldo e Raimunda Oliveira, pelo infinito amor, ensinamentos, e por me proporcionarem acesso a educação, mesmo diante de tantas dificuldades.

As minhas irmãs Rosivânia e Rosiane, pelo cuidado que tiveram comigo e pelo companheirismo mesmo distante.

Aos meus lindos sobrinhos Lucas e Yasmin, pelo respeito e admiração.

À família Matos, em especial minha namorada Alina, pelo amor, companheirismo e por ter compartilhado e vivenciado comigo as lutas enfrentadas durante a jornada em busca desse sonho.

Ao professor João Weyl, pelos ensinamentos, apoio, pela oportunidade dada para a realização desse grande sonho. Serei eternamente grato!

Ao professor Eduardo Cerqueira pela rica contribuição e orientação.

Ao Laboratório de Planejamento de Redes de Alto Desempenho (LPRAD), em especial ao professor Renato Francês, pelos ensinamentos e apoio.

Ao professor Namdamudi Lamkalapali Vijaykumar por todo apoio que me foi dado quando estive em intercâmbio no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em São José dos Campos.

Aos amigos Carlos Natalino e Victor Machado, pela amizade e pelo apoio incondicional neste trabalho.

Aos amigos da sala de estudos do Centro de Controle de Satélites (CCS) do INPE pela companhia nas muitas madrugadas de estudo e pelas risadas.

Aos amigos de Santarém Paulo Henrique, Leandro, Ricardo, Cinthia Miranda, Ediane, Keice, Geane, Wenderson, Rodolfo, Bruno, Douglas pela amizade!

**Just have a little faith** - Michael  
Scofield - Serie Prison Break

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 3.1</b> - Topologia WiMAX.....	10
<b>Figura 3.2</b> - Pilha de protocolo do IEEE 802.16 .....	11
<b>Figura 3.3</b> - Diagrama de Modulação Adaptativa do IEEE 802.16.....	12
<b>Figura 4.1</b> - Abordagem objetiva e subjetiva .....	22
<b>Figura 4.2</b> - Funcionamento do SSIM .....	26
<b>Figura 4.3.</b> Avaliação baseada em referência .....	28
<b>Figura 5.1.</b> - Modelo de um neurônio genérico .....	32
<b>Figura 5.2</b> - Rede MLP com uma camada intermediária.....	31
<b>Figura 5.3</b> - Paradigma de aprendizagem supervisionada .....	32
<b>Figura 6.1</b> – Funcionamento do Evalvid .....	32
<b>Figura 6.2</b> - Ilustração do Funcionamento do Evalvid .....	37
<b>Figura 6.3</b> - Vídeos Selecionados .....	39
<b>Figura 6.4</b> - Cenário Proposto .....	39
<b>Figura 6.5</b> - Processo de geração da base de dados e treinamento .....	41
<b>Figura 6.6</b> - Fluxograma para obtenção de melhor configuração da RNA .....	42
<b>Figura 7.1</b> - Avaliação do cenários proposto.....	43
<b>Figura 7.2</b> - Desempenho de QoE do MOS.....	44
<b>Figura 7.3</b> - Valores de erro de treino e de teste para o MOS .....	45
<b>Figura 7.4</b> - Comparação entre valores reais e preditos para o MOS.....	46
<b>Figura 7.5</b> - Desempenho de QoE do PSNR .....	47
<b>Figura 7.6</b> - Valores de erro de treino e de teste para o PSNR.....	48
<b>Figura 7.7</b> - Comparação entre valores reais e preditos para o PSNR .....	48
<b>Figura 7.8</b> - Desempenho de QoE do SSIM .....	49
<b>Figura 7.9</b> - Valores de erro de treino e de teste para o SSIM .....	50
<b>Figura 7.10</b> - Comparação entre valores reais e preditos para o SSIM .....	50
<b>Figura 7.11</b> - Desempenho de QoE do VQM.....	51
<b>Figura 7.12</b> - Valores de erro de treino e de teste para o VQM .....	52
<b>Figura 7.13</b> - Comparação entre valores reais e preditos para o VQM .....	52

**LISTA DE TABELAS**

<b>Tabela 3.1</b> - Características da Camada Física .....	14
<b>Tabela 3.2</b> - Requerimentos mínimos para aplicações no WiMAX.....	18
<b>Tabela 4.1</b> – Valores do MOS .....	24
<b>Tabela 4.2</b> – Mapeamento do PSNR para o MOS.....	25
<b>Tabela 6.1</b> – Configuração da Simulação .....	40

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS (Falta Revisar)**

AATG	Application Architecture Task Group
AMC	Adaptative Coding and Modulation
ARQ	Automatic Repeat Request
ATM	Asynchronous Transfer Mode
BE	Best-effort
BS	Base Station
CBR	Constant Bit Rate
CDN	Content Distribution Networks
CRC	Checksum Cíclica de Redundância
DAMA	Demand Assigned Multiple Access
DiffServ	Differentiated Services
DSL	Digital Subscriber Line
ErtPS	Serviço de Polling de Tempo Real Estendido
ERT-VR	Extended Real-Time Variable Rate
ETSI	European Technical Committee for Speech Transmission
FDD	Frequency Division Duplexing
FR	Full Reference
FTP	File Transfer Protocol
FFT	Fast Fourier Transform
GMH	Generic MAC Header
GOP	Group of Picture
GPL	General Public Licence
HVS	Human Visual System
HyQoE	Hybrid QoE
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electric and Electronic Engineers
IPTV	Voz sobre IP
ISO	International Organization for Standardization
ITU-T	International Telecommunication Union
JVT	Joint Video Team
LGN	Lateral Geniculate Nucleus

LOS	Line of Sight
LPRAD	Laboratório de Planejamento de Redes de Alto Desempenho
MAC	Media Access Control
MLP	Multi-Layer Perceptron
MOS	Mean Option Score
MPDU	MAC PDUs - Protocol Data Units
MPEG	Moving Picture Expert Group
MPLS	Multi Protocol Label Switching
MPQM	Moving Picture Quality Metric
MSDU	MAC SDU - Service Data units
MSE	Mean Square Error
NIST	National Institute of Standards Technology
NLOS	Non Line of Sight
NR	No Reference
NS2	Network Simulator
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OSI	Open Systems Interconnection
OTCL	Object-oriented Tool Command Language
PEVQ	Perceptual Evaluation of Video Quality
PMP	Point-to-Multipoint
PSNR	Peak Signal to Noise Ratio
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoE	Qualidade de Experiência
QoE2M	QoE-aware Real Time Multimedia Management
QoS	Qualidade de Serviço
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RNA	Redes Neurais Artificiais
RR	Reduced Reference
RTPS	Real-time polling Services
SC	Single Carrier
SFID	Service Flow ID
SONET	Synchronous Optical Network

SS	Subscribe Station
SSIM	Structural Similarity Index
TDD	Time Division Duplexing
TDM	Time Division Multiplexing
TDMA	Time Division Multiple Access
UGS	Unsolicited Grant Services
UNII	Unlicensed National Information Infrastructure
VCEG	Video Coding Expert Group
VINT	Virtual Network Testbed
VQEG	Video Quality Experts Group
VQM	Video Quality Metric
WEKA	Waikato Environment for Knowledge Analysis
WiMAX	World Interoperability for Microwave Access

## RESUMO

A crescente utilização dos serviços de telecomunicações principalmente sem fio tem exigido a adoção de novos padrões de redes que ofereçam altas taxas de transmissão e que alcance um número maior de usuários. Neste sentido o padrão IEEE 802.16, no qual é baseado o WiMAX, surge como uma tecnologia em potencial para o fornecimento de banda larga na próxima geração de redes sem fio, principalmente porque oferece Qualidade de Serviço (QoS) nativamente para fluxos de voz, dados e vídeo. A respeito das aplicações baseadas vídeo, tem ocorrido um grande crescimento nos últimos anos. Em 2011 a previsão é que esse tipo de conteúdo ultrapasse 50% de todo tráfego proveniente de dispositivos móveis.

Aplicações do tipo vídeo têm um forte apelo ao usuário final que é quem de fato deve ser o avaliador do nível de qualidade recebida. Diante disso, são necessárias novas formas de avaliação de desempenho que levem em consideração a percepção do usuário, complementando assim as técnicas tradicionais que se baseiam apenas em aspectos de rede (QoS). Nesse sentido, surgiu a avaliação de desempenho baseada Qualidade de Experiência (QoE) onde a avaliação do usuário final em detrimento a aplicação é o principal parâmetro mensurado.

Os resultados das investigações em QoE podem ser usados como uma extensão em detrimento aos tradicionais métodos de QoS, e ao mesmo tempo fornecer informações a respeito da entrega de serviços multimídias do ponto de vista do usuário. Exemplos de mecanismos de controle que poderão ser incluídos em redes com suporte a QoE são novas abordagens de roteamento, processo de seleção de estação base e tráfego condicionado

Ambas as metodologias de avaliação são complementares, e se usadas de forma combinada podem gerar uma avaliação mais robusta. Porém, a grande quantidade de informações dificulta essa combinação.

Nesse contexto, esta dissertação tem como objetivo principal criar uma metodologia de predição de qualidade de vídeo em redes WiMAX com uso combinado de simulações e técnicas de Inteligência Computacional (IC). A partir de parâmetros de QoS e QoE obtidos através das simulações será realizado a predição do comportamento futuro do vídeo com uso de Redes Neurais Artificiais (RNA). Se por um lado o uso de simulações permite uma gama de opções como extrapolação de cenários de modo a imitar as mesmas

situações do mundo real, as técnicas de IC permitem agilizar a análise dos resultados de modo que sejam feitas previsões de um comportamento futuro, correlações e outros. No caso deste trabalho, optou-se pelo uso de RNAs uma vez que é a técnica mais utilizada para previsão do comportamento, como está sendo proposto nesta dissertação.

***Palavras-chave: WiMAX, Qualidade de Serviço, Qualidade de Experiência, Transmissão de Vídeo, Redes Neurais Artificiais***

## ABSTRACT

The increasing use of telecommunications services mainly wireless has demanded the adoption of new networking standards that offer higher data rates and reach a larger number of users. In this sense the IEEE 802.16 standard, which is based WiMAX emerges as a potential technology for providing broadband in the next generation of wireless networks, mainly because it offers Quality of Service (QoS) for voice streams natively, data and video. Regarding the video-based applications, there has been a steady growth in recent years. In 2011 it is expected that this type of content exceeds 50% of all traffic from mobile devices.

Applications like video have a strong appeal to the end user who is who in fact should be the evaluator's level of perceived quality. Given this, we need new forms of performance assessment that take into account the perception of the user, thereby complementing traditional techniques that rely only on network aspects (QoS). In this sense, there was the performance evaluation based on Quality of Experience (QoE) assessment where the end user rather than the application is the main parameter measured.

The results of investigations QoE can be used as an extension over the traditional methods of QoS, and at the same time provide information regarding the delivery of multimedia services from the viewpoint of the user. Examples of control mechanisms that may be included in networks that support new approaches are QoE routing process of selecting the base station and traffic conditioning.

Both methods of evaluation are complementary, and if used in combination can generate a more robust assessment. However, the large amount of information hinders this combination.

In this context, this paper's main objective is to create a methodology to predict video quality WiMAX networks with combined use of simulation techniques and Computational Intelligence (CI). From QoS and QoE parameters obtained from the simulations will be performed to predict the future behavior of the video with the use of Artificial Neural Networks (ANN). On the one hand the use of simulations allows a range of options such as

extrapolation of scenarios to mimic the same real-world situations, the IC techniques allow faster analysis of the results so that they are made predictions of future behavior, correlations and others. In the case of this work, we chose to use RNA as it is the most used technique to predict the behavior, as is being proposed in this dissertation

***Keywords: WiMAX, Quality Service, Quality of Experience, Streaming Video, Artificial Neural Networks***

## SUMÁRIO

DEDICATÓRIA .....	iii
AGRADECIMENTOS .....	iv
LISTA DE FIGURAS .....	vi
LISTA DE TABELAS .....	vii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS (Falta Revisar) .....	viii
RESUMO .....	xi
SUMÁRIO .....	xv
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1    OBJETIVO .....	3
1.2    ESTRUTURA DO DOCUMENTO.....	3
2. TRABALHOS CORRELATOS .....	4
3. TECNOLOGIA WIMAX.....	9
3.1    CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	9
3.2    PADRÃO 802.16.....	9
3.3    PADRÃO IEEE 802.16 – 2004 .....	10
3.4    CAMADA FÍSICA .....	11
3.4.1    WIRELESS MAN-SC.....	11
3.4.2    WIRELESS MAN-SCA.....	13
3.4.3    WirelessMAN-OFDMA.....	13
3.4.4    WirelessHUMAN.....	14
3.5    CAMADA MAC.....	15
3.5.1    MECANISMOS DE ACESSO AO CANAL.....	15
3.5.2    QUALIDADE DE SERVIÇO.....	16
3.6    APLICAÇÕES MULTIMÍDIAS NO WIMAX.....	18
3.6.1    TIPOS DE FRAMES .....	19
4. MÉTRICAS DE QUALIDADE DE SERVIÇO E QUALIDADE DE EXPERIÊNCIA.....	21
4.1    CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	21
4.2    MÉTRICAS DE QUALIDADE DE SERVIÇO .....	21
4.2.1    PERDA.....	21
4.2.2    ATRASO.....	21
4.2.3    JITTER.....	21
4.3    QUALIDADE DE EXPERIÊNCIA .....	22
4.3.1    ABORDAGEM SUBJETIVA.....	23
4.3.2    ABORDAGEM OBJETIVA.....	24
4.3.3    AVALIAÇÃO BASEADA EM REFERENCIA .....	26
5. REDES NEURAIIS.....	29
5.1    CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	29

5.2	CARACTERÍSTICAS .....	29
5.2.1	ARQUITETURA DA REDE .....	30
5.3	APRENDIZAGEM .....	31
5.3.1	APRENDIZAGEM SUPERVISIONADA .....	32
5.3.1.1	O algoritmo Backpropagation .....	33
6.	METODOLOGIA .....	36
6.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	36
6.2	FERRAMENTAS UTILIZADAS .....	36
6.2.1	EVALVID .....	36
6.2.2	NETWORK SIMULATOR .....	37
6.2.3	WEKA .....	38
6.3	VIDEOS UTILIZADOS .....	38
6.4	CENÁRIO PROPOSTO .....	39
6.5	GERAÇÃO DA BASE DE DADOS E PREDIÇÃO .....	40
7.	RESULTADOS .....	43
7.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	43
7.2	CENÁRIO .....	43
7.3	AVALIAÇÃO DAS MÉTRICAS .....	44
7.3.1	MOS .....	44
7.3.2	PSNR .....	46
7.3.3	SSIM .....	49
7.3.4	VQM .....	51
8.	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	53
8.1	CONTRIBUIÇÕES .....	54
8.2	DIFICULDADES ENCONTRADAS .....	54
8.3	TRABALHOS FUTUROS .....	55
9.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	56

## 1. INTRODUÇÃO

A crescente disseminação da informação através de meios digitais traz à tona novas realidades no cenário mundial. Usuários cada vez mais exigentes prezam por serviços que estejam disponíveis em qualquer lugar, a qualquer hora. Com isso, nos últimos anos o que se vê é uma “corrida” tanto por parte da indústria quanto da academia para o desenvolvimento de novas tecnologias de rede que possibilitem o acesso ubíquo e de alta velocidade com o intuito de dinamizar o processo de difusão do acesso às redes de comunicações, atrair um número maior de clientes e melhorar a qualidade de vida da população.

Nesse contexto, a tecnologia WiMAX surgiu como um padrão promissor e está ocupando cada vez espaço no fornecimento de serviços de banda larga, e não a toa é considerada uma das principais apostas para a próxima geração de redes sem fio. Além do forte apelo comercial principalmente no setor de telefonia, o WiMAX também tem sido bastante utilizada na criação de cidades digitais por órgãos governamentais que enxergam como uma solução atrativa para última milha o que possibilitará uma verdadeira capilarização e disseminação do acesso a banda larga através de projetos de inclusão digital, principalmente em locais mais afastados dos centros urbanos onde a precariedade ou inexistência do serviços de telecomunicação é mais evidente. No Brasil, um caso de sucesso desse tipo de projeto é o Navegapará<sup>1</sup>.

Além do fornecimento de infraestrutura, há uma necessidade de oferecer níveis de qualidade aceitáveis para as aplicações do tipo triple play constituídas por voz, dados e vídeo. As duas primeiras, hoje são consideradas aplicações sólidas e de certa forma, as operadoras oferecem suporte para utilização delas. É possível encontrar, por exemplo, planos de serviços que combinem o uso de ambas, com baixo custo. Por outro lado, transmissão de vídeo ainda é um desafio e é considerado o grande gargalo dos serviços de telecomunicações.

Dados do último relatório da Cisco (CISCO, 2011) apontam que em 2011 o tráfego proveniente das aplicações baseadas em vídeo irá ultrapassar 50% de todo conteúdo trafegando em dispositivos móveis, e a perspectiva é que em 2015 ultrapasse os 60 %. Dessa forma, torna-se evidente uma atenção especial para avaliação de desempenho para

---

<sup>1</sup>[www.navegapara.pa.gov.br](http://www.navegapara.pa.gov.br)

esse tipo de aplicação, uma vez que as operadoras enfrentam um quadro competitivo no qual os usuários exigem serviços de alta qualidade. Sem contar o setor corporativo onde os serviços de telecomunicações são de grande relevância para o sucesso dos negócios.

Atualmente, as metodologias que avaliam o desempenho de uma aplicação ou serviço se baseiam em Qualidade de Serviço (QoS), a própria tecnologia WiMAX apresenta como ponto forte o tratamento diferenciado para cada tipo de aplicação através de classes de serviço. Esse tipo de avaliação leva em consideração apenas informações da rede, desprezando um aspecto importante: a avaliação do usuário. Por conta disso, uma nova metodologia de avaliação conhecida como Qualidade de Experiência (QoE) vem sendo utilizada. Diferente da anterior, o QoE toma como base a percepção do usuário final para avaliação de desempenho, esta avaliação é feita através de duas abordagens: subjetiva e objetiva. Na primeira, um conjunto de usuários é responsável por fazer a avaliação das aplicações multimídias baseadas em regras definidas por órgãos de padronização internacionais. Já na segunda, o processo é feito através de métricas que utilizam métodos computacionais com o intuito de imitar a avaliação feita pelos usuários.

A metodologia tradicional baseada em QoS ainda é a mais usada uma vez que sempre foi utilizada devido a facilidade de informações obtidas no nível de rede, por outro lado avaliações baseadas em QoE, que tem despertado bastante interesse tanto da academia quanto da indústria, exige uma complexidade maior. Avaliar o nível de qualidade que o usuário recebe uma aplicação multimídia pode ser tornar um ponto chave para um novo modelo de negócio das operadoras de telecomunicações onde o fornecimento de serviços será baseado no também no nível de satisfação do usuário, e não somente no de rede como acontece normalmente.

Apesar das métricas de QoS influenciarem diretamente as de QoE, grande parte dos estudos realizados fazem análise isolada uma vez as métricas de ambas as abordagens tem focos diferente, como dito anteriormente. Enquanto que a primeira se baseia em informações da rede, a segunda utiliza as de usuário. Realizar uma análise levando em consideração ambas as metodologias pode representar uma avaliação mais completa, pois uma complementa a outra. Porém isso não é uma tarefa trivial por conta da grande quantidade de informações geradas, o que eleva o tempo para interpretação dos resultados. Para agilizar esse processo, o ideal seria o uso de técnicas de Inteligência Computacional (IC), que possibilitaria obter informações mais precisas como extração de padrões,

correlações entre as métricas e até mesmo realizar uma predição do comportamento futuro de um vídeo, por exemplo.

