

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

PREDIÇÃO DE QUALIDADE DE EXPERIÊNCIA PARA INTERNET DO FUTURO  
EM ARQUITETURAS HETEROGÊNEAS DE REDES SEM FIO MÓVEIS

JOSÉ JAILTON HENRIQUE FERREIRA JUNIOR

TD: 12/2013

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
**2013**



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

JOSÉ JAILTON HENRIQUE FERREIRA JUNIOR

PREDIÇÃO DE QUALIDADE DE EXPERIÊNCIA PARA INTERNET DO FUTURO EM  
ARQUITETURAS HETEROGÊNEAS DE REDES SEM FIO MÓVEIS

TD: 12/2013

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
**2013**

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

JOSÉ JAILTON HENRIQUE FERREIRA JUNIOR

PREDIÇÃO DE QUALIDADE DE EXPERIÊNCIA PARA INTERNET DO FUTURO EM  
ARQUITETURAS HETEROGÊNEAS DE REDES SEM FIO MÓVEIS

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

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
**2013**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

---

Ferreira Junior, José Jailton Henrique, 1985-  
Predição de qualidade de experiência para  
internet do futuro em arquiteturas heterogêneas  
de redes sem fio móveis / José Jailton Henrique  
Ferreira Junior. - 2013.

Orientador: Carlos Renato Lisboa Francês.  
Tese (Doutorado) - Universidade Federal do  
Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém,  
2013.

1. Arquitetura de redes de computadores. 2.  
Recursos de redes de computadores. 3. Telefonia  
pela internet. I. Título.

CDD 22. ed. 004.65

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

**“PREDIÇÃO DE QUALIDADE DE EXPERIÊNCIA PARA INTERNET DO FUTURO  
EM ARQUITETURAS HETEROGÊNEAS DE REDES SEM FIO MÓVEIS.”**

**AUTOR: JOSÉ JAILTON HENRIQUE FERREIRA JUNIOR**

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

APROVADA EM 06 / 12 / 2013

**BANCA EXAMINADORA:**

---

**Prof. Dr. Carlos Renato Lisboa Francês**  
(Orientador – PPGEE/UFPA)

---

**Prof. Dr<sup>a</sup>. Jasmine Priscyla Leite de Araujo**  
(Avaliador Externo – FCT/UFPA)

---

**Prof. Dr. Claudio Alex da Rocha**  
(Avaliador Externo – IFPA)

---

**Prof. Dr. Nandamundi Lankalapalli Vijaykumar**  
(Avaliador Externo – INPE)

---

**Prof. Dr. Solon Venâncio de Carvalho**  
(Avaliador Externo – INPE)

**VISTO:**

---

**Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes**  
(Coordenador do PPGEE/ITEC/UFPA)

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por me abençoar com mais essa conquista em minha vida. A minha família que tem um papel fundamental em minha vida, me apoiando e incentivando em todos os instantes. Em especial ao Dr. Carlos Renato Lisboa Francês pela oportunidade e confiança depositada em mim com suas orientações acadêmicas e até mesmo com as suas orientações pessoais que foram de suma importância. Aos meus amigos de laboratório LPRAD (Laboratório de Planejamento de Redes de Alto Desempenho) que presenciaram e me ajudaram nessa caminhada.

“May the force be with you” (Mestre  
Yoda, Star Wars )

## SUMÁRIO

1. Introdução .....	1
1.1 Objetivos.....	3
1.2 Organização do Trabalho.....	5
2. Revisão Bibliográfica.....	6
2.1 IEEE 802.11 .....	6
2.1.1 IEEE 802.11e .....	7
2.2 IEEE 802.16 .....	9
2.2.1 IEEE 802.16e .....	9
2.3 LTE.....	10
2.3 IEEE 802.21 .....	13
2.3.1 Media Independent Event Service (MIES).....	14
2.3.2 Media Independent Command Service (MICS) .....	15
2.3.3 Media Independent Information Service (MIIS).....	15
2.4 Qualidade de Experiência .....	16
2.4.1 Avaliação Subjetiva.....	17
2.4.2 Avaliação Objetiva .....	18
2.5 Predição .....	21
2.5.1 Rede Neural .....	21
2.6 Considerações Finais .....	24
3. Trabalhos Relacionados.....	25
3.1 Trabalhos Relacionados a QoE .....	25
3.2 Redes 4G.....	25
3.3 Considerações Finais .....	29
4. Arquitetura de Predição de Qualidade de Experiência em Redes Heterogêneas.....	30
4.1 QoE Heterogêneo. ....	31
4.2.3 Mecanismo de QoE Híbrido.....	33
4.2.2 Mecanismo de Adaptação de QoE .....	35
4.3 Gerenciamento de Mobilidade Transparente para QoE.....	36
4.4 Modelo de Bateria .....	37
4.4.1 Modelo Linear.....	37

4.4.2 Modelo Rakhmatov – Vrudhula.....	38
4.6 Resumo do Capítulo .....	39
5. Avaliação da Arquitetura .....	40
5.1 Metodologia .....	40
5.2 Arquitetura Heterogênea com redes WiFi e WiMAX .....	41
5.3 Gerenciamento de Mobilidade.....	42
5.4 Avaliação de Qualidade de Experiência .....	44
5.5 Arquitetura heterogênea com redes 4G .....	50
5.6 Consumo de energia.....	55
5.7 Resumo do Capítulo .....	56
6. Conclusão.....	57
6.2 Trabalhos Futuros .....	58
6.3 Dificuldades encontradas .....	59
6.4 Publicações .....	60
Referências Bibliográficas.....	61
Anexos .....	67

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Cenário genérico de alternativas de conectividade.....	2
Figura 2 - Filas de prioridades do 802.11e. ....	8
Figura 3 - Arquitetura LTE.....	12
Figura 4 - Estrutura IEEE 802.21 .....	13
Figura 5 - Rede Neural .....	23
Figura 6 - Pilha de Protocolo TCP/IP .....	30
Figura 7 - Visão geral da Arquitetura.....	31
Figura 8 - Arquitetura geral com suporte de QoE .....	32
Figura 9 - QoE Híbrido.....	34
Figura 10 - Sinalização para Handover Vertical .....	37
Figura 11 - Procedimento de Simulação .....	40
Figura 12 - Cenário de Avaliação.....	41
Figura 13 - Vazão sem suporte a QoE.....	43
Figura 14 - Vazão com suporte de QoE .....	44
Figura 15 - Frames Perdidos x Congestionamento.....	45
Figura 16 – MOS .....	46
Figura 17 - SSIM .....	47
Figura 18 - VQM .....	48
Figura 19 - Comparação dos Frames .....	49
Figura 20 – Qualidade dos Frames .....	49
Figura 21 - Distorção de Cor e Nível de Ruído.....	50
Figura 22 – Cenário de Avaliação .....	51
Figura 23 - PSNR .....	52
Figura 24 - SSIM .....	53
Figura 25 - VQM .....	53
Figura 26 - Frame recebido sem suporte a QoE. ....	54
Figura 27 - Frame recebido com suporte a QoE em redes 4G. ....	54
Figura 28 - Consumo de Energia.....	56

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Padrões do IEEE 802.11 .....	7
Tabela 2 - Mapeamento entre prioridades de usuário e categorias de acesso. ....	8
Tabela 3 – Classes de Serviço no WiMAX .....	10
Tabela 4–Escala de qualidade MOS .....	18
Tabela 5 - Mapeamento PSNR para MOS.....	19
Tabela 6 - Trabalhos relacionados .....	29
Tabela 7 - Algoritmo Genérico de Adaptação de QoE.....	36
Tabela 8 – Parâmetros de Simulação.....	42
Tabela 9 – Parâmetros de simulação para Rede Neural .....	42
Tabela 10 - Valores SSIM .....	47
Tabela 11 - Valores VQM .....	48
Tabela 12 - Parâmetros de Simulação .....	51
Tabela 13 - Parâmetros de simulação para energia .....	55
Tabela 14 – Publicações. ....	60