## 1.1 OBJETIVO

Esta dissertação visa e prever a Qualidade de Experiência em transmissões de vídeos na tecnologia WiMAX através do uso combinado de simulações e Redes Neurais Artificiais. Através dos diversos cenário e tipos de vídeos transmitidos na simulações, pretende-se montar uma base de dados para que seja feita a predição do comportamento futuro de um vídeo no nível de usuário, a partir de parâmetros do nível de rede. A ideia central é que tal metodologia possa identificar de que forma os parâmetros de QoS impactam no comportamento futuro de um determinado vídeo. Pretende-se realizar essa predição com o uso de RNA uma vez que com os dados repassados, esse tipo de técnica tem a habilidade de aprender comportamentos do ambiente e com isso realizar a predição.

## 1.2 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Este trabalho está estruturado da seguinte forma: no segundo capítulo serão apresentados os trabalhos encontrados na literatura que estão relacionados com a proposta desta dissertação. No terceiro capítulo, é apresentado a tecnologia WiMAX, seus principais padrões, funcionalidades e requerimentos mínimos exigidos para aplicações multimídias. O quarto capítulo a apresenta as metodologias de avaliação de desempenho baseada tanto em QoS quanto em QoE.

O quinto capítulo aborda as principais características de Redes Neurais serão. Enquanto no sexto é descrito todo o processo de desenvolvimento do trabalho, como as ferramentas utilizadas e suas principais funcionalidades, cenário proposto e geração da base de dados.

No sétimo será discutida a validação da proposta através dos resultados obtidos. E finalmente oitavo capítulo, são feitas as considerações finais demonstrando as contribuições do trabalho, dificuldades encontradas e trabalhos futuros.

## 2. TRABALHOS CORRELATOS

Nos últimos anos houve um esforço muito grande da academia e dos fabricantes no estudo do comportamento da tecnologia WiMAX tanto em cenários reais quanto em cenários simulados. Em Souza, et al. (2009), por exemplo, foram realizadas transmissões de vídeos na rede do projeto Navegapará usando o padrão IEEE 802.16d. Os autores elaboraram um *testbed* para avaliação de aplicação de Voz sobre IP (VoIP) na região amazônica. A distância entre a estação emissora e a receptora foi de aproximadamente de 14 km. Neste trabalho foram propostos dois cenários, no primeiro, foi utilizado um vídeo com resolução 320 x 240 e taxa de transmissão de 1128 Kbps, enquanto que no segundo a resolução do vídeo foi de 640 x 480 com taxa de 2041 Kbps. Os resultados demonstram a eficiência da tecnologia WiMAX através do MOS, cujo os valores foram de 3,5 e 4,5 para o primeiro e segundo cenário, respectivamente

Em uma abordagem semelhante à anterior, Sousa et al. (2008) realizou um conjunto de testes em que a qualidade de vídeo foi mensurada através das métricas MOS e PSNR. Os testes foram realizados com equipamentos, que diferente do trabalho anterior oferecia duas classes de serviço do WiMAX, BE e rtPS. Testes foram realizados sobre duas condições, no primeiro caso a rede foi configurada com recursos de largura de banda suficiente, enquanto que no segundo com largura de banda limitada. Os resultados mostraram que quando os recursos são substancialmente suficientes, a tecnologia apresenta um bom desempenho e conseqüentemente os requisitos das aplicações de vídeo são atendidas sem problemas para ambas as classes. Por outro lado, na segunda situação foi demonstrado que com recursos de largura banda limitados, o desempenho obtido em nível de QoE através da métrica MOS foi classificada como “ruim” para ambas as classes.

Os testes realizados em cenários reais apresentam resultados mais precisos porque levam em consideração aspectos/problemas do mundo real como interferências, alto fluxo de carga, dentre outros. Por outro lado, a utilização desta técnica apresenta como principal limitação o alto custo, que no caso do WiMAX se agrava pelo fato do preço dos equipamentos ser elevado quando comparadas com outros padrões mais populares como o IEEE 802.11. Além disso, muitos equipamentos disponíveis no mercado não implementam todas as funcionalidades recomendadas pelo WiMAX Fórum como foi o caso dos

equipamentos utilizados no trabalho realizado por Souza et al. (2009) que não utilizou classes de serviço.

Por conta disso, paralelo a implementações em cenários reais houve um esforço da academia para construção de simuladores que permitissem imitar as mesmas condições encontradas nos cenários reais e que atendessem as especificações do WiMAX Fórum, como é o caso do trabalho desenvolvido por Chen et al. (2006) que propôs um projeto e implementação utilizando a camada MAC baseada no padrão 802.16 para cenários ponto-multiponto do NS-2 (Network Simulator)<sup>2</sup>. Este foi um dos primeiros trabalhos da literatura a propor um módulo WiMAX para este simulador. Porém apresentava algumas limitações como o não suporte a classes de serviço e a não distinção entre estação base e estação cliente. Posteriormente, outros módulos foram desenvolvidos, como o do *Application Architecture Task Group* (AATG) (GROSH, 2006) e do *National Institute of Standards Technology* (NIST)<sup>3</sup>, ambos em conjunto com WiMAX Fórum<sup>4</sup>. Entretanto nenhuma das propostas oferecia suporte a classes de serviços, o que de certa forma vai de encontro a ideia central proposta pela tecnologia WiMAX que é oferecer QoS nativamente.

Diante das limitações encontradas nos simuladores supracitados, o trabalho proposto por Belghith, et al. (2008) propôs, com base a implementação feita pelo NIST, um módulo com suporte à classes de serviço UGS, BE e rtPS do WiMAX, bem como o gerenciamento de requerimentos de QoS *unicast* e mecanismo de contenção de requisição, e algoritmos de escalonamento para as classes implementadas. Nos resultados, os autores comprovaram a eficiência da proposta demonstrando que as classes implementadas estão de acordo com as recomendações especificadas pelo padrão IEEE 802.16.

Em Junior et al. (2009) é apresentada uma arquitetura que integra a tecnologia WiMAX com o protocolo IP e MPLS Móvel, e a partir disso um algoritmo é utilizado para prover *handover* transparente. A ideia central do trabalho é reduzir o impacto do no *handover* no QoS e consequentemente fazer com que o usuário tenha um percepção melhor de uma aplicação de vídeo. Para isso, o algoritmo antecipa o *handover* com base em informações recebidas pelo GPS (*Global Positioning System*) instalado no nó móvel que estima localização e velocidade de deslocamento. A partir dessas informações, o nó móvel

---

<sup>2</sup> The network simulator–ns-2. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>

<sup>3</sup> [http://www.nist.gov/itl/antd/emntg/ssm\\_seamlessandsecure.cfm](http://www.nist.gov/itl/antd/emntg/ssm_seamlessandsecure.cfm)

<sup>4</sup> [www.wimaxforum.org/](http://www.wimaxforum.org/)

categoriza os usuários do sistema em função do grau de mobilidade, assim como também a relação do sinal em relação à estação base.

Já Vishwanath et al. (2009) investigou a QoE em transmissão de vídeo sobre redes WiMAX também com o uso o simulador NS-2. A qualidade do vídeo foi mensurada usando a métrica PSNR, além desse outros parâmetros foram utilizados tais como: taxa de bits reservadas para o fluxo na estação base, a distância entre estação base e estação cliente, a modulação e mecanismo de codificação, e o atraso fim-a-fim tolerável dos pacotes. Nos resultados, os autores destacam vários *trade-offs* que existem entre esses parâmetros, nos quais podem ser efetivamente utilizados para gerenciar a experiência do telespectador na presença de variação de condições do canal e das limitações dos recursos sem fio.

Alguns trabalhos também propõem o uso de algoritmo para escalonamento de pacotes em redes WiMAX de múltiplos saltos, que otimiza a entrega de aplicações de vídeo, áudio e dados de acordo com as métricas de QoE, como é o caso do trabalho de Reis et al. (2010). A otimização foi realizada de forma multidimensional, o que minimiza a distorção total de todos os fluxos em relação aos recursos da rede. Além disso, são consideradas restrições sobre os fluxos, como largura de banda. A implementação também utilizou o NS-2, porém com a arquitetura em malha com o módulo NS-2 IEEE 802.16 MESH-MODE. Os resultados demonstraram que a técnica aplicada aumenta significativamente a qualidade percebida pelo usuário em relação às aplicações no cenário sem fio

Em Speranza et al. (2010) é investigado se modelos de avaliação objetiva podem ser igualmente precisos tanto espectadores especialistas, quanto não especialistas. Usuários de ambas as classes foram submetidos a testes subjetivos com sequências de vídeo de alta qualidade transmitidos com diferentes taxas codificados pelos codecs MPEG-2 e H.264. Os resultados indicaram que para a mesma sequência de vídeo, espectadores especialistas fornecem informações sobre a qualidade do vídeo menor que os não especialistas. A diferença, de avaliação, é pequena para vídeos de alta qualidade, porém torna-se mais acentuada quando a qualidade de vídeo degradado é mais visível, ou seja, em vídeos com baixa qualidade.

Mu et al. (2010) explora os requisitos essenciais para proporcionar uma garantia de QoE para aplicações multimídias no contexto das Redes de Distribuição de conteúdo

(CDN - *Content Distribution Networks*). Um novo framework de gerenciamento chamado *QoE-aware Real Time Multimedia Management (QoE2M)* foi proposto com intuito de fornecer um controle de qualidade fim-a-fim para aplicações multimídias de tempo real que operam sobre redes heterogêneas. A proposta tem como base fazer o controle através do uso combinado de avaliação de vídeo, aspectos QoS, procedimentos e adaptação baseados em mapeamentos de QoE.

Na validação do framework, o mapeamento e adaptação são selecionados dinamicamente de acordo com o melhor ajuste dos diferentes cenários e requerimentos. Além disso, o controle do tráfego “futuro” também pode ser facilmente integrado no framework através da sinalização de outras funções de acordo com as diretrizes dos aspectos de QoE. A segunda contribuição é a integração com o framework para avaliação de QoE, a fim de melhorar o apoio ao controle de qualidade de transmissões multimídias. Assim, a responsabilidade de gerenciamento da rede migrou da ideia: “entregar a grande maioria dos pacotes para o destino com melhor esforço” para “reconhecimento, avaliação e distribuição de conteúdo para garantir a experiência do usuário final e da eficiência de utilização de recursos de rede”.

Alguns trabalhos também investigam a correlação entre QoS e QoE. Em Kim e Choi (2010) é apresentado um modelo matemático de correlação entre os modelos de avaliação para aplicações do tipo IPTV. A ideia é fornecer uma metodologia para que os provedores de serviços possam prever a qualidade da aplicação no nível de usuário através de parâmetros de QoS, e a partir disso poder deduzir quais métricas (jitter, perda, atraso e etc) causam um maior impacto na qualidade do usuário.

Riker et al.(2011) propôs um método híbrido de predição de QoE (HyQoE) que permite fazer a avaliação de uma sequência de vídeo e correlacionar os resultados com resultados obtidos com testes subjetivos. Para tal, foi construída uma ferramenta que recebe como entrada um conjunto de parâmetros relacionados ao vídeo como qualidade e características de codificação. O HyQoE é baseado em estatística de aprendizado utilizando Redes Neurais Randômicas o qual foi treinada com uma base de dados gerado através de simulações realizadas no NS-2 para tecnologia 802.11 no modo *mesh*.

Os resultados demonstram que o HyQoE apresenta uma aproximação maior com o MOS quando comparado com as demais métricas como PSNR, SSIM e VQM, porém o erro obtido é muito acentuado para uma metodologia de predição que exige uma

proximidade maior. Além do mais, o fato da metodologia utilizar, em parte, uma abordagem subjetiva para geração da base de dados, impede que os resultados obtidos sejam utilizados em sistemas de tempo real, uma vez que para cada conjunto de testes realizado, é necessária uma nova bateria de avaliação com expectadores.

No início do desenvolvimento desta dissertação o módulo proposto por Belghith, et al. (2008) foi o mais completo encontrado na literatura para o simulador NS-2. Diante disso, optou-se pela sua utilização. Como exposto anteriormente, tal módulo apresenta significativas melhorias em comparação aos propostos por Chen et al. (2006), AATG e NIST, principalmente pela inserção de classes de serviço propostas pelo WiMAX. Por outro lado, a avaliação realizada leva em consideração apenas aspectos de QoS em que avaliação é analisada sob “o ponto de vista da rede”, deixando de lado um importante aspecto que é a avaliação feita pelo usuário final (QoE).

Nos trabalhos relatados, é possível observar que as pesquisas cujo foco são QoS e QoE em redes WiMAX utilizando cenários reais apresentam limitações decorrente da falta de funcionalidades recomendadas pelo padrão, que não são inseridas pelos fabricantes para baratear o preço dos equipamentos. Por outro lado, em cenários simulados, o levantamento demonstra que houve um avanço considerável nos últimos anos e que hoje já é possível realizar simulações utilizando grande parte das funcionalidades propostas na padronização como é o caso do trabalho proposto por Belghith, et al. (2008).

Entretanto, observa-se que são escassos trabalhos que utilizam técnicas de Inteligência Computacional (IC) para auxiliar na interpretação dos resultados e predizer a qualidade do vídeo recebida pelo usuário com base em parâmetros do nível de rede, principalmente utilizando o padrão WiMAX como é proposto nesta dissertação. No levantamento realizado, com exceção do trabalho de Riker et al. (2011), os demais encontrados ora investigam a correlação de métricas de QoS em QoE através de modelos matemáticos (KIM, CHOI, 2010) ora propõem a garantia de QoE através do controle baseado no uso combinado de aspectos de QoS e outros procedimentos de rede (MU et al., 2010), mas sem a utilização de técnicas de IC.

### 3. TECNOLOGIA WIMAX

#### 3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo apresenta características do padrão IEEE 802.16. É feita uma descrição sucinta dos principais padrões da família e das camadas MAC e PHY que são responsáveis por funcionalidades nativas desta tecnologia como o suporte a Qualidade de Serviço. No final do capítulo são sumarizados os requisitos definidos para cada tipo de aplicação, com ênfase nas do tipo multimídia.

#### 3.2 PADRÃO 802.16

O padrão IEEE 802.16, também conhecido como IEEE Wireless MAN, é o nome usado para redes metropolitanas sem fio e que foi a base para o padrão WiMAX, acrônimo para *World Interoperability for Microwave Access*. A proposta, desde o princípio de criação do padrão foi disponibilizar o acesso a banda larga sem fio com altas taxas de transferências, alcançando longas distâncias (superiores a 50 km) tanto para transmissão de dados, quanto de aplicações multimídias (IEEE Wireless MAN, 2006). E, sem a necessidade dos altos investimentos em infraestrutura como é exigido na implantação de tecnologias tradicionais como DSL (*Digital Subscribe Line*) que além do fator custo, tem a limitação de alcance. Por conta disso, a proposta desse padrão se apresenta como solução atrativa para o problema de “última milha” principalmente pela redução dos custos e do tempo de implantação.

O primeiro padrão da família IEEE 802.16 surgiu em Dezembro de 2001, cuja versão final foi ratificada em Abril de 2002 (IEEE Std 802.16-2001, 2002). Inicialmente o padrão operava entre 10 – 66 GHz na faixa de frequência o que exigia uma linha de visada de direta (LOS – *Line of Sight*). Neste modo, a topologia utilizada era de ponto-multiponto (PMP – *Point-to-Multipoint*), uma vez que o tráfego ocorria de uma estação base (BS – *Base Station*) para as estações clientes (SS – *Subscribe Station*).

Posteriormente, em Janeiro de 2003, foi aprovado o padrão IEEE 802.16a que passou a operar de 2 a 11 GHz (IEEE Std 802.16a-2003, 2003). Essa diminuição da faixa de frequência permitiu que o WiMAX pudesse operar sem a necessidade de linha de visada direta (NLOS – *Non Line of Sight*) entre a BS e a SS. Essa nova característica, impulsionou o uso do padrão, uma vez que a partir de então se tornou uma solução apropriada para o

acesso a banda larga sem fio em ambientes urbanos, que são constituídos de obstáculos como árvores e prédios. Porém, somente em 2004, foi publicada a versão que é utilizada hoje (IEEE Std 802.16-2004,2004) a qual reuniu todas as características supracitadas em uma única versão. Este padrão obteve mais êxito, sendo a mais utilizada pela maioria dos fabricantes, e que também será o foco desta dissertação. Além do padrão fixo supracitado, em Janeiro de 2006 foi padronizado o padrão móvel da tecnologia WiMAX, conhecida como IEEE 802.16e (IEEE Std 802.16e-2005, 2006).

Em suma, a tecnologia WiMAX agrega funcionalidades importantes para o acesso a banda larga em redes sem fio, pois permite alcançar distâncias superiores à 50 Km em condições de LOS e cerca de 5 Km em condições de NLOS. Além disso, oferece suporte a mobilidade. A Figura 3.1, apresenta a topologia e arquitetura de uma rede WiMAX. Nela estão presentes BSs, repetidores, SSs que está conectada a uma rede externa que pode ser ATM (*Asynchronous Transfer Mode*), SONET (*Optical Network*), dentre outras.

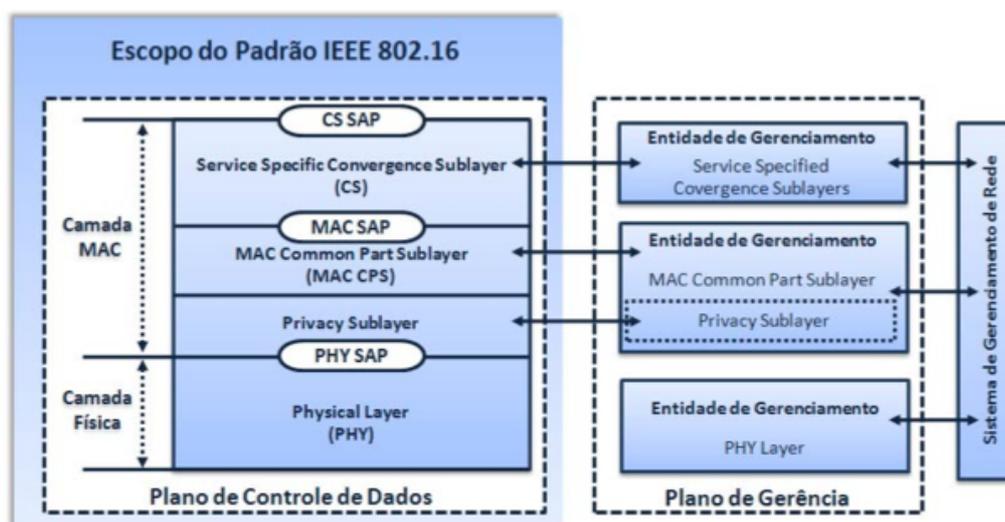


**Figura 3.1. Topologia WiMAX**

### 3.3 PADRÃO IEEE 802.16 – 2004

Como dito anteriormente, esta dissertação terá como foco o padrão IEEE 802.16 – 2004 que está apresentado na Figura 3.2. Nela está especificada a interface aérea para frequência de até 66 GHz como também a camada de enlace de dados (MAC – *Media Access Control*) e múltiplas camadas físicas (PHY). Tais camadas, de acordo com o

modelo OSI (*Open Systems Interconnection*), estão subdivididas em três subcamadas: subcamada de convergência específica, subcamada de parte comum e subcamada de segurança. Maiores detalhes sobre tais camadas serão descritas com mais detalhes adiante nas subseções seguintes.



**Figura 3.2. Pilha de protocolo do IEEE 802.16**

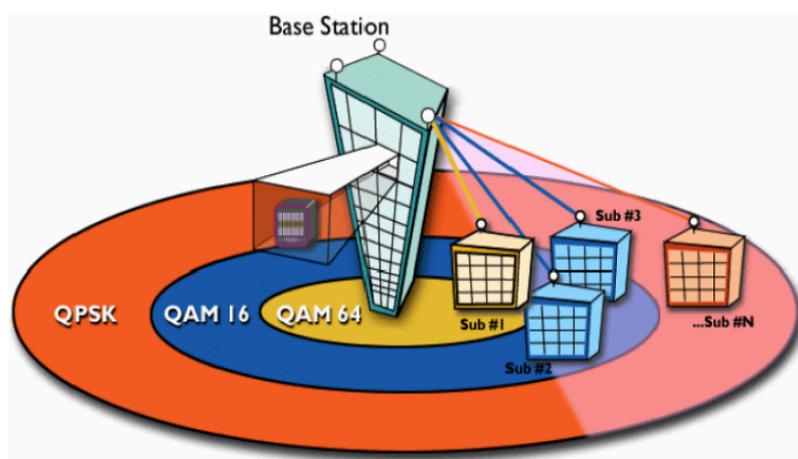
### 3.4 CAMADA FÍSICA

Para atingir o objetivo principal da tecnologia, fornecer máxima largura de banda, alcançando longas distâncias e com alta confiabilidade de transmissão, o padrão IEEE 802.16 faz uso combinado de diversas tecnologias na camada física, a saber: *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM), *Time Division Duplexing* (TDD), *Frequency Division Duplexing* (FDD), *Quadrature Phase Shift Keying* (QPSK), *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM). O uso destas permitiu que o padrão IEEE 802.16 obtivesse um grande avanço para o uso nas redes metropolitanas sem fio (IEEE Std 802.16-2004,2004). As características principais da camada física podem ser mais bem compreendidas quando são analisadas as especificações das diferentes interfaces suportadas, o que será feito em seguida.

#### 3.4.1 WIRELESS MAN-SC

Esta especificação da camada física é em *Single Carrier* (SC) e foi projetada para trabalhar na faixa de frequência 10-66 GHz em transmissões do tipo PMP e exige a necessidade de operação no modo LOS (IEEE Std 802.16-2004, 2004). Além disso,

permite também a utilização de vários perfis de transmissão adaptativos ou modulação é codificação adaptativa (AMC – *Adaptive Coding and Modulation*). O AMC disponibiliza três tipos de modulações diferentes: QAM-64, QAM-16, QPSK. A escolha de uma modulação está condicionada à qualidade do enlace. Nos casos onde se deseja qualidade do enlace elevada, o perfil escolhido é o QAM-64. Onde os enlaces requerem estabilidade e qualidade da conexão, o perfil ideal é o QPSK e para enlaces onde há possibilidade de atenuação de sinal é utilizado o QAM-16. Esse sistema de perfil também leva em conta a distância da SS até a BS. SS's que estiverem mais longe da BS, utilizarão o esquema de modulação QPSK, SS's que estiverem a uma distância mediana da BSs, utilizarão o esquema QAM-16 e para as SSs que estiverem a uma distância mais curta, o esquema a ser aplicado será o QAM-64. Na Figura 3.3 estão exemplificados os tipos de modulações disponíveis



**Figura 3.3. Diagrama de Modulação Adaptativa do IEEE 802.16**

Outra característica da camada física é de permitir o ajuste individual dos parâmetros de transmissão, para cada estação, quadro por quadro. O *uplink* é baseado na combinação *Time Division Multiple Access* (TDMA) e *Demand Assigned Multiple Access* (DAMA). O *downlink* é o *Time Division Multiplexing* (TDM), fazendo o broadcast da informação que possuem como destino um mesmo setor.

No Wireless MAN-SC os dois métodos de duplexação que podem utilizados são o FDD e o TDD. O FDD suporta *full-duplex* e *half-duplex* pelo fato de utilizar duas frequências distintas, e assim cada uma pode usar modulações diferentes. No TDD o quadro possui tamanho fixo o que possibilita o ajuste do tamanho do quadro destinado ao

*downlink* e ao *uplink*. Um mapeamento de *downlink* é enviado pela BS no início do subquadro com o objetivo de identificar a localização dos slots de tempo destinados a uma SS. Este mapeamento mostra com exatidão o momento em que os dados para uma determinada conexão estão sendo aguardados. A alocação dos *timeslots* no *downlink* é solicitada pela estação base.

Para que o TDD trabalhe de forma correta, é necessário que haja uma sincronização dos quadros tanto na BS quanto na SS. Porém este é um grande problema, já que o atraso em decorrência da propagação faz com que os quadros sejam recebidos no destino após um certo intervalo de tempo. Para lidar com isto, é necessário que a SS inicie a transmissão dos seus slots de tempo no subquadro *uplink* de forma antecipada.

#### 3.4.2 WIRELESS MAN-SCA

É também baseada em transmissão SC, mas foi projetada para operar em frequências abaixo de 11 GHz em modo NLOS (IEEE Std 802.16-2004,2004). Semelhante a anterior, também suporta tanto a duplexação TDD quanto FDD e o mecanismo de modulação adaptativa AMC. Para *uplink* é utilizada a tecnologia TDMA, em outras palavras, a troca de informações entre as estações cliente e a estação base é realizado através do acesso múltiplo por divisão de tempo. Enquanto que para o *downlink* há suporte para TDMA ou TDM. Nesse caso, na troca de informações entre a BS e as SS. Essas melhorias na estrutura de quadros visam contornar as limitações decorrentes do meio de transmissão instável NLOS

#### 3.4.3 WirelessMAN-OFDMA

Utiliza o modelo de modulação *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) com um número de 2048 subportadoras e opera em frequências abaixo de 11 GHz. A grande quantidade de subportadoras acarreta em um aumento nas requisições de sincronização, tornando mais lento o *Fast Fourier Transform (FFT)* (IEEE Std 802.16-2004, 2004). Dentre esses e outros motivos, esta interface não tem despertado grande interesse o que tem ocasionado certo desinteresse por parte dos fabricantes.

### 3.4.4 WirelessHUMAN

O Wireless HUMAN, que significa *Wireless High Speed Unlicensed Metro Area Network*, é similar as outras especificações citadas acima, sendo que esta é direcionada para dispositivos e bandas não licenciadas, que em inglês são chamados de *Unlicensed National Information Infrastructure* (UNII). Para duplexação, apenas o TDD é suportado. A Tabela 3.1 sumariza as principais características dos padrões desta camada.

**Tabela 3.1. Características da Camada Física**

<b>Padrão</b>	<b>Topologia</b>	<b>Modo de Operação</b>	<b>Faixa de Frequência</b>	<b>Tipos de Duplexação</b>
Wireless MAN-SC	Ponto a Ponto	LOS	10-66 GHz	TDD, FDD
Wireless MAN-SCa	Ponto a Ponto	NLOS	2-11 GHz	TDD, FDD
WirelessMAN OFDM	Ponto-Multiponto	NLOS	2-11 GHz	TDD, FDD
WirelessMAN OFDMA	Ponto-Multiponto	NLOS	2-11 GHz	TDD, FDD
WirelessHUMAN	Ponto-Multiponto	NLOS	2-11 GHz	TDD

Das interfaces aéreas supracitadas, o padrão baseado em OFDM 256 portadoras (MAN OFDM) é o mais adequado para operar em ambientes sem linha de visada uma vez que o processo de equalização para sinais multiportadoras trabalha de forma mais simples. Todos os perfis definidos pelo WiMAX Fórum especificam as 256-portadoras OFDM-PHY.

Esse padrão oferece como principais vantagens: (i) FFT mais rápida; (ii) menor sincronização de frequências quando comparadas as 2048-portadoras MAN-OFDMA sem fio; (iii) a taxa de transferência pode ser definida de acordo com as condições do ambiente (urbanos ou rurais); (iv) maior eficiência devido ao espaçamento de canal reduzido (sobreposição de portadoras ortogonais) e como desvantagem principal: (i) maior sensibilidade de fase e desvios de tempo e frequência.

Para que o padrão IEEE 802.16 fosse utilizado em grande escala não foi definida uma largura de banda de canal fixa. Ela pode ser um inteiro múltiplo de 1.25 MHz, 1.5 MHz e 1.75 MHz não podendo ultrapassar os 20 MHz. Já com relação às distâncias dos

enlaces, variam dentre outros fatores, com a faixa de frequência utilizada, o ambiente, condições de propagação e ganho das antenas. Em cenários NLOS as distâncias variam entre 5 e 8 Km, enquanto que para transmissão com LOS o alcance fica entre 25 e 30 Km (IEE Std 802.12-2004, 2004 ).

### 3.5 CAMADA MAC

Desde o desenvolvimento do padrão IEEE 802.16, a camada MAC foi projetada para suportar taxas muito altas de transmissão (até 75 Mbps), e ao mesmo tempo oferecer QoS. A ideia da camada MAC é de suportar tanto tráfego contínuo quanto em rajadas. Para isso, o WiMAX-MAC usa um MPDU (*MAC PDUs - Protocol Data Units*) de comprimento variável e oferece bastante flexibilidade para permitir a eficiência de sua transmissão. Por exemplo, vários MPDUs de tamanhos iguais ou diferentes podem ser agregados em uma única rajada para proteger a camada PHY de sobrecarga. Do mesmo modo os MSDUs (*MAC SDU - Service Data units*) podem ser concatenados, a partir do mesmo serviço da camada superior, em uma única MPDU para salvar cabeçalhos MAC genéricos (EKLUND, et al., 2002).

Por outro lado, grandes MSDUs podem ser fragmentadas em pequenas MPDUs e enviadas em vários frames. Cada quadro MAC é prefixado com um cabeçalho MAC genérico (GMH - *Generic MAC Header*) que contém um identificador de ligação (CID), o comprimento do *frame*, e bits para qualificar a presença de CRC (checagem cíclica de redundância), sub-cabeçalhos, e se o *payload* é codificado e em caso afirmativo, com que chave isso é feito. O pacote de carga MAC é um transporte ou uma mensagem de gerência.

WiMAX MAC também suporta ARQ (*Automatic Repeat Request*), que pode ser utilizado para solicitar a retransmissão de MSDUs desfragmentados e MSDUs fragmentados. O comprimento máximo do quadro é 2.047 bytes, representado por 11 bits na GMH

#### 3.5.1 MECANISMOS DE ACESSO AO CANAL

No WiMAX, a camada MAC na BS é a responsável pela atribuição de largura de banda para todos os usuários, tanto em *uplink* como em *downlink* (EKLUND, et al., 2002). A única vez que o SS tem algum controle sobre a alocação de banda é quando ele tem várias sessões ou conexões com a BS. Nesse caso, a BS aloca largura de banda para o SS

no agregado, até que a SS divida entre as múltiplas conexões. Todas as outras programações no *downlink* e no *uplink* são feitas pela BS. Para o *downlink*, a BS pode alocar largura de banda para cada SS, com base nas necessidades de tráfego futuro, sem envolver a SS. Para o *uplink*, as alocações têm de ser baseadas em pedidos do SS.

O padrão WiMAX suporta vários mecanismos pelos quais uma SS pode solicitar e obter conexão banda larga. Dependendo dos parâmetros QoS e do tráfego associado a um serviço, um ou mais destes mecanismos podem ser utilizados pelo SS. A BS aloca recursos dedicados ou compartilhados periodicamente a cada SS, que pode utilizar para solicitar largura de faixa. Esse processo é chamado de *polling* e pode ser feito tanto individualmente (*unicast*) quanto em grupos (*multicast*). No caso do primeiro, o processo é feito quando há largura de banda insuficiente para nomear cada SS individualmente. Enquanto que no segundo o slot alocado para fazer requisição de banda é compartilhado, onde todos os SS indicados tentam usar.

WiMAX define um mecanismo de contenção acesso e de resolução para o caso, quando mais de uma SS tenta utilizar o slot partilhado. Se ele já tem uma alocação para o envio de tráfego, a SS não é escolhido. Em vez disso, é permitido requisitar mais largura de banda das seguintes formas: (i) transmitindo uma única requisição de MPDU na largura de banda; (ii) enviando um pedido de banda utilizando a variação de canal; ou (iii) adicionando uma requisição de banda nos pacotes MAC genéricos.

### 3.5.2 QUALIDADE DE SERVIÇO

O Suporte a QoS é uma das principais funções do esquema da camada MAC do WiMAX que é obtido usando uma arquitetura MAC orientada à conexão, onde todas as conexões de *downlink* e *uplink* são controladas pelo serviço da BS. Antes de qualquer transmissão de dado acontecer, a BS e a SS estabelecem uma ligação lógica unidirecional, chamado de conexão, entre os dois pares de camada MAC. Cada ligação é representada por um identificador de conexão, que serve como um endereço temporário para transmissões de dados sobre o link específico. Além de ligações para transferir dados do usuário, o WiMAX MAC define três gerenciamentos de conexões: a básica, a primária, e as conexões secundárias

Os fluxos de serviços podem ser criados através de um sistema de gerenciamento de rede ou criados dinamicamente através de mecanismos de sinalização definidos no

padrão. A BS é responsável pela emissão do SFID e o mapear para um único CID. Esses fluxos também podem ser mapeados para pontos de código Diff Serv (*Differentiated Services*) ou rótulos de fluxo MPLS (*Multi Protocol Label Switching*) para fornecer QoS baseado em IP fim-a-fim.

Para suportar uma grande variedade de aplicações, o WiMAX define cinco classes serviços que devem ser apoiados pelo escalonador da MAC da estação base para transporte de dados em uma conexão, abaixo segue uma descrição sucinta de cada classe(IEEE Std 802.16-2004, 2004):

- **Unsolicited Grant Services (UGS)** - Concessão de serviços não requisitados: Suporta pacotes de dados com tamanho fixo, a uma taxa constante de bits (*CBR – Constant Bit Rate*). Exemplos de aplicações que podem utilizar este serviço são emulação T1/E1 emulação e VoIP sem supressão de silêncio. Os parâmetros de fluxos serviços obrigatórios que definem este serviço são: taxa máxima de tráfego sustentada, máxima latência, *jitter* tolerado, e política de requisição/transmissão;
- **Real-time polling Services (rtPS)** - Serviço de *Polling* em tempo não real: Este serviço é concebido para suportar *streams* de dados tolerantes a atrasos, tais como um FTP, que requisitam dados de tamanho variável concedidos a uma taxa mínima garantida. Os parâmetros obrigatórios de fluxo de serviço que definem este serviço são: mínima taxa de tráfego reservada, taxa máxima de tráfego sustentada, prioridade de tráfego, política de requisição/transmissão. O serviço oferece *polls unicast* sobre uma base regular, o que assegura que o fluxo receba oportunidades de pedido, mesmo durante o congestionamento de rede;
- **Best-effort (BE)**- Serviço de Melhor Esforço: Este serviço é concebido para suportar fluxos de dados, tais como a consulta Web, que não requerem uma garantia mínima de nível de serviço. Os parâmetros obrigatórios de serviços de fluxo para definir este serviço são taxa máxima sustentada de tráfego, o tráfego prioritário, e política de requisição/transmissão. Ou seja, o objetivo do melhor esforço (BE) é o de prestar serviço eficiente para o melhor esforço de tráfego;
- **Extended Real-Time Variable Rate (ERT-VR) Service** - Serviço de Extensão em tempo real de taxa variável: Este serviço destina-se a apoiar aplicações em

tempo real, tais como VoIP com repressão de silêncio, que têm taxas de dados variáveis, mas exigem garantia de taxa de dados e de atraso. Este serviço é definido apenas no IEEE 802.16e-2005(IEEE Std 802.16e-2005, 2006), não estando no IEEE 802.16-2004(IEEE Std 802.16-2004, 2004). Também é referido como Serviço de *Polling* de Tempo Real Estendido (ErtPS).

### 3.6 APLICAÇÕES MULTIMÍDIAS NO WIMAX

O WiMAX Fórum definiu dois tipos de aplicações de tráfego: *background* e *foreground*. O primeiro é caracterizado como tráfego que não é gerado, diretamente, pela interação com o usuário. Ao contrário, o segundo é essencialmente gerado pela interação do usuário com o sistema/aplicação (WiMAX Fórum, 2007), esse tráfego engloba as principais aplicações multimídias, com as de *vídeo streaming*. A Tabela 3.2 demonstra os requerimentos mínimos a serem alcançados nas aplicações.

**Tabela 3.2. Requerimentos mínimos para aplicações no WiMAX**

<b>Tipo de Aplicação</b>	<b>Largura de Banda</b>	<b>Delay</b>	<b>Jitter</b>	<b>Perda de Pacotes</b>
Jogos Interativos	50 – 85 kbps	< 150 ms	< 100 ms	0%
VoIP& Vídeo Conferência	4- 384 Kbps	< 150 ms	< 50 ms	< 1%
Streaming	5 Kbps a 2 Mbps	Não especificado	< 100ms	< 1 % para áudio e < 2 % para vídeo
Navegação Web & Mensagem Instantânea	10 Kbps a 2 Mbps	Não especificado	Não especificado	0%

Os valores apresentados são os requerimentos mínimos definidos e recomendados pelo WiMAX Fórum para propiciar uma boa qualidade nas aplicações. No entanto, esses valores não podem ser vistos como uma regra rígida, uma vez que algumas aplicações podem ter requisitos diferentes devido alguma necessidade específica da aplicação. Por exemplo, para redes sem fio a perda recomenda para transmissão de vídeo é de até 1%, porém utilizando com compressão com o codec MPEG-4 esse tipo de aplicação pode trabalhar com uma taxa de perda de pacotes de até 5% sem que os usuários notem grandes danos ao vídeo transmitido. Os vídeos utilizados nesta dissertação são comprimidos com

este codec, na seção seguinte estão descritas algumas características desse tipo de codificação.

### 3.6.1 TIPOS DE FRAMES

O codificador MPEG possui três tipos de *frames*: I, P e B (GREENGRASS, EVANS, BEGEN, 2009):

- **Frames I (*Intracoded frames*):** São frames codificados isoladamente. Em outras palavras, aproveitam-se apenas da redundância espacial, não utilizando nenhum outro quadro para redução da redundância temporal. São os quadros mais importantes porque carregam um número maior de informações e que conseqüentemente necessitam de um número maior de bits para compressão.
- **Frames P (*Predicted frames*):** Esses frames fazem a predição do frame a ser codificado de um frame I ou P precedentes aproveitando-se da redundância temporal, conseguindo assim, prover um bom nível de compressão. Estes tipos de frames podem ser utilizados em seqüência, mas estas são evitadas para não ocasionar a propagação de erros devidos à estimativa de movimento, pois se um bloco possui um determinado erro e esse bloco é utilizado como referência para a codificação de outro bloco, o erro será então propagado ele. Para evitar estes problemas utilizam-se frames I periodicamente. Frames P possuem um poder de compressão que varia de 20 a 70% do tamanho do frame I associado.
- **Frames B (*Bi-directional predicted frames*):** São tipos de frames criados também de forma preditiva tanto de frames I como P, a diferença está no fato deste tipo de frame poder usar referência bidirecional, ou seja, de frames ainda não codificados, tanto frame I como frames P. Possui poder de compressão de 5 a 40% do tamanho do frame I associado.

Estes frames estão organizados em um GoP (*Group of Picture*). Como está demonstrado na Figura 3.4, eles contem um *frame* I e todos os *frames* subsequentes até o próximo *frame* I, do qual se pode classificar um GoP de acordo com o seu tamanho ou também pelo número de *frames* B entre *frames* P. A interdependência dos *frame* está ilustrada na Figura 3.5.