## LISTA DE SIGLAS

4G - Fourth Generation  
ABC - Always Best Connectivity  
ACK - Acknowledge  
AIFS - Arbitrary Inter-Frame Spacing  
BSS - Basic Service Set  
BPSK - Binary Phase Shift Keying  
CAC - Call Admission Control  
CID - Connection Identifier  
CTS - Clear To Send  
CW - Contention Window  
DSSS - Direct Sequence Spread Spectrum  
EDCA - Enhanced Distributed Coordinated Access  
FHSS - Frequency Hopping Spread Spectrum  
FDD - Frequency-Division Duplexing  
FI - Future Internet  
FIFO – First In First Out  
GoP -Group of Picture  
HCCA - HCF Controlled Channel Access  
HCF - Hybrid Coordination Function  
HR-DSSS - High Rate Direct Sequence Spread Spectrum  
IBSS -Independent BSS  
IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers  
IR - Infrared light  
ISM - Industrial, Scientific, Medical  
MAC - Media Access Control  
MICS - Media Independent Command Service  
MIES - Media Independent Event Service  
MIH - Media Independent Handover  
MIHF - Media Independent Handover Function  
MIIS - Media Independent Information Service  
MOS - Mean Opinion Score  
NGN - Next Generation Networks

OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplexing

PF - Persistence Factor

PKM - Privacy Key Management

PMP - Point-to-MultiPoint

PSQA – Pseudo Subjective Quality Assessment

QoE - Quality of Experience

QPSK - Quadrature Phase Shift Keying

RS - Relay Stations

RTS - Request to Send

SAP - Service Access Point

SFID - Service Flow Identifier

SS - Subscriber Station

SSID - Service Set Identifier

TCS - Transmission Convergence Sublayer

TDD - Time-Division Duplexing

TxOP - Transmission Opportunity

UPs - User Priorities

Wi-Fi - Wireless Fidelity

WLAN – Wireless Lan Area Network

WMAN - Wireless Metropolitan Area Network

## RESUMO

As Redes da Próxima Geração consistem no desenvolvimento de arquiteturas que viabilizem a continuidade de serviços que proporcionem sempre a melhor conectividade (*Always Best Connectivity - ABC*) aos usuários móveis com suporte adequado à Qualidade de Experiência (QoE) para aplicações multimídia de alta definição, nesse novo contexto as arquiteturas têm perspectiva orientada a serviços e não a protocolos. Esta tese apresenta uma arquitetura para redes da próxima geração capaz de fornecer acesso heterogêneo sem fio e *handover* vertical transparente para as aplicações multimídia. A tese considera diferentes tecnologias sem fio e também adota o padrão IEEE 802.21 (*Media Independent Handover – MIH*) para auxiliar na integração e gerenciamento das redes heterogêneas sem fio. As tecnologias que a arquitetura possui são: IEEE 802.11 (popularmente denominada de WiFi), IEEE 802.16 (popularmente denominada de WiMAX) e LTE (popularmente denominada de redes 4G). O objetivo é que arquitetura tenha a capacidade de escolher entre as alternativas disponíveis a melhor conexão para o momento. A arquitetura proposta apresenta mecanismos de predição de Qualidade de Experiência (*Quality of Experience - QoE*) que será o parâmetro decisivo para a realização ou não do *handover* para uma nova rede. A predição para determinar se haverá ou não mudança de conectividade será feita com o uso da inteligência computacional de Redes Neurais Artificiais. Além disso a arquitetura também apresenta um mecanismo de descarte seletivo de pacotes específico para aplicações multimídia. A proposta é avaliada via simulação utilizando-se o ns-2 (*Network Simulator*) e os resultados de desempenho são apresentados através das métricas de QoS, de QoE e também visualmente através da exibição de frames dos vídeos transmitidos na arquitetura.

**PALAVRAS-CHAVES:** Qualidade de Experiência, MIH, Handover, Aplicações Multimídias.

## ABSTRACT

The Next Generation Networks are architectures that allow vertical handovers and the user-centric vision by the appropriate Quality of Experience (QoE) provisioning for multimedia applications. The discussion is much less protocol-oriented perspective and is more service-oriented perspective. This thesis presents an architecture for next-generation networks to provide wireless heterogeneous access and seamless vertical handover for multimedia applications. The proposal considers different wireless technologies and also adopts the standard IEEE 802.21 (Media Independent Handover – MIH) to assist in the integration and the mobility management of heterogeneous wireless networks. The technologies in architecture are: IEEE 802.11 (popular known as Wi-Fi), IEEE 802.16 (popular known as WiMAX) and LTE (popular known as Fourth Generation – 4G). The objective is to choose the best connection for user. The proposal architecture presents mechanisms to predict quality of experience that will be decisive parameter to do or do not the handover, the prediction will be using artificial intelligence neural networks, in addition to architecture also provides a mechanism for QoE discard packets to specific multimedia applications. The proposal is evaluated by simulation using the ns-2 (Network Simulator) and the performance results are presented through the QoS/QoE metrics and also visually by displaying the video frames transmitted in architecture.

**KEYWORDS:** Quality of Experience, MIH, Handover, Multimedia Applications.

## 1. Introdução

A demanda crescente por novas tecnologias, serviços e conteúdos estão alterando a forma como os usuários acessam a Internet. Devido à flexibilidade oferecida pelas redes sem fio, as operadoras estão sendo obrigadas a fornecer serviços com elevada taxa de transmissão e qualidade para um número cada vez maior de usuários móveis. Este fato tem se tornado realidade devido à popularização de equipamentos com interface sem fio, tais como: *notebooks*, celulares e *palms*.

Além do acesso sem fio, a qualidade do serviço oferecido ao usuário final será um fator decisivo para o sucesso dos provedores de acesso. Atualmente, muitos provedores de acesso realizam suas políticas de decisão de alocação de recursos e controle da qualidade com base em parâmetros tradicionais de QoS (*Quality of Service*) e SLAs (*Service Level Agreements*). Entretanto, o desempenho das aplicações multimídia e o provisionamento de QoS em termos de vazão, atraso, *jitter* e perda já foram bastante estudados em vários trabalhos envolvendo tanto redes cabeadas (MASUGI et al., 2005)( TAKAHATA et al., 2005) quanto redes sem fio (FALLAHI; HOSSAIN, 2007) (ZHENG et al., 2000), servindo atualmente somente como um indicador do desempenho esperado do serviço fornecido e não em relação percepção que o usuário final tem da aplicação.

Com o intuito de resolver as limitações das técnicas tradicionais de controle de qualidade e desempenho da rede, no que diz respeito à percepção humana e aspectos subjetivos relacionados a conteúdos multimídia, uma nova abordagem vem sendo estudada, baseada em métricas de Qualidade de Experiência (QoE - *Quality of Experience*). As operações referentes ao controle de recursos da rede e inclusive mobilidade baseadas em métricas de QoE podem ser usadas para configurar e medir elementos de rede de forma a otimizar os recursos e garantir uma melhor percepção do conteúdo por parte dos usuários finais. Vários pesquisadores e organizações, como: *International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector* (ITU-T) (ITU-R Recommendation BT.500-7, 1990) e *Video Quality Experts Group* (VQEG, 2008) estão estudando formas de aplicar QoE em diferentes cenários fixos e móveis, sendo, porém, ainda considerado um desafio.

Diversas tecnologias atualmente fornecem suporte à Qualidade de Serviço (*Quality of Service – QoS*), porém não há garantias que, em um ambiente heterogêneo, seja possível manter a qualidade dos serviços à medida que o usuário troca de rede devido a sua

mobilidade. E também não há garantias de suporte adequado à Qualidade de Experiência para aplicações multimídia (NKANSAH-GYEKYE, 2007)(KASSAR, 2008) .

As Redes da Próxima Geração são redes baseadas em IP com múltiplas oportunidades de conectividade. A convergência de múltiplas tecnologias tem como objetivo proporcionar o melhor serviço, a disponibilidade de serviço é inerente ao tipo de tecnologia ou ao tipo de rede (AOYAMA, 2009).

Um dos desafios na concepção das redes da próxima geração consiste no desenvolvimento de arquiteturas que viabilizem a continuidade do serviço através do suporte adequado à QoE para aplicações multimídia de alta definição e que proporcionem sempre a melhor conectividade (*Always Best Connectivity - ABC*) aos usuários móveis. Várias são as denominações adotadas para esta rede, como 4G (*Fourth Generation*), NGN (*Next Generation Networks*). Há um consenso de que em qualquer que seja a denominação, o acesso sem fio será heterogêneo (GUSTAFSOON; JONSSON, 2006).

Os cenários de rede sem fio atualmente tem oferecido aos clientes móveis alternativas de conectividade, porém a escolha da melhor conectividade cabe ao usuário escolher manualmente. Na Figura 1, um cenário genérico é representado para exemplificar que conforme a mobilidade de um cliente móvel, podendo o mesmo se encontrar dentro da área de cobertura de mais de uma rede pode optar em qual rede pretende se conectar.

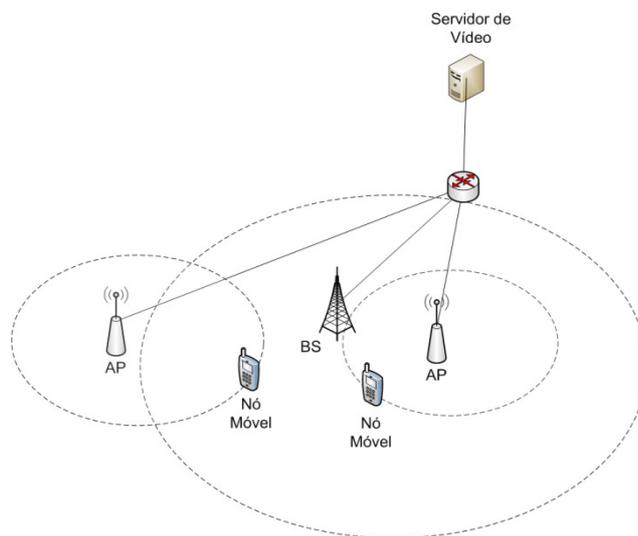


Figura 1 - Cenário genérico de alternativas de conectividade.

Porém, um grande desafio que envolve a mobilidade oferecida aos usuários, é o *handoff* ou *handover* (RAPPAPORT, 1986) de forma transparente, isto é, sem que o usuário perceba degradação na qualidade de sua sessão em andamento à medida que há mudança de ponto de

acesso (AP – *Access Point*) ou estação rádio-base (*BS-Base Station*). Essa troca de AP/BS pode ocorrer por diversos motivos. O motivo mais comum é a degradação do sinal do AP/BS atual, que faz com que o Nó Móvel(NM) procure uma alternativa melhor para continuar a usufruir dos seus serviços. A degradação pode ser tanto decorrente de problemas de rádio-propagação, quanto da mobilidade do usuário. Um determinado cliente móvel que esteja com uma sessão por meio de uma BS e se desloca, poderá mover-se para a área de cobertura de outra BS. Neste caso, a nova BS poderá ser escolhida por oferecer melhor qualidade de enlace ou porque o processo de *handover* é mandatório, uma vez que o usuário perderá a conectividade com a BS atual. Assim, todos os dados que o cliente estivesse recebendo via BS antiga, terão que ser reenviados para a nova BS.

Devido à necessidade da conectividade transparente para os usuários, o IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) desenvolveu e aprovou o novo padrão IEEE 802.21 ou MIH (*Media Independent Handover*). O MIH foi projetado para integrar e gerenciar a mobilidade entre redes sem fio de diferentes tecnologias, bem como para permitir o *handover* horizontal e vertical (*handover* entre tecnologias diferentes) (HEIDARINEZHAD,2009)( HU ,2010).

As novas arquiteturas passam a ser avaliadas baseadas também em métricas de QoE, pois o grande objetivo em qualquer arquitetura é prover o máximo de satisfação para os seus clientes. Com o crescimento e sucesso do uso de aplicações multimídias em dispositivos móveis, como IPTV (*Internet Protocol Television*.) (SHE et al., 2007) ou sites de armazenamento de vídeos , torna-se extremamente importante avaliar o impacto desses tipos de aplicações sob a perspectiva do usuário, já que a qualificação de um vídeo é bastante subjetiva dependendo bastante do ponto de vista e opinião de quem está assistindo o vídeo.

A necessidade de uma arquitetura que proporcione a melhor conectividade considerando a perspectiva, a experiência do usuário é um dos fatores motivantes para esta tese. A discussão para as novas arquiteturas não devem ser apenas do ponto de vista técnico orientada a protocolo e sim orientada a serviço considerando a satisfação, a experiência do usuário para um determinado serviço.

## **1.1 Objetivos**

As arquiteturas da próxima geração devem monitorar os eventos na rede, pois qualquer mudança poderá causar grande impacto na qualidade dos serviços. As arquiteturas

deverão estar preparadas para possíveis eventos a ponto de antecipar determinadas situações para que não haja prejuízo nas aplicações fim – a – fim.

Nesse contexto, o objetivo geral da tese é:

- Propor uma arquitetura com suporte a mobilidade em redes heterogêneas baseado em predição de QoE, a arquitetura monitorará as transmissões de vídeo para estimar qual a qualidade do vídeo em tempo real. As tecnologias possuirão classes de serviço específicas para as aplicações multimídia, assim conforme o usuário se deslocar de uma rede para outra, a arquitetura oferecerá a classe de serviço específica para transmissão de vídeo com o intuito de manter a qualidade.

Os objetivos específicos da tese são:

- Propor uma arquitetura formada pela integração das tecnologias IEEE 802.11e, IEEE 802.16e e LTE ao padrão IEEE 802.21.
- Prover suporte a QoE com o uso de classes de serviços em cenário heterogêneo móvel.
- Elaborar um mecanismo de gerenciamento de mobilidade vertical entre as tecnologias controladas pelo padrão IEEE 802.21.
- Desenvolver um mecanismo de monitoramento e estimação de qualidade de experiência em tempo real através da inteligência computacional rede neural.
- Mecanismo de adaptação de qualidade de experiência através de descarte seletivo de frames de acordo com a ordem de importância de cada frame.
- Transmitir e avaliar as aplicações multimídias de alta definição.
- Avaliar modelo de consumo de energia de bateria não linear.

- Uso de inteligência artificial em dispositivos móveis com múltiplas interfaces para seleção da melhor rede.

## **1.2 Organização do Trabalho**

Este capítulo apresenta uma breve descrição da arquitetura que está sendo proposta nesta tese. Nos capítulos seguintes, os mecanismos serão melhores detalhados acerca de seus funcionamentos e também serão apresentados os resultados que demonstram os benefícios obtidos.