I<sub>1</sub> B<sub>2</sub> B<sub>3</sub> P<sub>4</sub> B<sub>5</sub> B<sub>6</sub> P<sub>7</sub> B<sub>8</sub> B<sub>9</sub> P<sub>10</sub> B<sub>11</sub> B<sub>12</sub> P<sub>13</sub> B<sub>14</sub> B<sub>15</sub> I<sub>New GOP</sub>

Figura 3.4. Estrutura de um GOP

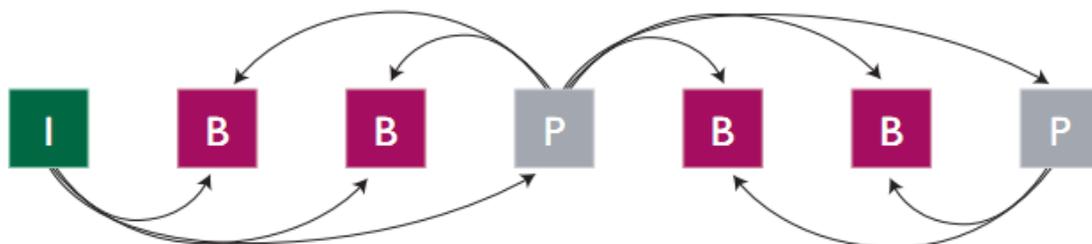


Figura 3.5 - Estrutura de Referência dos quadros dentro de um GOP

## 4. MÉTRICAS DE QUALIDADE DE SERVIÇO E QUALIDADE DE EXPERIÊNCIA

### 4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo apresentará as principais métricas de avaliação de desempenho tanto baseadas em informações da rede (QoS) quanto de usuário (QoE). Será discutido as principais características de cada abordagem com uma atenção especial para métricas de QoE.

### 4.2 MÉTRICAS DE QUALIDADE DE SERVIÇO

Oferecer níveis aceitáveis de QoS é um fator importante, principalmente quando os recursos de rede são escassos. Isso é se torna mais evidente em aplicações multimídias como VoIP e transmissão de vídeo que são sensíveis ao atraso, e toleram pequenas perdas. Exemplos de métricas que são utilizadas para alcançar um melhor gerenciamento de fluxo são: perda, atraso e *jitter*. Abaixo segue a descrição de cada uma delas.

#### 4.2.1 PERDA

A perda de pacotes causa um impacto direto no desempenho de aplicações principalmente multimídias como. Quando essa perda é elevada, o nível de qualidade da aplicação fica prejudicado, podendo até ocasionar a interrupção da transmissão. Tais perdas podem estar relacionadas aos seguintes fatores (KUROSE, ROSS, 2010): limitação de dispositivos de rede, erros de transmissão e descarte por parte dos usuários.

#### 4.2.2 ATRASO

O atraso é outra métrica que pode afetar o nível de qualidade de uma aplicação. Como foi apresentado na Tabela 3.2 cada tipo de aplicação possui uma tolerância de atraso, sendo que para aplicações multimídias atrasos altos podem levar os usuários ao descontentamento (KUROSE, ROSS, 2010):

#### 4.2.3 JITTER

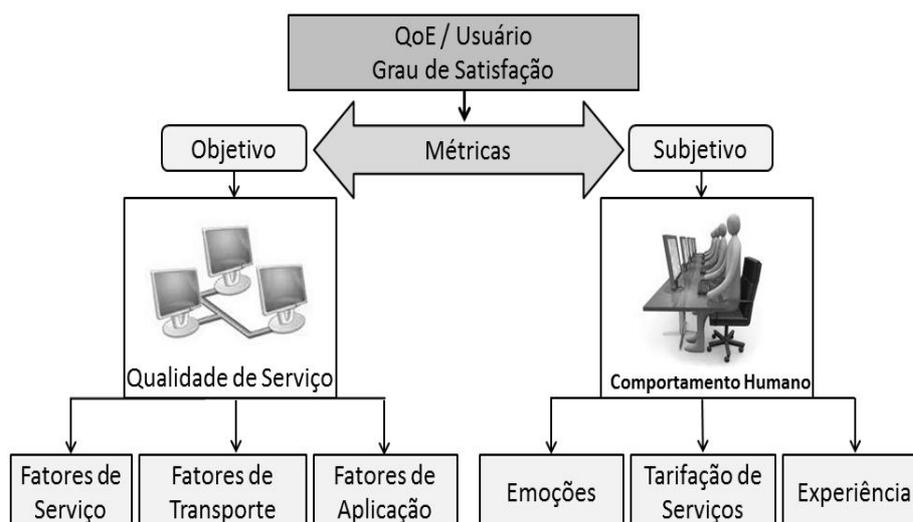
O *jitter* é uma variação estatística da taxa de intervalo entre chegadas de pacotes (GREENGRASS, EVANS, BEGEN, 2009). Um dos principais motivos dessa variação é

ocasionado pelas filas formadas nos equipamentos de rede. O número de pacotes na fila varia com certa frequência, isso faz com que o atraso também sofra uma variação. Uma variação é muito acentuada causa prejuízos na transmissão de aplicações multimídias, pois os decodificadores recebem os pacotes em uma taxa constante.

### 4.3 QUALIDADE DE EXPERIÊNCIA

Grande parte das avaliações atuais realizadas sobre aplicações multimídias se baseiam em técnicas tradicionais de QoS. Porém, o grande problema dessa técnica está relacionado ao fato da avaliação ser feita levando em consideração apenas o ponto de vista da rede, deixando de lado, dentre outros fatores, a qualidade percebida pelo usuário.

A fim de suprir a lacuna deixada pelas avaliações baseadas em QoS, surgiu um novo tipo de técnica de avaliação conhecida com Qualidade de Experiência (QoE) (TAKAHASHI, HANDS, BARRIAC, 2008). Diferente das de QoS, que se baseiam apenas em parâmetros da rede, métricas de QoE são usadas para mensurar como o usuário percebe a aplicação. O processo de avaliação baseado em QoE pode ser feito tanto de forma subjetiva, quanto objetiva. A Figura 4.1 demonstra a principal diferença entre as abordagens. A subjetiva é baseada na opinião de usuários e inclui, dentre outro fatores, emoções, serviços e experiência. Enquanto a objetiva tenta modelar a percepção humana através de algoritmos baseados em informações da rede, transporte e fatores de aplicação.



**Figura 4.1. Abordagem objetiva e subjetiva**

A análise de qualidade em dados multimídia vem sendo estudada por alguns grupos de pesquisa, como é o caso do *Video Quality Experts Group* (VQEG), que faz parte do ITU-T (*International Telecommunication Union*), cujas pesquisas se concentram na análise de modelos de avaliação objetiva perceptual com intuito de definir métodos que possam ser utilizados para representar fielmente uma análise subjetiva (VQEG, 2000), e do ETSI STQ (*European Technical Committee for Speech, Transmission, Planning, and Quality of Service*) (ETSI, 2011). Nas seções seguintes serão descritas mais detalhadamente as abordagens objetiva e subjetiva.

#### 4.3.1 ABORDAGEM SUBJETIVA

A abordagem mais precisa para se avaliar a qualidade de um vídeo é a avaliação subjetiva, porque não há melhor indicador do que o concedido pelos seres humanos. Porém, o índice de qualidade dado por um ser humano depende de diversos fatores como experiência em avaliação, o próprio humor no momento da avaliação, dentre outros.

Os métodos de avaliação subjetiva se baseiam em técnicas definidas por padrões internacionais, como a ITU-T. Há normas específicas para cada área de atuação, a saber: televisão a cabo, broadcast, aplicações multimídias, dentre outras. Além disso, nelas estão recomendações que devem ser seguida em cada etapa da análise, seja na configuração do ambiente, escolha dos avaliadores, metodologia de testes e etc. Existem algumas normas específicas para avaliação de vídeo de forma subjetiva. As mais utilizadas são a BT.500 da ITU (ITU, 2000) e a P.900 também da ITU (ITU, 2008)

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 (ou mais de um), interpretá-lo e atribuir uma nota de acordo o nível de qualidade. Esta nota obedece a uma escala de valores pré-determinada, que dependendo do objetivo da avaliação podem ser previamente descrita aos avaliadores. O resultado do teste é medido através do *Mean Option Score* (MOS) onde o nível de qualidade de uma sequência de vídeo varia na escala de 1 a 5, onde 5 é o melhor valor possível, como demonstra a Tabela 4.1.

**Tabela 4.1. Valores do MOS**

<b>MOS</b>	<b>Qualidade</b>	<b>Dano ao vídeo</b>
5	Excelente	Imperceptível
4	Bom	Perceptível
3	Razoável	Levemente Razoável
2	Pobre	Irritante
1	Ruim	Muito irritante

Ainda que essa abordagem de avaliação seja a mais precisa, demanda muito mais tempo para sua execução, pois requer um grande número de avaliadores o que eleva os custos e investimentos. Além disso, a dependência humana no momento da avaliação impede que a abordagem subjetiva seja utilizada repetida vezes e de forma automática em sistemas de tempo real. Maiores detalhes de avaliação subjetiva podem ser encontradas em (DARONCO, 2009). Por outro lado, os resultados das técnicas que utilizam abordagem objetiva são obtidos de uma maneira muito mais simples. Em seguida, a abordagem objetiva será descrita com maiores detalhes.

#### 4.3.2 ABORDAGEM OBJETIVA

Diferente da abordagem subjetiva, a objetiva dispensa a interação humana para visualização e avaliação dos vídeos. Tal técnica faz uso de algoritmos e modelos matemáticos computacionais para mensurar as características do vídeo ou para fazer uma previsão, aproximada, da qualidade observada pelos seres humanos (EDEN, 2008). Essas técnicas, além de facilitar o processo de avaliação, diminuem tanto o tempo da análise, quanto os custos.

Outra vantagem da abordagem objetiva é que depois de implementada, tende a ser muito mais simples que a aplicação de uma metodologia subjetiva, pois, basicamente a análise é feita através da execução de um aplicativo que tenha acesso aos vídeos degradados e aos originais, o restante do processo ocorre de forma automatizada. Métodos objetivos também podem possibilitar outras aplicações da análise de qualidade, como, por exemplo, a adaptação dinâmica de uma transmissão multimídia de acordo com a qualidade que está sendo obtida pelo receptor.

As técnicas objetivas utilizam artifícios matemáticos e computacionais para tentar fazer uma análise mais próxima o possível da percepção humana, também conhecida como

técnicas perceptuais. Elas são desenvolvidas em função da baixa correlação existente entre os resultados de técnicas objetivas simples e a qualidade realmente percebida pelos seres humanos.

Algumas métricas objetivas foram desenvolvidas para estimar ou prever o nível de qualidade vídeo streaming de acordo a percepção do usuário. Dentre elas está o PSNR (*Peak Signal to Noise Ratio*) que é medido em uma escala logarítmica e depende do MSE (*Mean Square Error*). O cálculo do MSE é realizado através da soma das diferenças quadráticas de todos os *pixels* da imagem original e da imagem processada, que esta sendo avaliada. O resultado, é dividido pelo número de *pixels* totais, como pode ser visto na Equação 4.1.

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [(f(i,j) - F(i,j))]^2}{M \times N} \quad (4.1)$$

Onde  $f(i,j)$  é o valor de cada *pixel* na imagem original,  $F(i,j)$  é o valor do *pixel* na imagem avaliada,  $M$  é número de linhas, e  $N$  o número de colunas do quadro. O MSE sempre possui valor positivo e seu valor mínimo é zero, o que significa que as duas imagens são iguais. A partir do MSE o PSNR pode ser obtido pela Equação 4.2

$$PSNR_{dB} = 10 \log_{10} \frac{(2^n - 1)^2}{MSE} \quad (4.2)$$

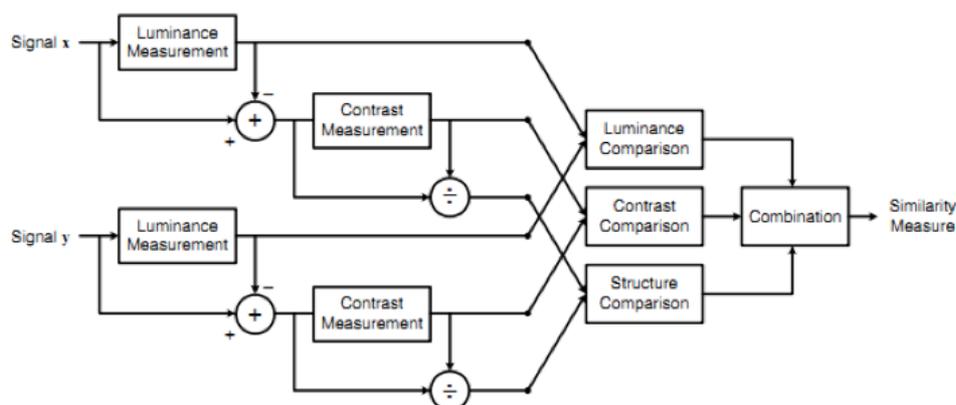
Onde  $(2^n - 1)^2$  representa o quadrado do maior valor possível de sinal na imagem,  $n$  é o número de bits de cada imagem. O PSNR também pode ser usado para mapear valores do MOS, conforme descrito na Tabela 4.2.

**Tabela 4.2. Mapeamento do PSNR para o MOS**

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

Além do PSNR, há outras métricas nesta abordagem. A métrica SSIM (*Structural*

*Similarity Index*) faz a avaliação *frame a frame* dos componentes cor, luminosidade e estrutura, e os combina em único valor chamado de índice (*index*) como é visto na Figura 4.2 ( WANG et al., 2004). Assim, a SSIM leva em consideração aspectos que refletem com mais prioridade como o sistema de visão humana extrai informações das imagens ou vídeos. O índice do SSIM é dado em um escala de 0 a 1, onde 1 representa a maior qualidade, e consequentemente quanto mais perto de 0, pior será a qualidade do vídeo.



**Figura 4.2. Funcionamento do SSIM**

Já a métrica VQM (*Video Quality Metric*) define um conjunto de modelos computacionais que buscam avaliar a qualidade de um vídeo com o uso dos parâmetros de distorção de cor, distorção de *pixels*, ruído e nível “embassamento” do vídeo. Os vídeos original e processado são passados como entrada, e a partir de então é verificado o nível de qualidade baseado na percepção do olho humano e aspectos de subjetividade (REVÉS et al., 2006). Os valores dos resultados de avaliação VQM variam de 0 e 5, onde 0 é o melhor valor possível.

Há ainda outras métricas para avaliação objetiva, a saber: *Moving Picture Quality Metric* (MPQM) (LAMBRECHT, VERSCHEURE, 1996), *Perceptual Evaluation of Video Quality* (PEVQ, 2010).

### 4.3.3 AVALIAÇÃO BASEADA EM REFERENCIA

Outra forma de classificação das métricas de QoE é quanto a quantidade de informação disponível no momento da transmissão e avaliação que é chamado de referência do vídeo original. A classificação pode ser *Full Reference* (FR), *Reduced Reference* (RR) e *No Reference* (NR).

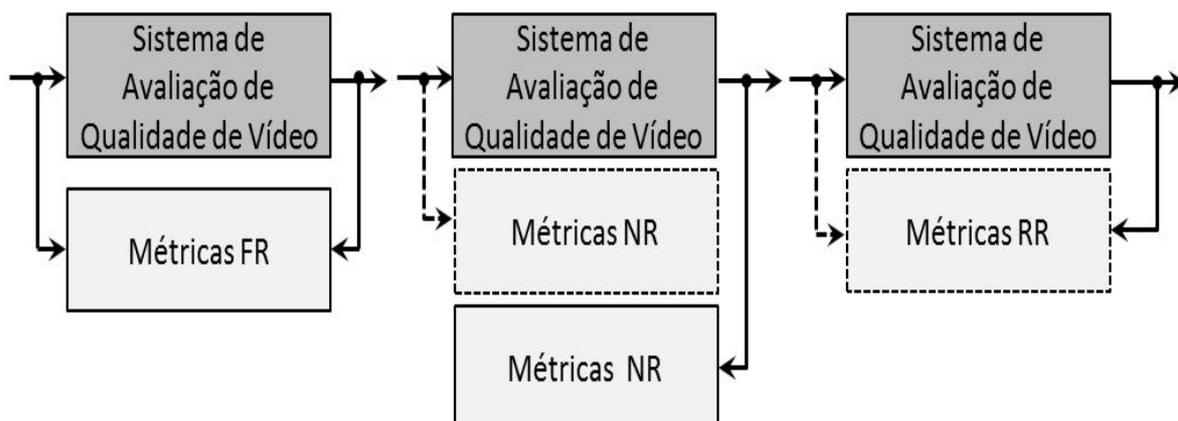
Na abordagem FR há um acesso ilimitado na sequência do vídeo original. Esta abordagem faz uso do vídeo de referência para prever o nível de qualidade do vídeo processado, comparando a diferença entre de cada pixel na imagem do vídeo distorcido com o correspondente pixel do vídeo original (CARNEC, CALLET, BARBA, 2003). Isto faz com que haja, em geral, uma qualidade superior na avaliação de desempenho de um vídeo. Por outro lado, a abordagem FR dificilmente é utilizada sistemas de rede em tempo real porque sempre requer a sequência original da comparação em questão durante o processo de avaliação, o que nem sempre é possível. Das métricas apresentadas na seção anterior, PSNR e SSIM são classificadas como FR.

Para serviços de tempo real, métricas baseadas em RR e NR geralmente são mais indicadas. Diferente da abordagem FR, na abordagem RR são necessários apenas parâmetros ou características de multimídia durante o processo de avaliação, como informações sobre movimento do vídeo. O conjunto de parâmetros de referências pode ser transmitido com fluxo multimídia ou através de um canal secundário. O objetivo da abordagem RR é ser tão preciso quanto o FR, porém fazendo uso de menos recursos de rede e de processamento (CARNEC, CALLET, BARBA, 2003). Um exemplo de métrica que utiliza abordagem RR é a VQM.

Já a abordagem NR tenta avaliar a qualidade de um serviço multimídia distorcido sem ter qualquer informação do conteúdo original. Esta abordagem é geralmente utilizada quando o método de codificação é conhecido. Métricas baseadas em NR podem ser usadas em operações de serviços de monitoramento/diagnósticos de redes quando a sequência multimídia original não esta disponível. Porém a abordagem NR apresenta alguns problemas, tais como: (i) baixa correlação com MOS; (ii) auto consumo de recursos de memória e CPU; (iii) limitação de tempo.

Há ainda outra abordagem híbrida que faz uso combinado das técnicas descritas anteriormente. A principal razão para o desenvolvimento deste tipo de abordagem é permitir que os operadores de rede pudessem combinar os benefícios das abordagens anteriores e ajustar complexidade, desempenho e viabilidade, bem como para ajustar questões de custo operacional de acordo com necessidades diferentes, tipo de conteúdos multimídia, redes e equipamentos (ROMANIAK, et al., 2008).

A Figura 4.5 ilustra graficamente as diferenças entre as abordagens FR, RR e NR. A híbrida não é demonstrada pelo fato de fazer combinação das demais.



**Figura 4.3. Avaliação baseada em referência**

## 5. REDES NEURAIAS

### 5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo serão apresentadas as principais funcionalidades da técnica de Inteligência Computacional (IC) conhecida como Redes Neurais que foi utilizado para a predição de qualidade de vídeo no trabalho.

### 5.2 CARACTERÍSTICAS

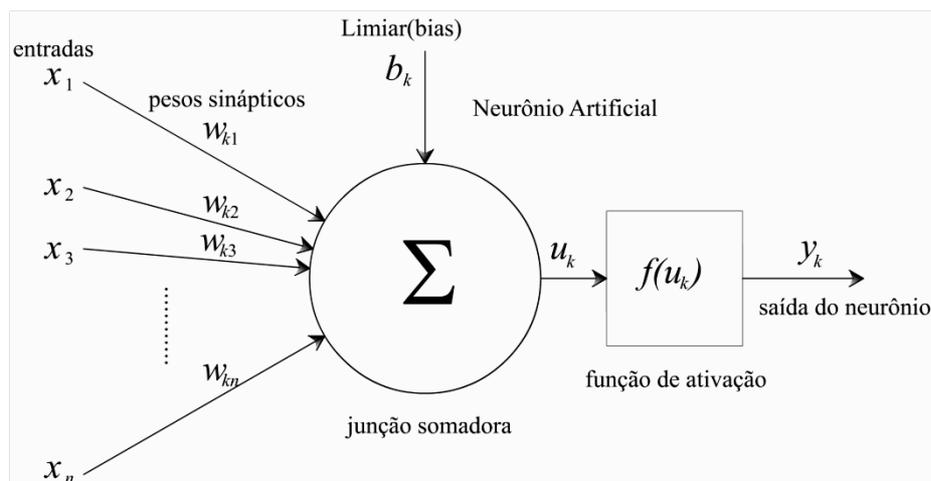
As Redes Neurais Artificiais (RNAs) são sistemas de processamento paralelo e distribuído, constituídos por unidades de processamento simples interconectadas entre si. Apresentam um modelo matemático inspirado na estrutura cerebral, se assemelhando ao cérebro biológico em alguns aspectos (HAYKIN, 2001):

- O conhecimento é adquirido pela rede a partir de seu ambiente através de um processo de aprendizagem;

Na sua forma mais geral, uma rede neural é uma máquina que é projetada para modelar a maneira como o cérebro realiza uma tarefa particular ou função de interesse; a rede é normalmente implementada utilizando-se componentes eletrônicos ou é simulada por programação em um computador digital (HAYKIN, 2001).

As RNAs podem ser utilizadas na resolução de uma grande classe de problemas encontrados em várias áreas aplicadas, tais como: (i) classificação, (ii) identificação, (iii) diagnóstico, (iv) análise de sinais e de imagens, (v) otimização e (vi) controle e previsão de situações futuras. As RNAs têm se mostrado de fácil implementação, são robustas no tratamento de dados com ruído e eficientes, especialmente em problemas onde não há uma formulação analítica ou não existe um conhecimento explícito acessível ou o próprio problema modifica-se com o tempo.

Uma RNA é formada por neurônios, que são as unidades de processamento fundamentais para a operação de uma rede neural. O diagrama de blocos apresentado na Figura 5.1 mostra o modelo de um neurônio, que forma a base para o projeto de redes neurais artificiais.



**Figura 5.1. Modelo de um neurônio genérico**

Este neurônio é composto basicamente por: (i) um conjunto de sinapses ou elos de conexão; (ii) um somador para que uma adição dos sinais de entradas sejam ponderados pelas respectivas sinapses dos neurônios; (iii) Uma função de ativação para restringir a amplitude da saída de um neurônio e (iv) um bias aplicado externamente.

### 5.2.1 ARQUITETURA DA REDE

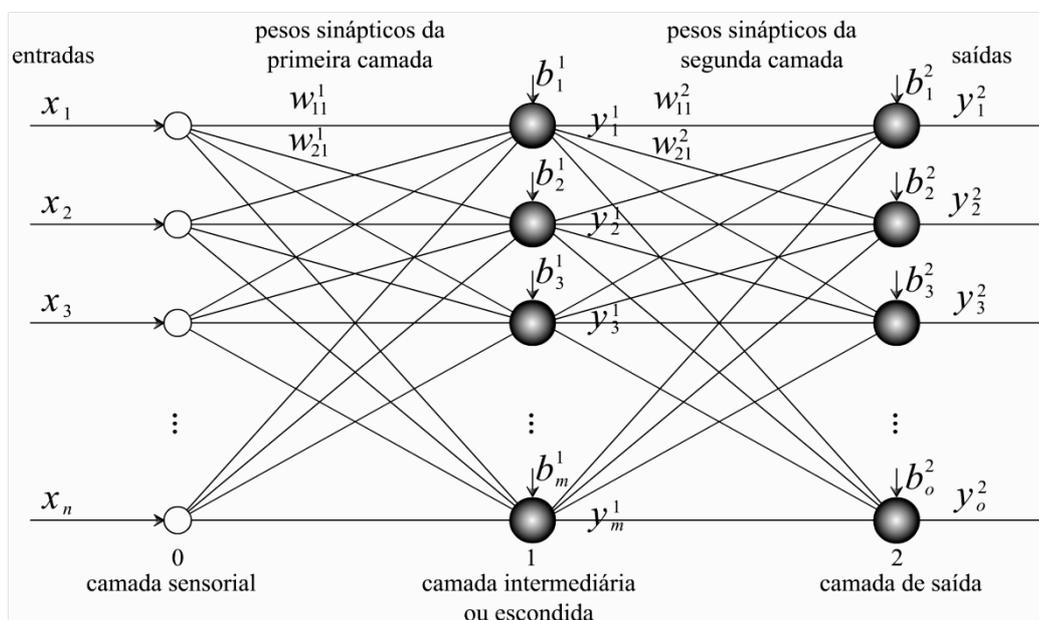
A forma como estão dispostos os neurônios define a arquitetura da rede. A arquitetura da rede está intimamente ligada com o algoritmo de aprendizagem usado para treiná-la. A arquitetura da rede é um aspecto de suma importância em sua concepção, pois esta irá definir a sua funcionalidade, e assim, será restrita ao problema que a rede pode vir a ser aplicada, por exemplo, uma RNA contendo apenas uma única camada, somente é possível tratar problemas lineares.

A arquitetura da rede é definida por um conjunto de parâmetros onde constam: número de camadas, número de neurônios que geralmente é diferente em cada camada, tipo de conexão entre os neurônios e topologia da rede (BERCI, 2008).

Em geral, é possível identificar três classes de arquitetura de rede fundamentalmente diferentes: Rede *Feed forward* com uma única camada, Redes *Feed forward* de Múltiplas Camadas (MLP - *Multi-Layer Perceptron*) e Redes Recorrentes.

No caso desta, dissertação se aplicada uma rede MLP, logo uma atenção em especial será dada a este tipo de arquitetura. Estas são uma extensão do modelo de uma única camada, onde camadas intermediárias são inseridas entre as entradas e a camada de

saída. A camada intermediária, ou escondida, é responsável por aumentar a capacidade de processamento da rede, tornando-a apta a tratar não mais apenas problemas lineares, ampliando significativamente a sua gama de aplicações. A Figura 5.2 ilustra uma MLP contendo uma camada intermediária.



**Figura 5.2 Rede MLP com uma camada intermediária.**

Esse tipo de arquitetura tem uma grande expressão na área de redes neurais, devido à sua capacidade de aproximar qualquer função contínua que encaixe em um hipercubo unitário, como é evidenciado com base no teorema da aproximação universal (CYBENKO, 1989). Essa capacidade torna a rede capaz de resolver uma vasta gama de problemas, como a estimação de séries temporais, aproximação de curvas e a classificação de padrões.

### 5.3 APRENDIZAGEM

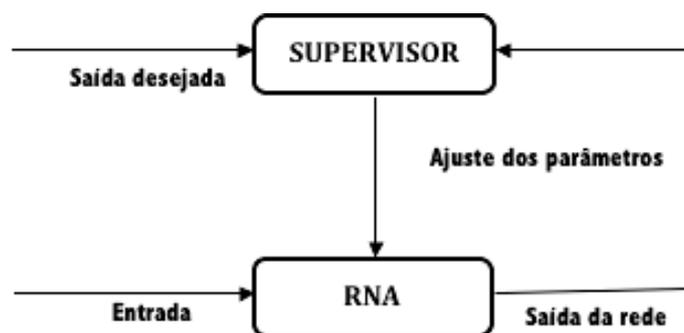
A propriedade de importância primordial para uma rede neural é sua habilidade de aprender a partir de seu ambiente, ou seja, através de exemplos. O aprendizado ocorre através de um processo iterativo de ajustes aplicados aos parâmetros da rede, pesos sinápticos e níveis de bias, onde em cada iteração, idealmente, a rede se torna mais instruída. O tipo de aprendizagem realizada é definido pela maneira como esses ajustes dos parâmetros ocorrem.

Com as diversas arquiteturas propostas para redes neurais artificiais, surgiram também vários métodos de treinamento, que se dividem em dois grandes paradigmas de

aprendizagem: Aprendizagem Supervisionada e Aprendizagem Não-Supervisionada. Nas subseções seguintes será visto com mais ênfase o primeiro paradigma, por ser o utilizado nessa dissertação.

### 5.3.1 APRENDIZAGEM SUPERVISIONADA

A ideia básica deste paradigma de aprendizado é o ajuste dos parâmetros da rede com base em um conjunto de exemplos de entradas e saídas desejadas, que são apresentadas à rede por um dispositivo supervisor. A saída desejada representa a ação ótima a ser realizada pela rede neural. Esse supervisor apresenta as entradas para a rede, que por sua vez, responde com uma saída calculada com base em seus parâmetros atuais. Ao supervisor cabe então comparar a saída da rede com a saída desejada, resultando em um valor de erro, e realizar um ajuste incremental nos parâmetros da rede, definido por algum método de aprendizagem. A Figura 5.3 ilustra de forma simplificada o processo de treinamento supervisionado.



**Figura 5.3. Paradigma de aprendizagem supervisionada**

O supervisor deve ser capaz de avaliar a qualidade da resposta apresentada pela rede para uma entrada conhecida, podendo ser utilizado o critério do erro médio quadrático (ver Equação 5.1) para a saída desejada e a observada para a rede neural. O erro médio quadrático é definido como segue:

$$E = \frac{1}{n_e} \sum_{i=1}^{n_e} (y(i) - y^{tre}(i))^2 \quad (5.1)$$

Onde  $y^j$  é a saída do  $j$ -ésimo neurônio da última camada da rede neural, calculada para uma entrada  $x^{tre}(i)$ .

Portanto, a tarefa do supervisor no treinamento supervisionado é minimizar o erro  $E$  através do ajuste dos parâmetros livres da rede. Para tanto, é necessário que sejam

conhecidas amostras de entrada da rede ( $x^{tre}$ ) e amostras de saídas esperadas para essas entradas ( $y^{tre}$ ). Essa coleção de amostras de entrada e saída ( $x^{tre}$ ,  $y^{tre}$ ) expressa o comportamento que é desejado da rede, e sua escolha adequada é considerada um fator crítico, exigindo experiência e observação, pois dados pouco representativos do ponto de vista global do problema não irão gerar resultados satisfatórios, independentemente do método de treinamento escolhido e do algoritmo utilizado.

Existem inúmeros algoritmos para o treinamento supervisionado de redes neurais, sendo os exemplos mais conhecidos o algoritmo *Backpropagation* e o *Levenberg-Marquardt*. Cada um desses algoritmos apresenta suas próprias características, que podem torná-los preferíveis em determinada aplicação. Esses algoritmos serão vistos com mais detalhes adiante.

O processo de aprendizado de redes neurais artificiais, apresenta uma dinâmica com relação aos incrementos aplicados aos parâmetros livres e a apresentação dos dados à rede. Essa dinâmica se dá geralmente de duas formas distintas: (1) on-line, onde o treinamento é realizado imediatamente após a apresentação de cada uma das amostras; (2) treinamento em lote, onde todas as amostras da coleção são apresentadas a rede e o vetor gradiente é calculado para cada uma dessas amostras e devidamente armazenado para que, no final do processo, seja calculado um vetor gradiente médio para atualização dos parâmetros da rede (HAYKIN, 2001) (BRAGA, CARVALHYO, LUDEMIR, 2000).

O vetor contendo todos os valores dos pesos sinápticos após o treinamento representa o conhecimento adquirido pela rede e está associado à sua capacidade de generalização. Entende-se por capacidade de generalização de uma rede neural o poder de calcular com precisão uma saída, a partir de valores de entrada nunca apresentados durante o processo de treinamento.

Há ainda o aprendizado não-supervisionado onde não existe a figura do supervisor ou saídas desejadas. Esse tipo de rede utiliza os neurônios como classificadores, e os dados de entrada como os elementos para classificação, não existe uma saída desejada.

#### 5.3.1.1 O algoritmo Backpropagation

Por muitos anos não se teve um algoritmo eficiente para treinar redes MLP. Desde que as redes de uma única camada se mostraram limitadas naquilo que poderiam

representar e, portanto, no que poderiam aprender, o desenvolvimento de modelos cognitivos deixou de ser um campo atraente e poucas pesquisas foram realizadas na área.

O algoritmo *Backpropagation*, proposto por Werbos (WERBOS, 1974), (PARKER, 1985) e Rummelhart (RUMELHART, HILTON, WILLIAMS, 1986) com diferentes propósitos, fez ressurgir o interesse em redes neurais artificiais, sendo o algoritmo de aprendizado mais largamente utilizado (MÁSSON; WANG, 1990) (REFENES,1993).

Ao se apresentar a uma rede neural não treinada um determinado padrão de entrada e o respectivo padrão de saída, uma saída aleatória é produzida. A partir da saída produzida pela rede é calculado um erro, representando a diferença entre o valor obtido e o desejado. O objetivo consiste, então, em reduzir continuamente o erro até um determinado valor aceitável. Isto é alcançado pelo ajuste dos pesos entre as conexões dos neurônios, pela aplicação da regra Delta Generalizada, que calcula o erro para alguma unidade particular e propaga esse erro para a camada anterior. Cada unidade tem seus pesos ajustados de modo a minimizar o erro da rede.

A regra de modificação dos pesos para um determinado padrão xv é dada pela Equação 5.2:

$$\Delta_p w_{i,j} = \eta \delta_{v,i} \theta_{v,i} \quad (5.2)$$

Onde o termo  $\eta$  representa uma constante de proporcionalidade, também conhecida como taxa de aprendizado. O termo  $\delta_{v,i}$  representa a diferença entre a saída alvo e a saída da rede (erro local da unidade  $j$  para o padrão xv). É esse o termo que será retropropagado para as camadas anteriores e será calculado utilizando-se o algoritmo do gradiente descendente. E, por fim, o termo  $\theta_{v,i}$  é a saída produzida pela rede para o padrão xv na conexão  $i$ .

A minimização do erro no algoritmo *Backpropagation* é obtida pela execução do gradiente descendente na superfície de erros do espaço de pesos, onde a altura para qualquer ponto no espaço de pesos corresponde à medida do erro. O ajuste dos pesos inicia nas unidades de saída, onde a medida do erro está disponível, e procede com a retropropagação desse erro entre as camadas, ajustando os pesos até que a camada das unidades de entrada tenha sido processada. Para as unidades de saída, como são

conhecidos os valores desejados e obtidos, o ajuste dos pesos sinápticos é relativamente simples. Já para as unidades das camadas ocultas, o processo é não trivial.

Intuitivamente, nota-se que as unidades ocultas que apresentarem erros grandes devem ter suas conexões bastante alteradas, enquanto que a mudança nos pesos daquelas que tiverem suas saídas muito próximas das desejadas deverá ser pequena. Desta forma, os pesos para um neurônio particular devem ser ajustados na proporção direta ao erro da unidade de processamento a qual está conectado. Essa é a razão pela qual a retropropagação dos erros através da rede permite o correto ajuste dos pesos sinápticos entre todas as camadas do modelo conexionista.

Assim, o algoritmo *Backpropagation* possui duas fases bem identificadas: A primeira fase é a responsável pelo processo de treinamento da rede. É onde ocorre o ajuste dos pesos das conexões entre os neurônios. A segunda fase representa a validação da fase anterior, ou seja, é onde ocorre a verificação se o treinamento foi satisfatório através da comparação de saídas geradas pela rede com valores reais.

## 6. METODOLOGIA

### 6.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

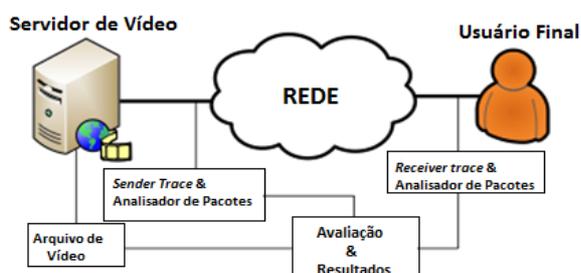
A metodologia utilizada para geração da base de dados envolveu o uso combinado de um conjunto de ferramentas. A ideia deste capítulo é descrever as principais características de cada ferramenta e as etapas seguidas para obtenção dos resultados.

### 6.2 FERRAMENTAS UTILIZADAS

#### 6.2.1 EVALVID

O Framework Evalvid foi utilizado para transmissão e análise dos vídeos. Uma das principais motivações para o uso desse framework é a possibilidade de reconstrução do vídeo transmitido para que seja uma comparação com a qualidade com o vídeo original, mesmo que alguns frames tenham sido perdidos durante a transmissão,

Mais detalhes sobre o funcionamento do framework podem ser encontrados em (KLAUE, RATHKE, WOLISZ, 2009). A Figura 6.1 ilustra o processo de funcionamento da ferramenta. Na primeira etapa a codificação do vídeo é realizada, então é gerado um arquivo de trace da sequência a ser transmitida de um servidor para o usuário final. No momento em que a transmissão está em execução, do lado do emissor é realizada a coleta de informações (frame, atraso, perda e *jitter*). Estas são salvas em um arquivo de texto chamado “*sender trace*”. O processo análogo é realizado do lado do receptor onde o arquivo “*receiver trace*” grava todas as informações referentes à sequência de vídeo recebida. A partir disso, reconstruído do lado do receptor e uma comparação com a sequência original transmitida é realizada para que sejam obtidos os valores tanto de QoS quanto de QoE.

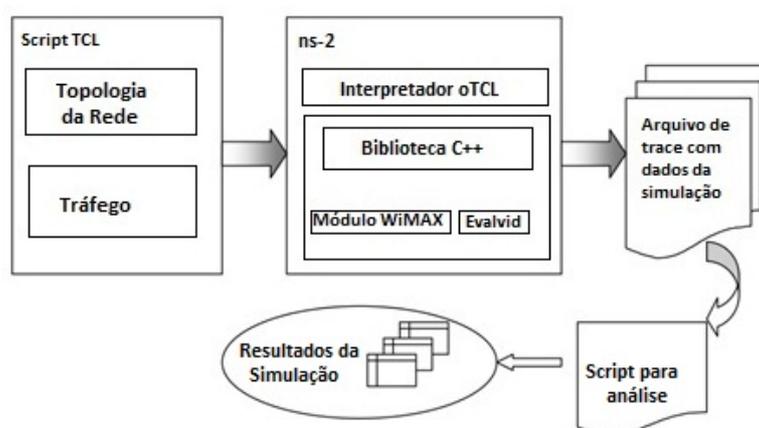


**Figura 6.1. Funcionamento do Evalvid**

## 6.2.2 NETWORK SIMULATOR

O *Network Simulator* (NS-2) é uma ferramenta bastante utilizada para a simulação de redes comutadas por pacote. Este simulador foi desenvolvido pelo VINT (*Virtual Network Testbed*)<sup>5</sup> em cooperação DARPA (*Defence Advanced Research Projects Agency*)<sup>6</sup>, Universidade Berkeley<sup>7</sup> e outros. O NS-2 oferece um substancial suporte para simulação do protocolo TCP, roteamento e protocolos da camada MAC, tanto em redes cabeadas quanto sem fio. Além do mais, o simulador é grátis e seu código fonte é aberto, o que permite aos usuários realizarem modificações no código de acordo com sua necessidade.