O capítulo 2 descreve os protocolos e tecnologias que são usados na arquitetura, as tecnologias integradas a esta arquitetura são: IEEE 802.11e, IEEE 802.16e, LTE que são gerenciadas pelo protocolo IEEE 802.21 e a técnica de inteligência computacional utilizada no trabalho.

O capítulo 3 aborda os trabalhos relacionados aos assuntos envolvidos nesta tese, realizando um comparativo entres os trabalhos da literatura com esta tese e apresentando as lacunas na literatura, as quais serviram de base para o desenvolvimento da proposta .

O capítulo 4 descreverá de fato a arquitetura que está sendo proposta. Cada mecanismo implementado será explicado com o objetivo de esclarecer o seu funcionamento e como o mesmo foi integrado à arquitetura.

O capítulo 5 mostrará os benefícios da arquitetura através de resultados obtidos via simulação no ns-2. Os resultados foram expressos em métricas tradicionais de QoS, em métricas de QoE e também por captura de frames dos vídeos transmitidos.

Posteriormente no capítulo 6 as conclusões finais desta tese, assim como as referências bibliográficas utilizadas.

## 2. Revisão Bibliográfica

Neste capítulo serão apresentados os padrões das áreas envolvidas nesta tese. Inicialmente são abordados os padrões que foram adotados na arquitetura proposta. Tal arquitetura disponibiliza como tecnologias de acesso: IEEE 802.11e, popularmente conhecida como WiFi, o IEEE 802.16e, popularmente conhecida como WiMAX e também o LTE, amplamente conhecido como rede 4G. As tecnologias estão integradas ao protocolo IEEE 802.21(MIH). Em seguida, são descritos os preceitos de Qualidade de Experiência (QoE) e, ao final é apresentada sinteticamente a técnica de Inteligência Computacional Rede Neural Artificial utilizada como preditor..

### 2.1 IEEE 802.11

O padrão IEEE 802.11 original (IEEE 802.11, 1999) publicado em 1997, foi projetado para redes locais sem fio (*Wireless Local Area Networks* -WLANs). Mais tarde, em 1999, uma organização sem fins lucrativos foi formada com o objetivo de certificar a interoperabilidade de produtos baseados no padrão IEEE 802.11, a *Wi-Fi Alliance*. Através de teste de interoperabilidade, o programa de certificação da *Wi-Fi Alliance* assegura que produtos de diferentes fabricantes funcionem sem problemas. Quando um produto passa nos testes, adquire o direito de carregar o selo global *Wi-Fi CERTIFIED™*. Por isso que o padrão IEEE 802.11 também é conhecido largamente como Wi-Fi (*Wireless Fidelity*), os dois termos são freqüentemente utilizados.

Os dispositivos do padrão IEEE 802.11 operam na faixa não licenciada do espectro eletromagnético, ou seja, nas bandas ISM (*Industrial, Scientific, Medical* - Médica, Industrial, Científica). Existem três bandas ISM em uso atualmente: a banda ISM de 902-908 MHz, a banda ISM de 2,4-2,485 GHz e a banda ISM de 5,734 - 5,860 GHz, sendo que a banda ISM de 2,4 GHz é a mais comumente usada, não só nas WLANs, mas também em muitos outros dispositivos que usam a faixa não licenciada do espectro. Geralmente, os aparelhos que funcionam nas bandas ISM têm transmissores de baixa potência e não são capazes de cobrir mais do que alguns metros, como é o caso das WLANs.

Originalmente, como mostra o Tabela 1, no padrão 802.11 publicado em 1997, foram definidas três técnicas de transmissão na camada física: FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrum* – Espectro de Dispersão com Saltos em Frequência, DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum* – Espectro de Dispersão de Sequência Direta

) e IR (*Infrared light* – Luz Infravermelho). Mais tarde, em 1999, para alcançar maior largura de banda, surgiram duas novas técnicas de transmissão: OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing* – Multiplexação por Divisão Ortogonal de Frequência), usada primeiramente no padrão 802.11a e posteriormente no 802.11g e o HR-DSSS (*High Rate Direct Sequence Spread Spectrum* - Espectro de Dispersão com Sequência Direta de Alta Velocidade) usada no padrão 802.11b.

<b>Padrão</b>	<b>Propósito</b>	<b>Faixa de Frequência</b>
802.11-1999	Padrão IEEE para Especificação Wireless LAN do Controle de Acesso ao Meio (MAC) e Camada Física (PHY)	2 Mbps 2.4 GHz
802.11a	Maior Velocidade pela Extensão da Camada Física (PHY)	54 Mbps 5.0 GHz
802.11d	Operação em Domínio Complementar de Regulamentação. Permite que Dispositivos Estejam em Conformidade com Exigências Regionais	11-54 Mbps 5.0 GHz
802.11e	Aperfeiçoamento da Camada MAC para Oferecer Suporte a QoS	11-54 Mbps 2.4 GHz
802.11g	Extensão para Maior Taxa de Dados	54 Mbps 2.4GHz
802.11i	Aperfeiçoamento de Segurança na Camada MAC	54 Mbps 2.4GHz
802.11n	Aperfeiçoamento para Altas Taxas de Transmissão	600 Mbps 2.4GHz e 5.0GHz

Tabela 1 – Padrões do IEEE 802.11

### 2.1.1 IEEE 802.11e

O padrão IEEE 802.11e (IEEE 802.11e, 2005) modificou a camada MAC para fornecer suporte a QoS. Para oferecer suporte a QoS, o padrão definiu o método: HCF (*Hybrid Coordination Function*) que opera de duas maneiras. O primeiro modo é o EDCA (*Enhanced Distributed Coordinated Access*) um mecanismo baseado em contenção, o segundo modo é o HCCA (*HCF Controlled Channel Access*) um mecanismo livre de contenção. Para esta tese o primeiro modo (que utiliza a técnica EDCA) é o mais recomendado devido o mesmo priorizar determinados serviços ou não. (IEEE draft p802.11e d13.0, 2005)

O EDCA 802.11e possui oito prioridades de usuário (UPs – *User Priorities*) exibido na Figura 2. Os tráfegos são redirecionados a quatro diferentes categorias de acesso (*Access*

*Category- AC's*: voz (AC\_VO), vídeo (AC\_VI), melhor esforço (AC\_BE) e tráfego de fundo (AC\_BK), classificados da maior para menor prioridade, respectivamente.

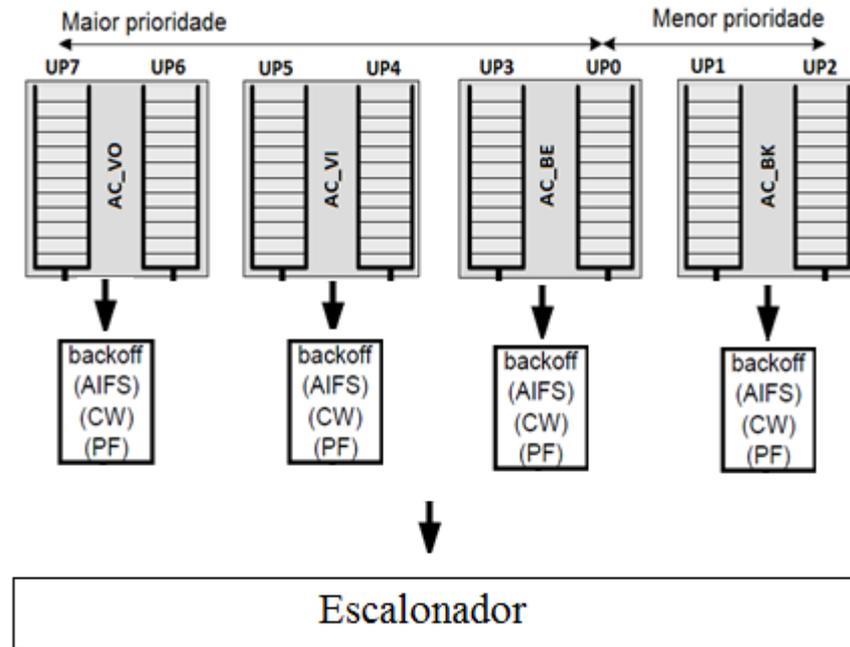


Figura 2 - Filas de prioridades do 802.11e.