A Figura 6.2 demonstra a estrutura do NS-2 e também as adaptações realizadas para o propósito desta dissertação. Como pode ser observado, a ferramenta utiliza as linguagens C++ e OTCL (*Object-oriented Tool Command Language*). O OTCL é utilizado para construção dos scripts de simulação, nele estão contidas informações como topologia da rede (números de estações bases e estações clientes) e os agentes de tráfego que posteriormente são executados pelo interpretador oTCL. Já na biblioteca C++ estão contidos todos os detalhes do núcleo do simulador, como protocolos. No núcleo também são adicionados módulos desenvolvidos separadamente pela comunidade acadêmica. No caso deste trabalho, foram adicionados a versão 2.29 do ns-2 o módulo WiMAX desenvolvido por Belghith, et al. (2008) e o framework Evalvid, ambos descritos anteriormente.



**Figura 6.2. Ilustração do Funcionamento do Evalvid**

<sup>5</sup> <http://comet.columbia.edu/genesis/netbind/testbed/>

<sup>6</sup> <http://www.darpa.mil/>

<sup>7</sup> <http://berkeley.edu/>

Quando o simulador é finalmente executado, os dados gerados durante o processo de simulação são gravados em arquivos de trace. Nele estão contidas informações sobre os pacotes: *timestamp*, tipo, tamanho, pacotes enviados, recebidos e perdidos. Para se obter resultados confiáveis, é recomendado que haja um grande número de simulações com diversos cenários, o que conseqüentemente gera um grande volume de dados em decorrência das informações gravadas nesses arquivos. Por conta disso, foi desenvolvido um script para auxiliar no tratamento do grande volume de traces gerado.

### 6.2.3 WEKA

O WEKA<sup>8</sup> (*Waika to Environment for Knowledge Analysis*) é um software desenvolvido pela Universidade de Waikato. Ele contém uma coleção de algoritmos de “*Machine Learning*” para tarefas de mineração de dados que oferece suporte para pré-processamento, regressão, regras de associação, predição e outros. Sua distribuição é feita de acordo com *General Public Licence* (GPL) o que torna o seu uso livre. Os algoritmos podem ser aplicados diretamente a um ‘*data set*’ ou chamados através de um programa feito na linguagem Java. Ele também tem uma API geral, assim é possível incorporar ao software tarefas de mineração de dados automatizadas no lado do servidor.

Neste trabalho o WEKA foi utilizado para aplicação da técnica de Rede Neural aplicada sobre a base de dados. Grande parte da documentação disponível para ferramenta é no formato de tutorial, por isso aqui foi feita apenas uma descrição sucinta.

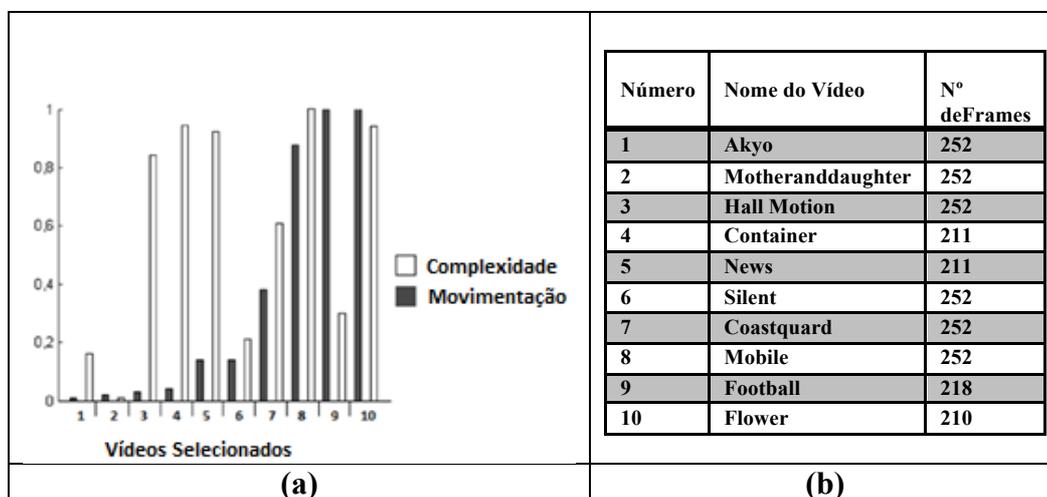
## 6.3 VIDEOS UTILIZADOS

Para que haja uma semelhança com situações encontradas no mundo real, é aconselhável que se utilize vídeos com diferentes características (nível de complexidade e movimentação), isso permitirá que a análise realizada leve em consideração diferentes comportamentos tanto da rede quanto dos vídeos. É possível obter o nível de movimentação de um vídeo através da diferença entre os frames. Já estimativa de complexidade poder ser calculada com base no algoritmo proposto no ITU-T 2000 (RIKER, et al., 2011). Dos 10 vídeos mostrados na Figura 5.3 (a), foram selecionados o 2, 5 e 9 que são correspondentes aos vídeos *mother*, *news* e *footbal* da Figura 6.3 (b), respectivamente. O critério utilizado para essa escolha levou em consideração a diferença

---

<sup>8</sup> <http://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/>

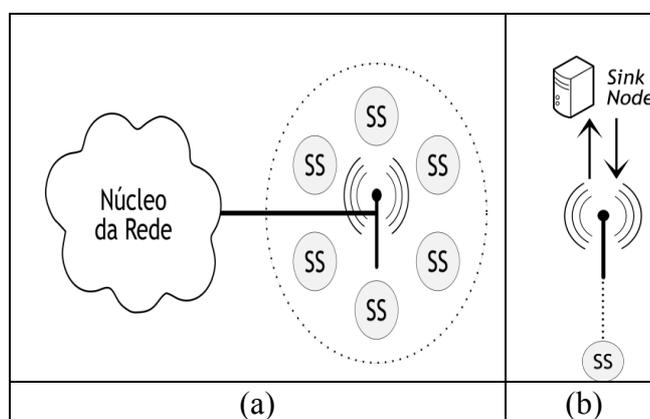
de características encontradas em cada vídeo. Na escala mostrada na Figura 6.3 (a), nota-se uma grande diferença tanto no nível de movimentação quanto de complexidade, principalmente nos vídeos 2 e 9.



**Figura 6.3 - Vídeos Selecionados**

#### 6.4 CENÁRIO PROPOSTO

Para se analisar o comportamento de determinada aplicação em uma rede, ainda que a metodologia utilizada seja feita através de simulação, é necessário que o cenário utilizado seja o mais próximo possível das implementações reais. Assim, nesta dissertação procurou-se seguir os padrões especificados pelo WiMAX Fórum para realização dos testes. A Figura 6.4 (a) demonstra o exemplo de um *setup* WiMAX. Nele, há varias estações clientes no raio de cobertura da estação base que está ligado ao núcleo da rede. Dos diversos tipos de análises possíveis, o foco aqui é avaliar a transmissão de vídeo de um servidor de conteúdo conectado a estação base para uma estação cliente, e simultaneamente outras estações transferindo outros tipos de fluxo, Figura 6.4 (b).



**Figura 6.4. Cenário Proposto**

As SSs foram configuradas com as classes rtPS, BE e UGS. Porém, como neste trabalho a aplicação em questão é referente à transmissão de vídeo, a avaliação foi feita em cima da classe rtPS. De acordo com as especificações encontradas pelo WiMAX Fórum, descritas na seção 2.5.2, a rtPS é classe mais indicada para utilização nesse tipo de aplicação. As demais estações foram configuradas para tráfego de *background* da seguinte maneira: 5 estações clientes UGS transmitindo CBR (*Constat Bit Rate*) de 160 Kbits/s cada uma; 2 estações clientes BE transmitindo aplicações FTP (*File Transfer Protocol*). Estas 7 estações clientes foram fixas durante toda a simulação, variou-se somente o número de estações clientes rtPS em concorrente com a estação que estava recebendo a aplicação de vídeo. Outros detalhes de parâmetros utilizado na simulação estão descritos na Tabela 6.1.

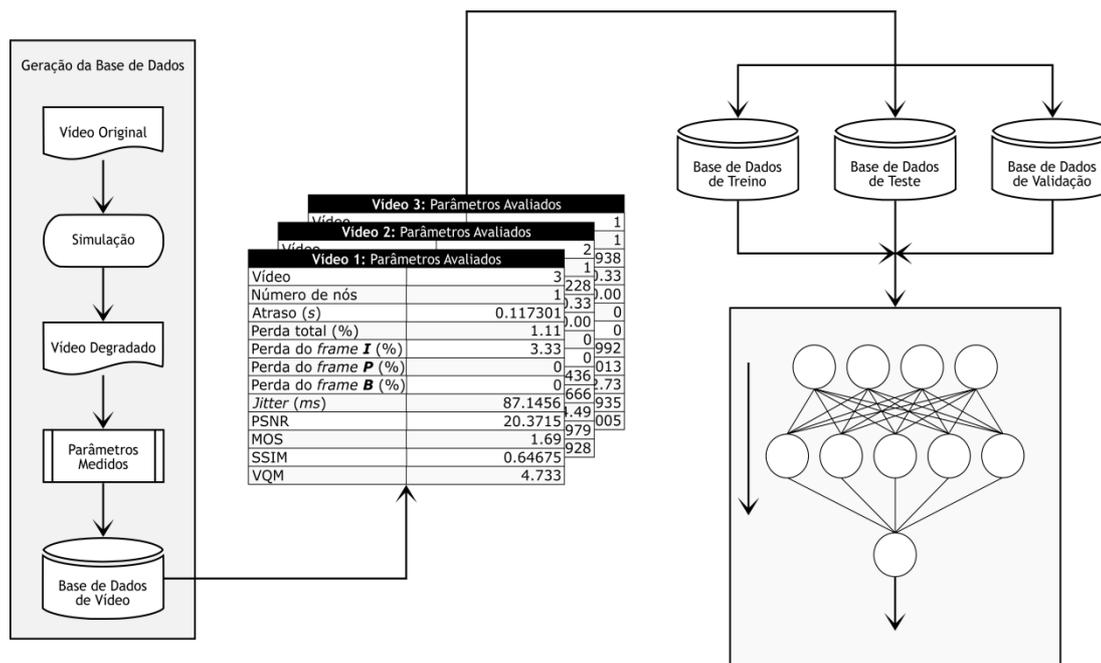
**Tabela 6.1. Configuração da Simulação**

Parâmetros	Valores
Largura de banda do Canal	5 MHz
Modelo de Propagação	Two Ray Ground
Modelo da Antena	Omni direcional
Ganho de Transmissão	1
Ganho de Recepção	1
Potência de Transmissão	0.25 W
Duração do Frame	20 ms
Tamanho do Pacote	1024 bytes
Duração da Simulação	100 s

## 6.5 GERAÇÃO DA BASE DE DADOS E PREDIÇÃO

A Figura 6.5 ilustra a metodologia empregada na geração da base de dados e que foi utilizada para predição e obtenção dos resultados. Tal metodologia obedeceu algumas etapas. Na primeira foram realizadas as simulações, cada vídeo foi transmitido 50 vezes em cada cenário.

A sequência de arquivos de vídeo, original e distorcido, foram utilizados na segunda etapa para obtenção das métricas tanto de QoS, quanto de QoE. De cada vídeo selecionado, foram obtidos, dentre outros, os seguintes parâmetros: *jitter*, perda e o valor de QoE das métricas MOS, PSNR, SSIM e VQM. Sendo que para perda, além da média, foram utilizadas perdas referentes aos *frames I, P e B*. Na quarta etapa, a base de dados foi subdividida em três bases menores da seguinte forma: 70% para treinamento da rede neural; 15% para testes e os 15% restantes foram utilizados para validação do processo de treinamento da base.



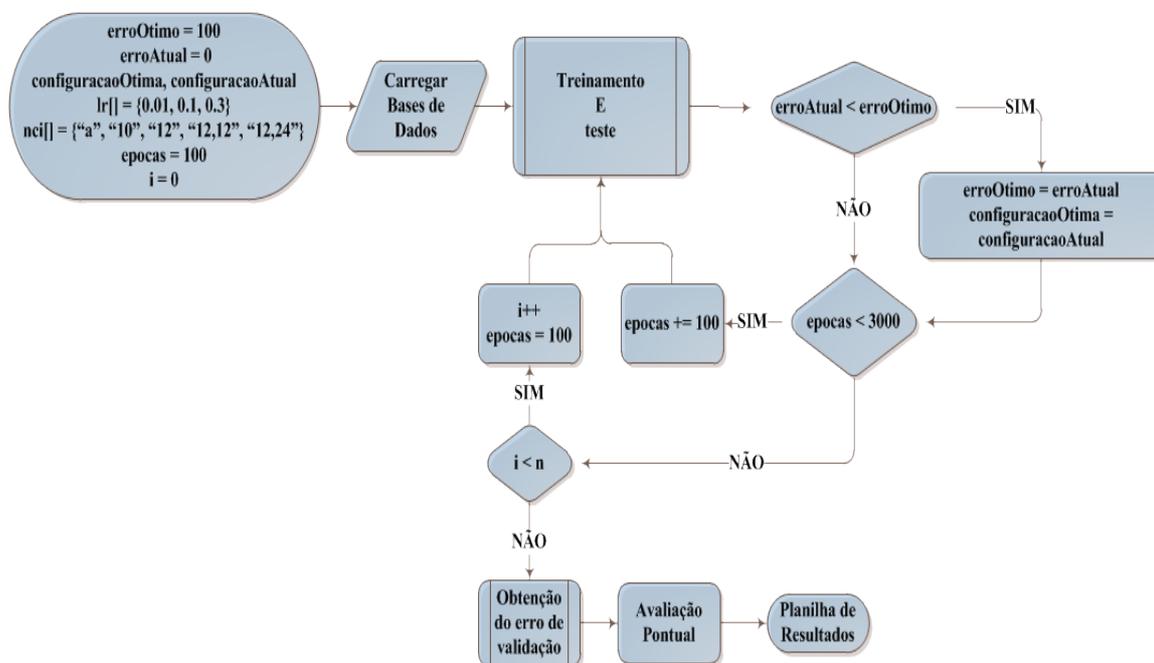
**Figura 6.5. Processo de geração da base de dados e treinamento**

Finalmente, na última etapa ocorreu o processo de criação, treinamento, teste e avaliação do desempenho da Rede Neural, neste trabalho foi utilizada uma RNA do tipo MLP, conforme descrito na seção 4.2.1. Para auxiliar nessa última etapa, foi desenvolvido um algoritmo afim de que a melhor configuração da rede neural fosse obtida para cada uma das métricas.

A Figura 6.6 demonstra o fluxograma do funcionamento do algoritmo desenvolvido. Inicialmente, todas as variáveis são inicializadas, nota-se que erro ótimo foi inicializado com um valor alto, pois é desejado o valor mais baixo. O vetor **lr** é responsável por armazenar as taxas de aprendizado a serem utilizadas nos testes. Enquanto que vetor **nci** armazena as configurações de camadas intermediárias.

Em seguida, a base de dados é carregada. O processo de treinamento e teste consiste em criar uma rede neural com uma configuração específica (taxa de aprendizado, camadas intermediárias e número de épocas) e avaliar seu desempenho nos conjuntos de treino e teste. Caso os erros da rede atual sejam menores que os erros obtidos em outra configuração, a variável de erro ótimo é atualizada. Então é verificado se já foram atingidas as 3 mil épocas (limite máximo para treinamento): senão, esta é incrementada; se sim, o teste passará para a próxima configuração. Quando se esgotam as configurações e épocas o programa possui a melhor configuração dentro dos testes realizados, e realiza a

avaliação de desempenho no conjunto de validação, além da predição individual de cada registro desta base, montando uma planilha com todos estes resultados.



**Figura 6.6. Fluxograma para obtenção de melhor configuração da RNA**

A partir da criação da Rede Neural, foi possível realizar predições das métricas de QoE. Uma das principais vantagens da metodologia proposta é a possibilidade de prever como será a transmissão de um vídeo, levando em consideração o ponto de vista do usuário, dada uma configuração de parâmetros de rede. Isto pode ser utilizado pela gerência de redes para tomar decisões e manipular suas garantias de QoS de acordo com as necessidades e/ou prioridades do ambiente gerenciado. Além do mais, uma vez automatizado, o processo passa a ocorrer com precisão e com dependência humana somente para manipulação das ferramentas computacionais e não no processo de avaliação do vídeo propriamente dita, pois as métricas são obtidas utilizando a abordagem objetiva.

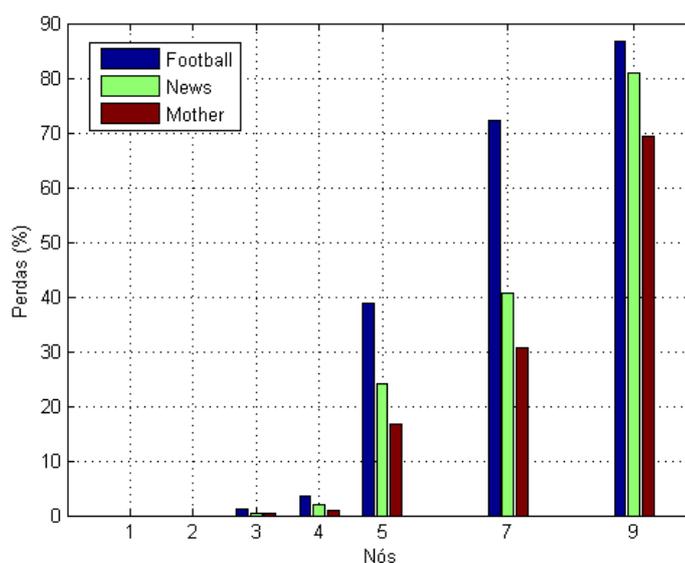
## 7. RESULTADOS

### 7.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo serão apresentando os resultados obtidos para metodologia proposta.

### 7.2 CENÁRIO

Como descrito na seção 5.3, no cenário foram utilizadas sete SSs para tráfego de *background*, destas cinco configuradas com classe UGS e duas BE. Porém, como para análise de vídeo foi considerado sobre a classe rtPS, optou-se por variar estações com a mesma classe para concorrer diretamente com os fluxos de vídeo. Na figura 7.1 é apresentada a porcentagem de perda de pacotes em relação ao número de estações concorrentes. Como pode ser observado, a perda dos vídeos aumenta à medida que mais estações rtPS passam a concorrer com o vídeo transmitido.