A Tabela 2 exemplifica os tipos de tráfegos e quais classes de serviço os mesmos são associados. Em cada categoria de acesso é equipada com uma única fila de transmissão, cuja estratégia utilizada de fila é a de “primeira a entrar, primeiro a sair” (*First In First Out - FIFO*) (MANGOLD et. al., 2002).

Descrição	Exemplo	Categoria de Acesso
BK (Tráfego de Fundo)	FTP	AC_BK
BE (Melhor Esforço)	HTTP e e-mails	AC_BE
VI (Vídeo)	Streaming de Vídeo	AC_VI
VO (Voz)	VoIP	AC_VO

Tabela 2 - Mapeamento entre prioridades de usuário e categorias de acesso.

Quanto menor é a prioridade de uma categoria de acesso, maior será o tempo de espera para transmitir dados. Assim, prioridades baixas têm de diferir por mais tempo o início da transmissão ou decrementar o *backoff* (Sehrawat et. al., 2007).

## 2.2 IEEE 802.16

O IEEE 802.16 é considerado uma solução para redes WMAN (*Wireless Metropolitan Area Network*) para o acesso de banda larga sem fio podendo oferecer até 75 Mbps de taxa de transmissão com cobertura de até 50 km com visada. O padrão IEEE 802.16 também se estende da camada Física e MAC para prover suporte a mobilidade e QoS (IEEE 802.16-2009, 2009).

A camada MAC suporta dois modos de operação Ponto-Multiponto (*Point-to-MultiPoint* – PMP) e *Mesh* (Malha). No modo PMP as SS's (*Subscriber Station* - Estação Assinante) são atendidas pela *Base Station* (BS), ou seja, a SS tem comunicação direta apenas com a BS. No modo *Mesh* além do modo PMP a comunicação também pode ser feita através de uma SS se comunicando diretamente com outra SS

Todo o tráfego de uma rede WiMAX ocorre entre as MACs de entidades pares (entre a MAC da BS e a MAC de uma SS). A conexão é identificada por um CID (*Connection Identifier*) de 16 bits e tem exatamente um fluxo de serviço. O fluxo de serviço é identificado por um SFID (*Service Flow Identifier*) de 32 bits e define o conjunto de parâmetros de QoS para os pacotes trocados na conexão. Os parâmetros de QoS informados são: a largura de banda de *uplink*, o comportamento do escalonador da BS, a prioridade de tráfego, a máxima taxa de tráfego suportada, o tamanho máximo por rajada, a taxa de tráfego mínimo que precisa ser reservada, o tamanho da unidade de dados de serviço, etc.

O padrão IEEE 802.16 define que tanto a Estação Base ou o dispositivo móvel podem iniciar o processo de *handover*. No IEEE 802.16 há três tipos de *handover*: *hard handover* (no qual a quebra de conexão na mudança de uma BS para outra BS) e os opcionais FBSS (*Fast Base Station Switching*) e MDHO (*Macro Diversity handover*). No FBSS e no MDHO as SSs podem ser atendidas por várias BSs. Contudo, no FBSS somente uma BS é responsável pelo envio de dados para o assinante sendo chamada de Estação Base Âncora.

### 2.2.1 IEEE 802.16e

O IEEE 802.16 é orientado a conexão identificando cada *uplink* e *downlink* através do CID. Cada conexão é associada a um *scheduling service*. A Tabela 3 mostra que quando uma CoS (*Class of Service*) é associada a uma conexão, esta conexão também é associada a uma série de parâmetros de QoS pré-definidos pelo padrão. Cada parâmetro é gerenciado usando mensagens DSAs (*Dynamic Service Addition*) e DSCs (*Dynamic Service Change*).

<b>Serviço de Escalonamento</b>	<b>Aplicações Típicas</b>
Unsolicited Grant Service ( <b>UGS</b> )	VoIP sem supressão de silêncio
Extended Real-Time Polling Service ( <b>ertPS</b> )	VoIP com supressão de silêncio
Real-Time Polling Service ( <b>rtPS</b> )	Streaming de áudio ou vídeo
Non-Real-Time Polling Service ( <b>nrtPS</b> )	FTP (File Transfers Protocol)
Best-Effort Service ( <b>BE</b> )	Web browsing, e-mail

Tabela 3 – Classes de Serviço no WiMAX

## 2.3 LTE

A tecnologia *Long Term Evolution* (LTE) vem sendo adotada como padrão para as rede 4G devido a compatibilidade com as redes HSPA (*High Speed Packet Access*) e GSM (*Global System Mobile*) incrementando as taxas de transmissão para 100Mb/s para *download* e 50Mb/s para *uplink* operando em uma banda de frequência de até 20Mhz (DAHLMAN et al, 2011).

A tecnologia LTE utiliza a técnica TDD (*Time Division Duplex*) que utiliza a mesma faixa de frequência para a transmissão e recepção em tempos distintos e por isso tem a desvantagem da transmissão de *downlink* e *uplink* não poderem ocorrer simultaneamente e também utiliza a técnica FDD (*Frequency Division Duplex*) que divide a frequência para poder transmitir e receber ao mesmo tempo (DAHLMAN et al, 2011).

A tecnologia também oferece suporte à mobilidade dos clientes móveis permitindo que mudança de estação base seja transparente. De acordo com o padrão LTE para os clientes móveis com velocidade de até 15km/h o máximo de desempenho deve ser fornecido, para clientes móveis com velocidade até 120km/h de acordo com o padrão a qualidade a ser fornecida deverá ser considerado boa e a velocidade máxima para qual a tecnologia LTE conseguirá oferecer algum tipo de serviço será de 315km/h dependendo da frequência a ser utilizada.

O esquema de transmissão para *downlink* utiliza a técnica OFDM (*Orthogonal Frquency Division Multiplexing*) que possui a vantagem de enviar múltiplos sinais em diferentes frequências, desta forma uma única transmissão com múltiplos sinais tem uma menor ocupação do espectro além de apresentar imunidade quanto aos gerados de multi-

percursos. Um sinal OFDM é um somatório de sub-portadoras ortogonais, sendo que os dados de cada sub-portadora são independentemente modulados.

O esquema de transmissão para *uplink* utiliza a técnica DFT-spread OFDM (DFTS-OFDM) que permite pequenas variações na potência do sinal transmitido e atribuição de largura de banda flexível. A transmissão por um único portador permite uma amplificação de potência que pode significar no aumento da área de cobertura, a comunicação no sentido *uplink* tem menos restrições em relação a recursos e processamento de sinal.

Um dos principais recursos da tecnologia LTE é a transmissão com uso de canal compartilhado, no qual recursos como tempo e frequência são dinamicamente compartilhado entre os usuários. Os escalonadores determinam o tempo e os recursos que são compartilhados. Devido a esse controle os escalonadores são determinantes para um bom desempenho das transmissões. Os escalonadores do LTE escolhem os canais com melhores condições tanto no domínio do tempo, quanto da frequência, já que a alocação de recursos é flexível podendo utilizar a técnica TDD ou FDD.