**Figura 7.1 - Avaliação do cenário proposto**

Outras análises feitas ainda sobre o gráfico demonstram que a porcentagem de perda está diretamente relacionada com o nível de complexidade e movimentação dos vídeos. Quanto maior o nível mais acentuada foi a perda. Observa-se também que nos cenários testados, a transmissão de vídeo em concorrente cresce substancialmente a partir de quatro SSs. Com cinco, por exemplo, o vídeo de menor nível de complexidade e movimentação a perda foi próximo a 20%, enquanto que para o de maior perda foi de

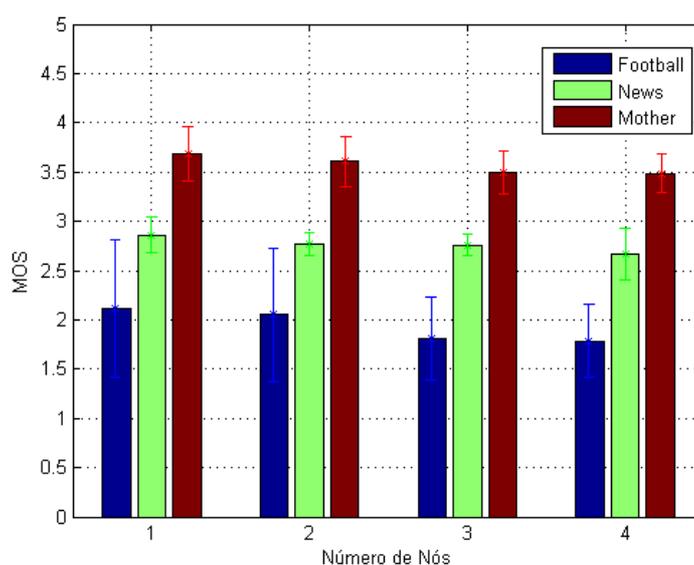
aproximadamente 40%. Em alguns casos a perda se aproximou de 90%, como foi o caso das transmissões que ocorreram no cenário com 9 SS.

Conforme foi demonstrado na Tabela 3.2, os valores apresentados a partir de cinco SSs estão além do limite de perda recomendado. Em outras palavras, é impraticável realizar transmissões de vídeo com qualidade nessas condições, uma vez que nem os níveis de QoS são garantidos, e conseqüentemente os de QoE também não. Por conta disso, na base de dados foram incluídos registros de vídeos em que a perda foi de aproximadamente 5%. Logo, somente os registros obtidos nas transmissões com até quatro SSs foram considerados para predição. Os resultados são demonstrados a seguir para cada métrica.

### 7.3 AVALIAÇÃO DAS MÉTRICAS

#### 7.3.1 MOS

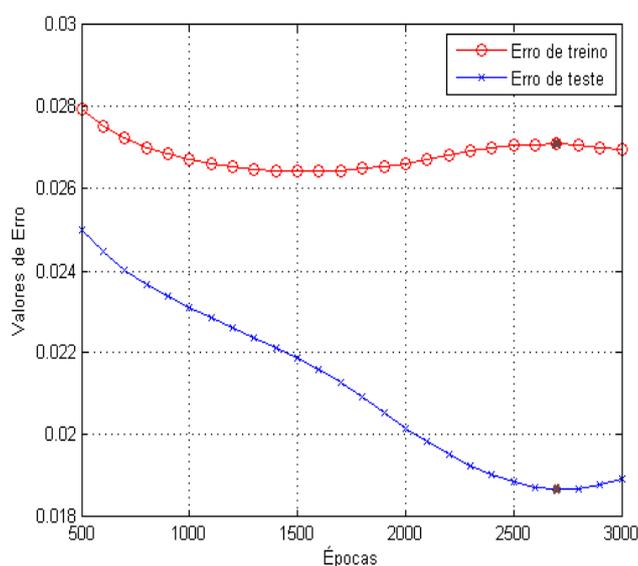
Na Figura 7.2 é demonstrado os resultados de QoE para a métrica MOS. Quando a observação é feita sobre vídeos com as mesmas características de movimentação e complexidade nota-se que os valores do MOS não sofrem uma diferença tão significativa mesmo com o aumento do número de nós concorrente com o vídeo transmitido. Para transmissão do vídeo *mother*, concorrente com um nó, a média obtida foi de aproximadamente 3,6 com desvio padrão de 0,25 e para quatro nós a média se aproximou de 3,4 com desvio padrão de 0,19.



**Figura 7.2. Desempenho de QoE do MOS**

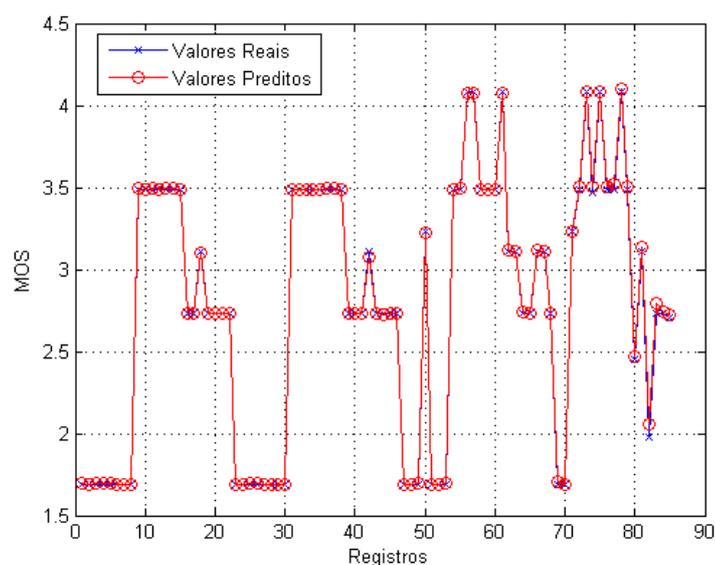
Para os vídeos *news* e *football*, que apresentam níveis de complexidade e movimentação maiores, os resultados obtidos foram piores em relação ao *mother*. Para o vídeo *news*, na transmissão concorrente com um nó a média do MOS foi de 2,8 com desvio padrão de 0,18, enquanto que para quatro nós o MOS foi de 2,6. Enquanto que para o *football* os valores de MOS obtidos foram de 2,12 com desvio padrão de 0,69, e 1,7 com desvio de 0,36 para um e quatro nós, respectivamente.

Já a Figura 7.3 demonstra os resultados do treinamento da rede neural. A seguinte configuração foi utilizada: uma camada intermediária com 10 neurônios, taxa de aprendizado de 0,3. O menor valor do erro de teste foi de 0.01867 e de treino 0.027. Ambos foram obtidos época 2700.



**Figura 7.3. Valores de erro de treino e de teste para o MOS**

A partir da rede neural resultante do treinamento, foi realizada a predição. A Figura 7.4 mostra os valores reais e os valores preditos a partir da base de validação. Observa-se que a diferença entre os valores reais e preditos é mínima, e em alguns casos é quase imperceptível.

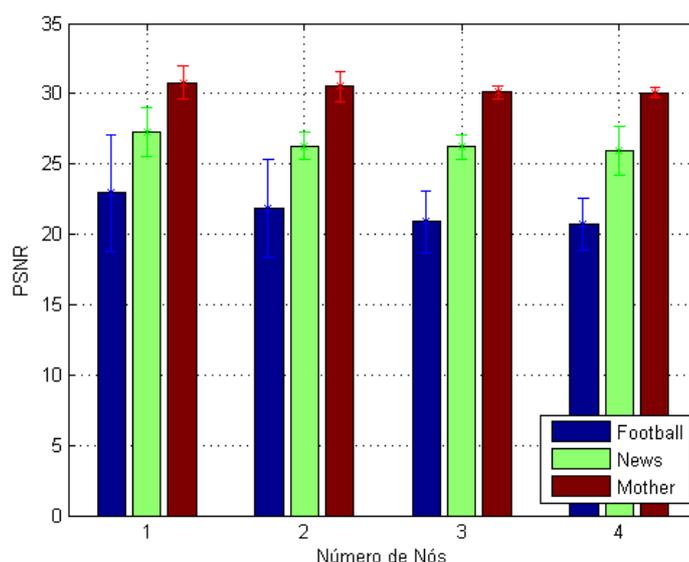


**Figura 7.4. Comparação entre valores reais e preditos para o MOS**

### 7.3.2 PSNR

A Figura 7.5 demonstra os valores obtidos para a métrica PSNR. Semelhante a análise feita sobre o MOS, é possível notar que não há uma grande diferença quando vídeos com as mesmas características são comparados. No caso do *mother* a diferença do PSNR é mínima nas transmissões feitas com um e quatro nós. Para o primeiro cenário a média foi de 30,7 dB enquanto que para o segundo 30,3 dB. Em relação ao desvio padrão nota-se uma diferença mais significativa, em relação ao MOS, que foi de 1,05 e 0,3 para um e quatro nós, respectivamente.

Para os demais vídeos, os resultados seguem o mesmo padrão. No vídeo *news*, com exceção da transmissão realizada concorrente com apenas um nó, os valores obtidos nos demais cenários estiveram bem próximos. Já para o *football* houve uma diferença mais perceptível principalmente entre no cenário com um e quatro nós. Para o primeiro a média foi de 22,93 dB e para o segundo 20,92 dB. A respeito do desvio padrão para este vídeo, é possível notar uma diferença bem acentuada entre os cenários em questão, variando de 4,1 no primeiro e 2,19 para o segundo. Essa variação mais significativa, mesmo com vídeos de características semelhantes, está possivelmente relacionada à faixa de intervalo de classificação da métrica PSNR que comparada com o MOS é bem maior.

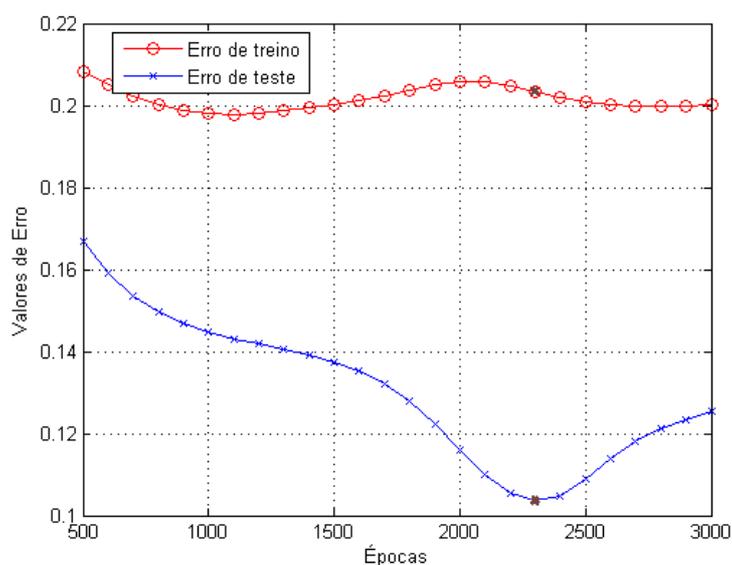


**Figura 7.5. Desempenho de QoE do PSNR**

Tomando como base a Tabela 4.2, onde é feita um mapeamento do MOS para o PSNR, a transmissão do *mother* é classificada como “razoável”. Nesta classificação os danos ao vídeo seriam levemente notados pelos usuários. Isso demonstra que de acordo com os recursos disponíveis da rede, em alguns casos é mais conveniente realizar transmissões de vídeos com características de complexidade e movimentação menor.

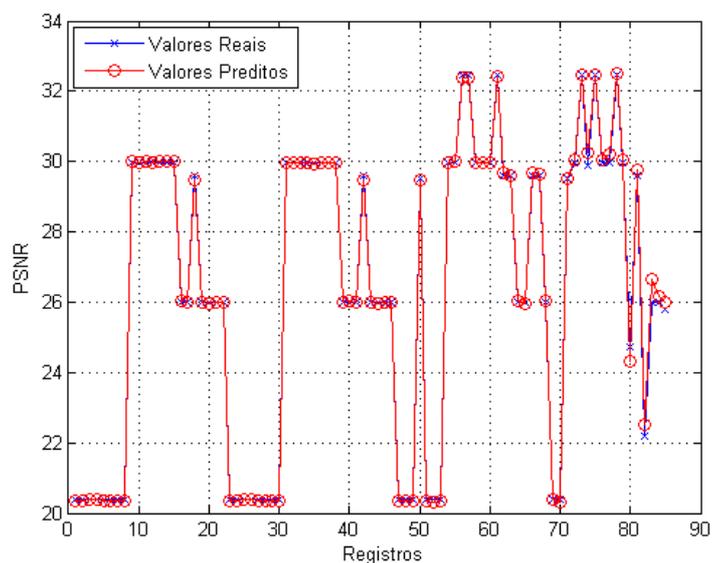
Porém, tais resultados demonstram também que nem sempre os níveis aceitáveis de QoS refletem em uma boa qualidade de transmissão de vídeo. Se a análise dos vídeos transmitidos fosse baseada apenas nos dados da Figura 7.1, possivelmente todos os vídeos transmitidos seriam considerados de boa qualidade uma vez que os valores de perda estão dentro do limite estabelecido. Entretanto, quando a avaliação é realizada sobre o ponto de vista do usuário final com métricas de QoE nota-se que em nenhum dos vídeos transmitidos a classificação é considerada “boa”.

Em relação à predição do PSNR, na rede neural foi utilizada uma camada intermediária com 12 neurônios e taxa de aprendizado utilizado foi de 0,3. A menor taxa de erro foi 0.10361 e de treino 0.2231 (ver Figura 7.6)



**Figura 7.6. Valores de erro de treino e de teste para o PSNR**

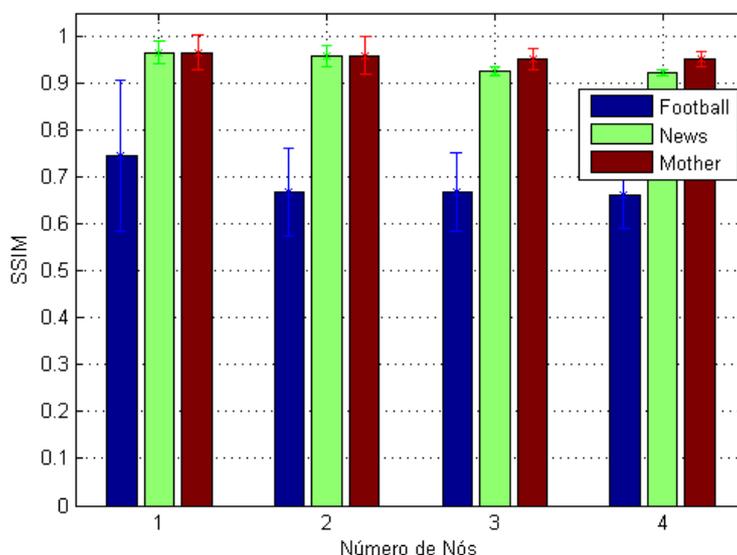
A taxa de erro obtida foi maior que alcançada pela métrica MOS, porém esse erro não refletiu de forma tão significativa na predição realizada sobre a base validação, como pode ser observada na Figura 7.7. Isto leva o erro de classificação a ser praticamente desprezível.



**Figura 7.7. Comparação entre valores reais e preditos para o PSNR**

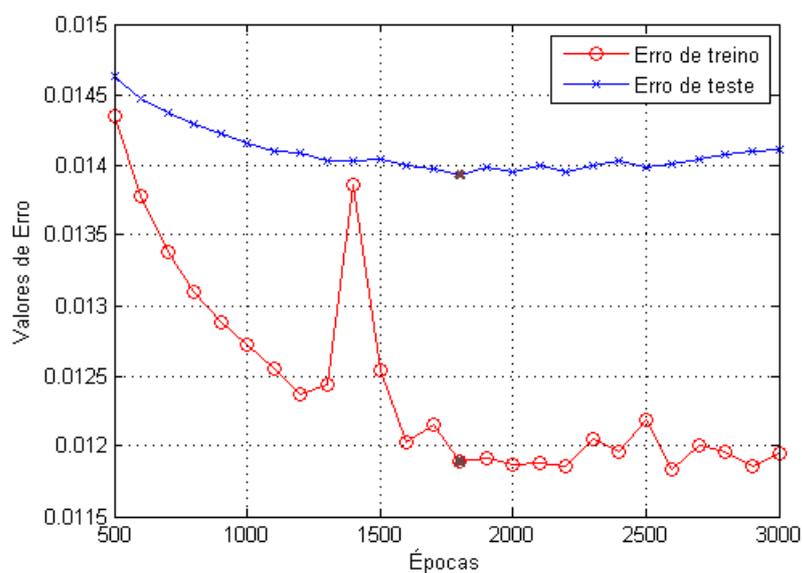
### 7.3.3 SSIM

Diferente do MOS e do PSNR, no SSIM os vídeos *mother* e *News* não apresentaram tanta diferença nos cenários. No caso da transmissão do vídeo concorrente com 1 e 2 nós os resultados foram praticamente iguais em ambos os vídeos, com média de aproximadamente de 0,96 e desvio padrão de 0,03, nos cenários com 3 e 4 nós o vídeo *mother* manteve resultado semelhante aos demais cenários, enquanto que no *news* houve uma pequena variação. A respeito do *football*, com exceção do primeiro cenário em que a média foi próxima de 0,74 e desvio de 0,16, a diferença nas transmissões concorrentes com 2, 3 e 4 nós foram irrelevantes. Isso demonstra que os parâmetros considerados no SSIM e que não são utilizados pelo MOS e PSNR impactam significativamente na interpretação dos resultados.



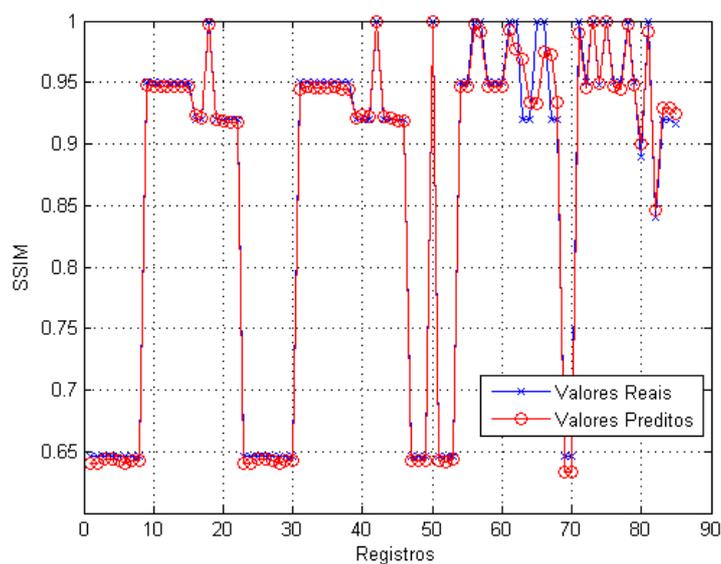
**Figura 7.8. Desempenho de QoE do SSIM**

Já no processo de treinamento da Rede Neural, diferente do MOS e do PSNR, foram usadas duas camadas intermediárias com 12 neurônios em cada uma e taxa de aprendizado 0,3. As taxas de erro de treino e de teste foram de 0,011 e 0,013, respectivamente. Com esta métrica a rede convergiu de forma mais rápida em comparação com o MOS e PSNR uma vez que o melhor desempenho na rede foi alcançado na época 1800.



**Figura 7.9. Valores de erro de treino e de teste para o SSIM**

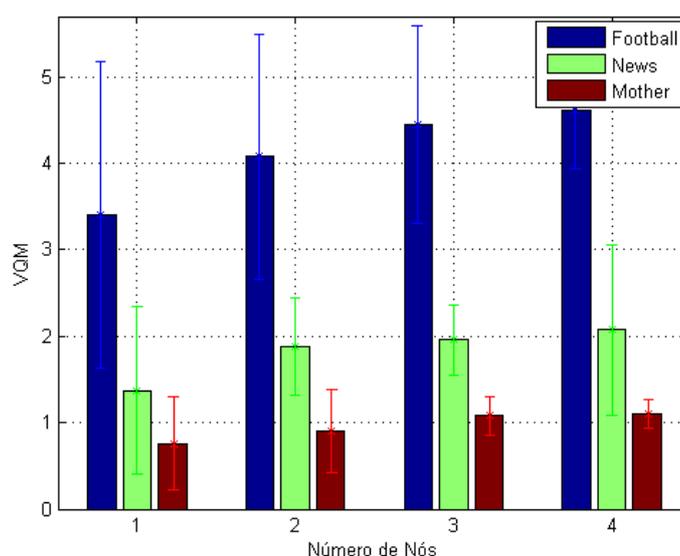
Na predição pontual, demonstrado na Figura 7.10, é possível observar que em alguns casos houve uma diferença entre os valores reais e preditos. Isso é visto de forma mais clara entre os registros 60 e 70 e também nos intervalos de 80 a 85 da base de validação.



**Figura 7.10. Comparação entre valores reais e preditos para o SSIM**

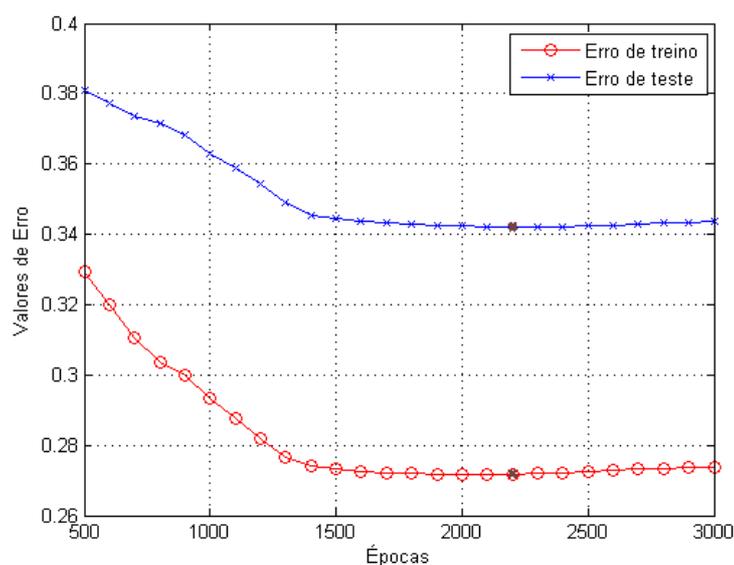
### 7.3.4 VQM

Como já citado, outra métrica que apresenta melhorias em relação as métricas tradicionais é o VQM. Semelhante a análise realizada sobre as demais métricas, na Figura 7.11 estão os valores de QoE do VQM. Nota-se que a complexidade de cada vídeo obteve um impacto diferente em cada cenário, diferente do que ocorreu os vídeos *news* e *mother* para o SSIM. No nó um *mother* obteve o melhor resultado, com media de 0,76 e desvio padrão de 0,6. Enquanto que para os demais vídeos neste cenário, os resultados foram *news* com media de 1,37 e desvio de 0,4; já para o *football* a média foi de 3,44 e desvio de 1,76. No caso do VQM, em especial, o algoritmo utilizado para o cálculo dos valores extrai informações do nível de complexidade e movimentação da sequência de *frame*, por isso essa diferença para cada vídeo.



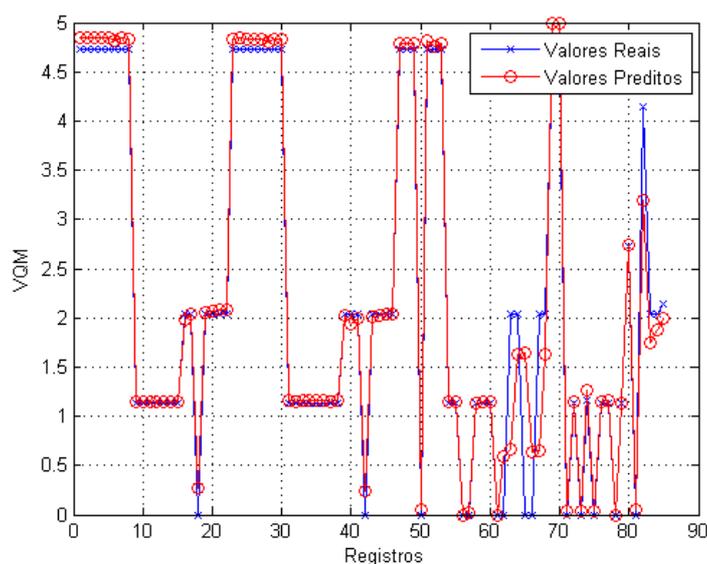
**Figura 7.11. Desempenho de QoE do VQM**

A respeito do treinamento da rede neural para predição da métrica, o menor erro de treino foi de 0,271 e de teste 0,342, Figura 7.12. Tais valores foram obtidos na época 2200 com 1 camada intermediária configurada com 10 neurônios e taxa de aprendizado 0,1.



**Figura 7.12. Valores de erro de treino e de teste para o VQM**

De todas as métricas utilizadas, o VQM foi o que obteve o maior erro de teste o que, conseqüentemente, refletiu negativamente na predição pontual conforme está demonstrado na Figura 7.13. Comparando com as demais métricas observa-se que há uma diferença maior, ainda que pequena, entre os valores reais e preditos. Grande parte desta diferença foi bem pequena. Em outras a diferença foi mais acentuada e visível, é caso de alguns registros na faixa entre 60 e 70 da base de validação.



**Figura 7.13. Comparação entre valores reais e preditos para o VQM**

## 8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho abordou uma metodologia de predição de QoE em transmissão de vídeo baseada em informações do nível de rede, ou seja, em Qualidade de Serviço na tecnologia WiMAX. Este padrão permite a transmissão diferenciada para cada tipo de fluxo (voz, vídeo e dados) com altas taxas de transmissão e além do mais, alcançando longas distâncias. Sendo este o grande diferencial da tecnologia em relação aos demais padrões sem fio. Por isso, o WiMAX é considerado uma tecnologia promissora para a próxima geração de redes sem fio.

Por outro lado, com a crescente utilização dos serviços multimídia há um grande desafio por parte das operadoras de telecomunicações em oferecer uma entrega de qualidade ao usuário final. Hoje a disponibilização desses serviços através de redes sem fio de banda larga já é uma realidade, e a tendência é que seja fluxo predominante até 2015 principalmente em dispositivos móveis. Isto tem incentivado as operadoras a buscar outras formas de avaliação que não sejam baseadas somente em informações do nível de rede, mas também na experiência final do usuário que é público alvo de maior interesse dessas empresas.

Nos dias atuais, grande parte das avaliações de aplicações, sendo multimídia ou não, ainda se baseiam apenas em Qualidade de Serviço. Este tipo de avaliação é relativamente simples de ser realizada uma vez que os parâmetros (*jitter*, atraso, perda) já são conhecidos e grandemente utilizados. Já a outra forma de avaliação, Qualidade de Experiência, apesar de nem sempre quantificável numericamente, é o único método de avaliação de desempenho que leva em consideração a experiência do usuário final.

Porém como exposto, grande parte dos trabalhos apresentados avaliam o desempenho por uma técnica ou por outra. Em outras palavras, a avaliação é feita de forma isolada. Para preencher esta lacuna, neste trabalho utilizou-se um conjunto de ferramentas que combinadas com uso de Redes Neurais Artificiais permitiu a criação de uma metodologia inteligente onde informações de tanto de QoS quanto de QoE obtidas com extensas simulações originou uma base de dados que uso de Redes Neurais Artificiais foi realizada a predição de Qualidade de Experiência em serviços de vídeo.

Considerando o desempenho da Rede Neural através dos valores de erro de treino e de teste, é possível afirmar que a metodologia possui um alto grau de acurácia devido aos

baixos valores de erro obtidos. A comparação feita entre os valores reais e predita mostrou que para as métricas utilizadas (MOS, PSNR, SSIM e VQM) o resultado foi muito satisfatório. Mesmo no pior resultado, obtido com a métrica VQM, foi possível observar que o erro é praticamente desprezível o que reforça a eficiência da metodologia.

## 8.1 CONTRIBUIÇÕES

Dentre as principais contribuições deste trabalho destacam-se:

- Levantamento do estado da arte referente à QoE em rede WiMAX tanto em cenários reais, quanto simulados;
- Levantamento do estado da arte dos principais módulos disponíveis no Network Simulator que oferecem suporte a QoS para a tecnologia WiMAX;
- Integração do framework Evalvid de transmissão de vídeo para avaliação de QpE ao módulo proposto por Belghith, et al. (2008);
- Uso combinado de simulação e técnica de inteligência computacional para proposta de uma metodologia de predição de QoE em transmissão de vídeo na tecnologia WiMAX;
- Predição de QoE em transmissão de vídeo baseada na abordagem subjetiva;
- Elaboração de um capítulo de livro intitulado: **Recent Advances and Challenges in Wireless QoE-aware Multimedia Streaming Systems** já aceito para ser publicado no livro: **Multimedia Services and Streaming for Mobile Devices: Challenges and Innovations** da editora internacional IGI Global.

## 8.2 DIFICULDADES ENCONTRADAS

Durante o desenvolvimento desta dissertação diversas dificuldades foram encontradas. O objetivo de descrever as principais é fornecer subsídios para que estudantes e pesquisadores possam contorná-las caso o foco de interesse seja o mesmo apresentado aqui. Dentre as quais estão:

- Carência de um simuladores de acesso gratuito que ofereçam as funcionalidades propostas pelo padrão IEEE 802.16, tais como suporte as classes de QoS;
- Carência de livros que abordem a avaliação de desempenho baseada em QoE;

- Ausência de artigos que abordem técnicas de inteligência computacional no tratamento de informações de QoE;
- Complexidade na avaliação de vídeo uma vez que envolve uma série de cuidados como a obtenção do nível de movimentação e complexidade dos vídeos.

### 8.3 TRABALHOS FUTUROS

O trabalho necessita ainda de algumas melhorias que serão realizadas para dar continuidade a esta linha de pesquisa como:

- Utilização de um simulador mais robusto, que ofereça todas as funcionalidades propostas pelo padrão IEEE 802.16, para isso já está em desenvolvimento a integração do framework Evalvid ao módulo WiMAX do simulador Opnet, cuja licença foi adquirida recentemente pelo LPRAD (Laboratório de Planejamento de Redes de Alto Desempenho).
- Utilização de outras técnicas para que a base de dados seja melhorada/refinada. Por exemplo, pretende-se futuramente usar Redes Bayesianas para tentar correlacionar quais métricas de Qualidade de Serviço causam um maior impacto na experiência do usuário final.
- Aplicação da metodologia de predição em cenários mais complexos, como transmissão simultânea com vídeos de alta definição em redes heterogêneas.
- Aplicação da metodologia em cenários reais.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BEALE, R; JACKSON, T. **Neural Computing : an Introduction**. Bristol: Adam Hilger, 1990.

BELGHITH, A., NUAYMI, L., **Design and Implementation of a QoS-Included WiMAX Module for NS-2 Simulator**. PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ONSIMUTOOLS - SIMULATION TOOLS AND TECHNIQUES FOR COMMUNICATIONS, NETWORKS AND SYSTEMS & WORKSHOPS, 2., Anais Eletrônicos , Marseille, 2008

BERCI, D. C. **Introdução a Otimização Por Enxame de Partículas**. 2008

BRAGA, P. A., CARVALHO, C. P. L. F. A., LUDERMIR, B. T. **Redes Neurais Artificiais**. LTC, 1ª edição, 2000

CARNEC, M., LE CALLET, P., BARBA, D. **Full reference and reduced reference metrics for image quality assessment**. In: Signal Processing and Its Applications, 2003.v. 1. p. 477- 480, Nantes, 2003.

CISCO. **CISCO VISUAL NETWORKING INDEX: GLOBAL MOBILE DATA TRAFFIC FORECAST UPDATE 2010 – 2015**. Disponível em: <[http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/white\\_paper\\_c11-520862.pdf](http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/white_paper_c11-520862.pdf)>. Acesso em Junho de 2011

CHEN, et al. **The design and implementation of WiMAX module for ns-2 simulator: PROCEEDING FROM THE WNS2 - WORKSHOP ON NS-2: THE IP NETWORK SIMULATOR**, 2., Anais Eletrônicos, Atenas, 2006.

CYBENKO, G. **Approximations by superpositions of a sigmoidal funcion**. Math Control Signal Systems, p. 303–314, 1989

DARONCO, F. C. **Avaliação Subjetiva de Qualidade Aplicada à Codificação de Vídeo Escalável**. 2009. 146 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação). Programa de Pós-Graduação em Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2009.

EDEN, A. No-Reference Image Quality Analysis for Compressed Video Sequence. **IEEE Transaction on Broadcasting**, v. 54, n. 3, p. 691-697, 2008

EKLUND et al. IEEE Standard 802.16: A technical overview of the Wireless Man air Interface for broadband wireless access. **IEEE Communication Magazine**, v.40, n.6, p.98-107, 2002

ETSI STQ. **European Technical Committee for Speech, Transmission, Planning, and Quality of Service**. Disponível em: <<http://portal.etsi.org/>>. Acesso em Abril de 2011.

FREEMAN, J. A; SKAPURA, D. M. **Neural Networks Algorithms, Applications and Programming Techniques**.Addelfon-Wefley, p. 89–106, 1992.

GREENGRASS, J., EVANS, J., BEGEN, A.C. Not All Packets Are Equal, Part 2: The Impact of Network Packet Loss on Video Quality. On: **IEEE Internet Computing**, v.13,

p.74-82, 2009

GHOSH, A., **Link and System Level Simulations of WiMAX Network**, AATG Interim, 2006

HAYKIN, S. **Redes Neurais Princípios e Prática**. Bookman, 2001.

**IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems. Amendment 1002: Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands.** Feb. 2006. Disponível em: <[ieeexplore.ieee.org/iel5/9349/29691/01350465.pdf](http://ieeexplore.ieee.org/iel5/9349/29691/01350465.pdf)>. Acesso em Maio de 2011.

**IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems—Amendment 2: Medium Access Control Modifications and Additional Physical Layer Specifications for 2–11 GHz**, Jan. 2003. Disponível em: <[ieeexplore.ieee.org/iel5/9349/29691/01350465.pdf](http://ieeexplore.ieee.org/iel5/9349/29691/01350465.pdf)>. Acesso em Maio de 2011.

**IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks, Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems.** Disponível em: <[standards.ieee.org/about/get/802/802.16.html](http://standards.ieee.org/about/get/802/802.16.html)>. Acesso em Maio de 2011.

**IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks, Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems.** Out. 2004. Disponível em: <[standards.ieee.org/about/get/802/802.16.html](http://standards.ieee.org/about/get/802/802.16.html)>. Acesso em Maio de 2011.

**IEEE Wireless MAN, “Inside the IEEE 802.16 Standard for Wireless Metropolitan Area Network.** Disponível em: <<http://www.ieee802.org/16//>>. Acesso em Maio de 2011.

ITU. Recommendation ITU-R BT.500: **Methodology for the Subjective Assessment of the Quality of Television Pictures**, 2000. Disponível em: <[http://www.dii.unisi.it/~menegaz/DoctoralSchool2004/papers/ITU-R\\_BT.500-11.pdf](http://www.dii.unisi.it/~menegaz/DoctoralSchool2004/papers/ITU-R_BT.500-11.pdf)>. Acesso em Abril de 2011

ITU. Recommendation ITU-T P.900: **Subjective Video Quality Assessment Methods for Multimedia Application**, 2008. Disponível em <<http://www.itu.int/rec/T-REC-P.910-200804-I/>>. Acesso em Abril de 2011

JUNIOR et al. Seamless Handover and QoS Provisioning for Mobile Video Applications in an Integrated WIMAX/MIP/MPLS Architecture. **INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MEDIA AND COMMUNICATION**, v. 3, n. 4, 2009

KIM, J. H., CHOI, S. G. **A Study on a QoS/QoE Correlation Model for QoE Evaluation on IPTV Service.** In: ICACT – INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED COMMUNICATION TECHNOLOGY .v.2, Anais Eletrônicos, Cheongju, 2010.

KLAUE, J., RATHKE, B., WOLISZ, A. **EvalVid- A Framework for Video Transmission and Quality Evaluation.** In: 13TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON MODELLING TECHNIQUES AND TOOLS FOR COMPUTER PERFORMANCE EVALUATION, Urbana, 2009.

KUROSE, J. F.; ROSS, K. W. **Redes de Computadores e a Internet: Uma Abordagem**

**Top-Down**, 5ª edição. Tradução sob a direção de Opportunity Translations, São Paulo: Addison Wesley, 2010.

MÁSSON, E.; WANG, Y. **Introduction to Computation and Learning in Artificial Neural Networks**. European Journal of Operational Research, North-Holand, v. 47, p. 1–28, 1990.

MU et al. Quality of Experience Management Framework for Real-Time Multimedia Applications, In: **International Journal of Internet Protocol Technology**, v. 4, n. 1, Março, 2009, p. 54-64

PEVQ. **Perceptual Evaluation of Video Quality**. Disponível em <<http://www.pevq.org/>>. Acesso em Abril de 2011

REFENES, A. N. **Currency Exchange Rate Prediction and Neural Network Design Strategies**. Neural Computing and Applications Journal, London, p. 46–58, 1993

REIS, et al. **Quality Of Experience Optimized Scheduling In Multi-Service Wireless Mesh Networks**. IN: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON IMAGE PROCESSING, 17., Hong Kong, 2010.

RICHARDSON, I. E. G. **H.264 and MPEG-4 Video Compression: Video Coding For Next Generation Multimedia**, John Wiley & Sons Ltd., England, 2003

RIKER et al. **A Hybrid Prediction and Assessment Quality of Experience Approach for Videostreaming Applications over Wireless Mesh Networks**. Em: XXIX Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, 29, Anais eletrônicos, Campo Grande, 2011.

RUMELHART, D. E.; HINTON, G. E.; WILLIAMS, R. J. **Learning internal representations by error propagation**. Parallel Distributed Processing, v. 1, p. 318-362. MIT Press.

SOUSA, B., PENTIKOUSIS, K., CURADO, M. **Experimental Evaluation of Multimedia Services in WiMAX**. In: MOBIMEDIA - INTERNATIONAL MOBILE MULTIMEDIA COMMUNICATIONS CONFERENCE ,7., Anais Eletrônicos, Finlândia , 2008.

SOUZA et al. **Multimedia Transmission on Amazon Region using Wireless Broadband Networks**. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON BROADBAND MULTIMEDIA SYSTEMS AND BROADCASTING, 2009, Bilbao, p. 1- 4,

SPERANZA et al. **Objective and Subjective Quality Assessment with Expert and Non-expert Viewers**. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON QUALITY OF MULTIMEDIA EXPERIENCE, 17., Hong Kong 2010,

TAKAHASHI, A., HANDS, D.; BARRIAC, V. Standardization Activities in the ITU for a QoE Assessment of IPTV. *IEEE Communication Magazine*, v. 46, n.2, p. 78-84, 2008

VISHWANATH et al. Perspectives on Quality of Experience for Video Streaming over WiMAX. *Mobile Computing and Communications Review*, v. 13, n. 4, Outubro, 2009

VQEG. **Final report from the Video Quality Expert Group on the Validation of Objective Models of the Video Quality Assessment**, 2000. Disponível em:

<<http://www.vqeg.org/>>. Acesso em Abril de 2011.

WASSERMAN, P. D. **Neural Computing : Theory and Practice**. New York : Van Nostrand Reinhold, 1989.

WERBOS, P.J. **Beyond Regression: New Tools for Prediction and Analysis in the Behavioral Sciences**, PhD thesis, Harvard University

WHITAKER, J., BENSON, B. **Standard Handbook of the Video and Television Engineering**. McGraw-Will, Nova Iorque, 2003

**WiMAX System Evaluation Methodology**, Version 2.0, 2007.

WU, R., RAO, K. R., **Digital Video Quality and Perceptual Coding**. CRC Press, Nova Iorque, 2006