Um dos principais recursos também da tecnologia LTE é o uso de múltiplas antenas tanto nas estações base quanto nos terminais móveis o que permite um melhor desempenho quando comparado as demais tecnologias. Todos os clientes LTE possuem duas antenas receptoras melhorando a taxa de transmissão para *downlink*. As estações base também utilizam múltiplas antenas melhorando a relação sinal-ruído e ampliando a área de cobertura (SESIA et al, 2011).

A multiplexação espacial, que também é denominado de MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), utilizada no LTE permite melhores condições dos canais e conseqüentemente melhores taxas de transmissão, já que a multiplexação espacial “cria” canais paralelos para as transmissões.

A tecnologia LTE também é baseada na entrega de pacotes com base no endereçamento IP, na Figura 3 a seguir podemos observar a arquitetura LTE, no qual o núcleo da rede é composto por entidade denominada de *Access Gateway* (AGW) que incorpora mais três entidades: *PDN Gateway* (P-GW) responsável pela alocação de IP aos clientes móveis; *Mobility Management Entity* (MME) responsável pela comunicação do núcleo da rede com os clientes móveis com o núcleo da rede para o gerenciamento de mobilidade (*handover*); *Serving Gateway* (S-GW) responsável pelo redirecionamento dos pacotes IP quando os clientes móveis.

Em um arquitetura LTE as estações bases são denominadas de eNodeB (*Evolved Node B*) que possui as atribuições de selecionar a melhor rota, realizar o agendamento dos

pacotes, alocar os recursos para *downlink* e *uplink* para os clientes móveis e principalmente o controle de admissão dos usuários.

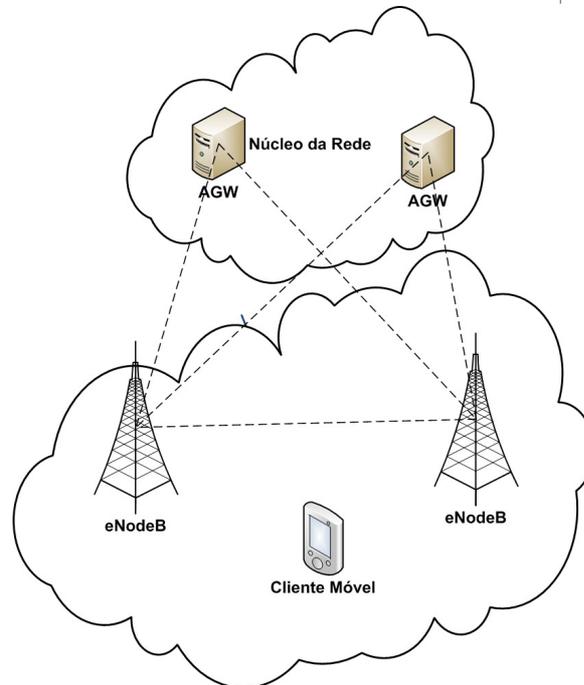


Figura 3 - Arquitetura LTE

A Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) é o órgão regulador do sistema de telecomunicação no território brasileiro, de acordo com a ANATEL a tecnologia LTE no Brasil operará na faixa de frequência de 2,5GHz – 2,69GHz com largura de banda de 20MHz. A faixa de frequência considerada ideal é de 700MHz (faixa de frequência utilizada nos Estados Unidos) que tem um alcance 4 vezes maior e com bem menos antenas do que a faixa de 2,5 GHz – 2,69GHz, porém a faixa de frequência de 700MHz ainda está sendo utilizada para as transmissões analógicas de televisão e estará livre a partir do ano de 2016 (prazo para o fim das transmissões analógicas no Brasil), então o custo inicial para o LTE será maior devido a necessidade de instalação de mais antenas (ANATEL, 2013).

O prazo inicial estabelecido pela ANATEL é que no ano de 2014 a rede 4G esteja operando nas cidades sedes da Copa do Mundo FIFA Brasil. E que também no ano de 2014 esteja operando em todas as capitais e municípios com mais 500 mil habitantes.

## 2.3 IEEE 802.21

O padrão IEEE 802.21 (IEEE P802.21, 2009) é uma camada intermediária entre as camadas superiores e inferiores e sua principal função é coordenar as trocas de informações e comandos entre os dispositivos envolvidos na tomada de decisão e execução do *handover*. O MIH tem como componente principal *MIH Function (Media Independent Handover Function- MIHF)*. O MIHF abrange três tipos de serviços (Figura 4):

- O MIES (*Media Independent Event Service*) é responsável por detectar mudanças ou eventos das camadas de enlace.
- O MICS (*Media Independent Command Service*) fornece um conjunto de comandos para que as camadas superiores locais possam controlar o estado do enlace.
- O MIIS (*Media Independent Information Service*) obtém informações sobre as redes vizinhas.

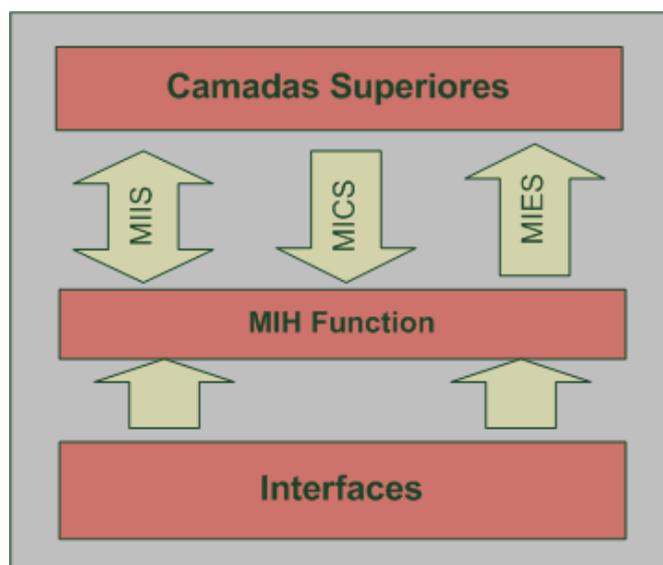


Figura 4 - Estrutura IEEE 802.21

O MIHF se comunica com as camadas inferiores e superiores através de ponto de comunicação denominado *SAP (Service Access Point)*. O *MIH\_SAP* é o que permite que o MIHF se comunique com os usuários MIH (dispositivos móveis e estação base). O

MIH\_SAP é uma interface uniforme através da qual os usuários MIH podem controlar e monitorar os diversos enlaces sem considerar os parâmetros específicos de uma tecnologia de acesso (IETF, 2012).

Os usuários MIH usam protocolos de gerenciamento de mobilidade e as funcionalidades oferecidas pelo MIHF para controlar e recuperar informações relacionadas ao *handover*. Um usuário MIH interessado num determinado evento da camada de enlace, deve primeiramente solicitar junto ao MIHF para receber posteriormente os eventos relacionados. (HUANG, 2009).

### 2.3.1 Media Independent Event Service (MIES)

O IEEE 802.21 suporta *handovers* iniciados tanto pela rede ou pelos dispositivos móveis. Os eventos relacionados ao *handover* podem ser originados na camada de enlace ou MIHF da pilha de protocolos.

Os eventos são divididos em duas categorias: Eventos de Enlace (*Link Events*) e Eventos MIH (*MIH Events*). Os eventos de enlace são gerados pelas camadas de enlace e recebidos pelo MIHF, enquanto que os eventos MIH são os eventos de enlace que são propagados para os usuários MIH através do MIHF. Esses eventos representam mudanças nas características dinâmicas de um enlace, tais como o estado ou a qualidade de um enlace. Esses eventos podem ser eventos locais ou remotos. Um evento local é entregue pelo MIHF local para as camadas superiores dentro da mesma pilha de protocolos, e um evento remoto é entregue para um MIHF remoto através de mensagens definidas no protocolo MIH. Em seguida, o MIHF remoto entrega o evento MIH para o usuário MIH correspondente na pilha de protocolos remota.

O MIES pode suportar vários tipos de eventos:

- Eventos da camada física e da camada MAC: são os eventos que informam sobre uma mudança no estado da camada física ou da camada MAC. Exemplos são os eventos *Link Up* e *Link Down* que indicam quando uma interface foi ativada ou desativada, respectivamente.

- Eventos de parâmetros de enlace: são os eventos gerados por mudanças nos parâmetros de um enlace.
- Eventos de transmissão de enlace: Esses eventos informam o status da transmissão das PDUs (*Protocol Data Unit* – Unidade de Dados de Protocolo) das camadas superiores que é executada pelas camadas inferiores. Por meio desses eventos, as camadas superiores podem permanecer informadas sobre as perdas de pacotes em um *handover* em andamento.

### 2.3.2 Media Independent Command Service (MICS)

O MICS fornece comandos para que as camadas superiores determinem o estado do enlace para viabilizar o processo de *handover*. Um conjunto de comandos foi definido no padrão para permitir que os usuários MIH controlem a configuração e o comportamento das camadas inferiores. Tais comandos podem ser locais ou remotos.

Os comandos locais são originados por usuários MIH, propagados para o MIHF, e em seguida propagados do MIHF para as camadas inferiores locais. Os comandos remotos são enviados de um MIHF local para um MIHF remoto através das mensagens do protocolo MIH, e em seguida propagados do MIHF remoto para o receptor remoto correspondente. Esta característica do padrão permite a existência de um *handover* controlado por rede. Por exemplo, uma entidade da rede pode encaminhar comandos MIH para um dispositivo móvel para forçá-lo a executar um *handover*.

Os comandos podem ser classificados dentro de duas principais categorias: comandos MIH (*MIH commands*) e comandos de enlace (*Link commands*). Os comandos MIH são originados nos usuários MIH e enviados para o MIHF, enquanto que os comandos de enlace são os comandos originados no MIHF de um usuário e é encaminhado para a interface local apropriada.

### 2.3.3 Media Independent Information Service (MIIS)

O MIIS tem como objetivo que um MIHF de um usuário consiga reunir informações sobre as outras redes dentro de uma área geográfica. Essas informações das redes heterogêneas nas áreas de interesse dos clientes móveis facilitam o processo de *handover* vertical. Em outras palavras, o MIIS fornece informações essenciais que podem afetar o

processo de seleção da rede apropriada durante o *handover*. O MIIS pode obter informações sobre redes vizinhas sem a necessidade de ligar à interface correspondente a rede de que se deseja obter informações, ou seja, as informações de todas as redes vizinhas podem ser reunidas através de uma única interface de rede.

O MIIS é baseado em IEs (*Information Elements*) que são divididos nos seguintes grupos:

- Informações específicas das redes de acesso: IEs que fornecem informações específicas para cada tecnologia e operador. Essas informações podem ser relacionadas às características de segurança da rede, qualidade de serviço suportada, custo, etc.
- Informações específicas do ponto de acesso: IEs que fornecem informações para cada ponto de acesso de cada rede e operador. Essas informações compreendem o endereço MAC do ponto de acesso, localização geográfica, taxa de dados, canais em uso, etc.
- Informações de serviços para camadas superiores por ponto de acesso: Essas informações são relacionadas aos serviços disponíveis no ponto de acesso, que incluem o número de subredes suportadas, os métodos de configuração IP disponíveis, etc.

## 2.4 Qualidade de Experiência

Os humanos são criaturas com uma grande capacidade de percepção visual. O Sistema Visual Humano (SVH) é um sistema bastante complexo, porém bastante eficaz, desde a recepção da imagem nos olhos até a condução da informação visual ao cérebro. No cérebro as informações visuais são processadas extraindo-se características como: cor, luminosidade e contraste. A avaliação de tais características depende bastante da sensibilidade humana. Portanto, uma determinada imagem pode ser agradável para alguns e desagradável para outros (WINKLER, 2005).

O SVH tem servido de base para os novos critérios de avaliação das novas arquiteturas de redes. O sucesso das redes da próxima geração permitiu a crescente demanda das aplicações multimídias na Internet (IPTV, streaming de vídeo, aplicações de áudio e vídeo). Diante deste fato surgiu a necessidade de avaliar o impacto dessas aplicações perante o

usuário final e, por conseguinte, exige novo arcabouço de métricas qualitativas e quantitativas relacionadas à experiência do usuário (WANG et al., 2011).

O conceito de Qualidade de Experiência está relacionado à avaliação das aplicações multimídia do ponto de vista da percepção do usuário. O termo surgiu para suprir as “lacunas” deixadas pela avaliação tradicional realizada pelas métricas de QoS tais como: vazão, *jitter* e atraso, que avaliam o impacto das aplicações do ponto de vista da rede para suprir tais requisitos de desempenho. As métricas de QoS não refletem a experiência do usuário diante de um vídeo, não permitindo afirmar se a qualidade do vídeo recebido pelo mesmo pode ser qualificada como boa. Pois, em se tratando de avaliações de aplicações multimídias, a sensibilidade humana é primordial.

Os resultados obtidos através dos estudos baseados em métrica de QoE podem servir como extensão das análises de QoS, melhorando o controle de operações nas arquiteturas de redes e os protocolos ou, até mesmo, impulsionando a criação de novos protocolos. Conseqüentemente, melhorando os serviços das aplicações multimídia. Essa tem sido uma forte tendência e dois grupos de pesquisa vêm se destacando: *International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector* (ITU-T) e *Video Quality Experts Group* (VQEG) (ITU-R Recommendation P.800-1, 2012).

#### **2.4.1 Avaliação Subjetiva**

As métricas subjetivas de QoE avaliam a qualidade das aplicações multimídias baseado na opinião do usuário. O usuário qualifica o vídeo de acordo com a experiência que teve diante do mesmo. Essa qualificação é feita através de uma “nota” atribuída pelo usuário ao vídeo. As métricas subjetivas dependem exclusivamente da opinião/avaliação do usuário final, opinião ao qual é importantíssima, pois o grande objetivo é justamente melhorar os serviços para os clientes finais. A métrica subjetiva mais popular é *Mean Option Score* (MOS) cujo sua escala varia de 1 a 5 (Tabela 4). Sendo que a atribuição do valor 5 indica excelente qualidade da aplicação, enquanto o valor 1 indica péssima qualidade da aplicação. A Tabela 4 mostra a escala de valores de MOS com a sua respectiva qualificação ( ITU-R Recommendation P.800, 1996)( ITU-R Recommendation P.910, 1999).

MOS	Qualidade
5	Excelente
4	Bom
3	Regular
2	Pobre
1	Péssimo

Tabela 4–Escala de qualidade MOS

### 2.4.2 Avaliação Objetiva

As métricas objetivas de QoE estimam a qualidade do vídeo recebido pelo usuário através de modelos matemáticos quantitativos, cujos valores computados são mapeados em valores subjetivos de qualidade. As principais métricas são: *Peak Signal to Noise Ratio* (PSNR), *Structural Similarity Index* (SSIM) e *Video Quality Metric* (VQM).

#### 2.4.2.1 Peak Signal to Noise Ratio

O PSNR é a métrica objetiva mais tradicional e compara a qualidade do vídeo recebido pelo usuário em relação ao vídeo original. O PSNR é derivado de outra métrica denominada de *Mean Squared Error* (MSE). O MSE calcula a média de erro variação de um atributo real em relação ao qual esse mesmo atributo foi estimado. Em outras palavras, compara a qualidade do frame recebido pelo usuário em relação ao frame original. O valor de MSE pode ser obtido através da seguinte fórmula (MALKOWSKI; CLABEN, 2008).

$$MSE = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} \|Y_s(i, j) - Y_d(i, j)\|^2 \quad (1)$$

Onde:

$M \times N$  = É quantidade de pixels do frame

$Y_s(i, j)$  = Posição (linha, coluna da matriz) do pixel no frame original

$Y_d(i, j)$  = Posição (linha, coluna da matriz) do pixel no frame recebido

O PSNR é uma derivação do MSE em relação ao valor máximo de luminosidade (grau de claridade ou escuridão) para cada pixel. Considerando 8 bits por pixel, obtém-se 255 ( $2^8 - 1$ ) valores de luminosidade. O valor do PSNR é obtido através da seguinte fórmula, na escala logarítmica:

$$PSNR = 20 \log_{10} \left( \frac{255}{\sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} \|Y_s(i, j) - Y_d(i, j)\|^2}} \right) \quad (2)$$

O PSNR é a métrica mais popular, porém não a mais completa, pois indica apenas a diferença dos frames recebidos em relação aos frames originais, desconsiderando características importantes do SVH. O valor de PSNR é expresso em dB (decibel). Para que um vídeo seja considerado de boa qualidade deve ter um valor médio de PSNR no mínimo de 30dB. Essa afirmação é baseada no mapeamento de valores de PSNR para MOS. Veja na Tabela 5 o mapeamento PSNR para MOS (Jain, 2004).

PSNR (dB)	MOS
> 37	5 (Excelente)
31 – 37	4 (Bom)
25 – 31	3 (Regular)
20 – 25	2 (Pobre)
< 20	1 (Péssimo)

Tabela 5 - Mapeamento PSNR para MOS

#### 2.4.2.2 Structural Similarity Index (SSIM)

O SSIM, diferentemente do PSNR que apenas analisa a taxa de erro do vídeo recebido em relação ao vídeo original, avalia o vídeo recebido levando em consideração as características do SVH. O SSIM analisa a similaridade de cores, luminosidade e estrutura. Essa métrica surgiu pelo fato do SVH ser altamente eficiente em extrair informações visuais das imagens/vídeos e não em extrair taxa de erro (UEMURA et al, 2008).

Os valores extraídos do frame recebido pelo usuário e do frame original são armazenados em vetores separadamente, um vetor para luminosidade, outro vetor para estrutura e um vetor para cor. Posteriormente, obtém - se a média de cada vetor e a combinação dessas três médias gera o valor do SSIM, indicando a qualidade do vídeo. O valor de SSIM é obtido através da seguinte fórmula (WANG, 201):

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + c_1)(2cov_{xy} + c_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)} \quad (3)$$

Onde:

$\mu_x$  é média de  $x$  ;

$\mu_y$  é a média de  $y$  ;

$\sigma_x^2$  é a variância de  $x$ ;

$\sigma_y^2$  é a variância de  $y$  ;

$cov_{xy}$  é a covariância de  $y$  ;

$c_1 = (k_1L)^2$ ,  $c_2 = (k_2L)$  são duas constantes ;

$L$  o valor máximo que pode ser atribuído a cada pixel;

$k_1 = 0,01$  e  $k_2 = 0,03$  por padrão.

O valor de SSIM é expresso como um valor decimal entre 0 e 1. Quanto mais próximo do 0, pior é a qualidade do vídeo; quanto mais próximo de 1, melhor é a qualidade do vídeo. No caso em que o valor é igual a 1, o vídeo recebido pelo usuário corresponde em 100% ao vídeo original (TAKAHASHI et al, 2008).

#### 2.4.2.3 Video Quality Metric (VQM)

A métrica VQM foi desenvolvida pelo *The Institute for Telecommunication science* (ITS). Esta métrica é mais completa que PSNR e SSIM, pois avalia a distorção das cores, dos

pixels, ruído, se o vídeo está “borrado”. Essa combinação de fatores gera a métrica VQM. Desta forma o VQM se aproxima da forma de avaliação de imagens e vídeos feita pelo SVH (FERRUS, 2006).

A métrica, assim como as demais, baseia-se na comparação do vídeo recebido pelo usuário em relação ao vídeo original, comparando o brilho e o contraste. A primeira etapa consiste na “calibração”. Nessa etapa, o contraste e o brilho dos vídeos são comparados. A segunda etapa consiste na comparação do alinhamento espacial. Verifica-se a posição no eixo horizontal e vertical de ambos os vídeos. A terceira etapa consiste em analisar a quantidade de pixels perdidos em relação ao vídeo original. A quarta etapa refere-se ao alinhamento temporal que compara o tempo no qual cada frame foi recebido em relação ao tempo no qual o mesmo deveria ter sido recebido. Esta etapa consiste em avaliar o atraso do vídeo recebido pelo usuário.

Por avaliar tais características citadas anteriormente, VQM é a métrica que mais se aproxima do SVH. O valor VQM é expresso em um número real e quanto mais próximo o valor for de 0, melhor será a qualidade do vídeo, o que indica uma menor distorção em relação ao vídeo original (NIRANJAN et al, 2000).

## **2.5 Predição**

Esta tese utilizou uma técnica de inteligência computacional que avalie as características da própria arquitetura para que a decisão de escolha da melhor conectividade seja feita, ou seja, uma predição sobre eventos futuros na arquitetura será feita para a tomada de decisão. Na etapa de desenvolvimento de proposta da tese, a técnica de inteligência computacional escolhida foi Rede Neural.

### **2.5.1 Rede Neural**

Uma Rede Neural (RN) é um sistema computacional inspirado em neurônios biológicos que toma decisão com base em aprendizado adquirido anteriormente, as entradas de um sistema alimentam uma rede neural para que seja escolhida a saída mais adequada. Uma rede neural por ser um sistema dinâmico é aconselhada para aplicações em tempo real. As Redes Neurais foram inspiradas na estrutura do cérebro justamente pela capacidade de adquirir, armazenar e utilizar o conhecimento (EBERHART, 2001).

As principais características de uma Rede Neural são:

- 1) Generalização: A Rede Neural produz saídas para as entradas que não estavam no treinamento.

- 2) Mapeamento Entrada – Saída: Através de um conjunto de amostras na fase de treinamento a rede neural tem a capacidade de realizar o mapeamento entre as entradas e saídas.
- 3) Adaptabilidade: A rede possui a capacidade de adaptação conforme as mudanças no meio.
- 4) Tolerância a falhas: Devido a capacidade de adaptação as saídas representam um resultado conforme as mudanças que ocorrem na rede.
- 5) Analogia Neurobiológica: Estrutura e funcionamento analógico ao cérebro humano.

Uma rede neural é composta de elementos denominados de neurônios conectados entre si, um conjunto de neurônios que formam camadas. Cada neurônio é independente dos demais e recebe valores de entrada e processam em uma operação matemática pré-definida para gerar os valores de saída. Os valores iniciais de entrada em uma rede neural representam um problema a ser otimizado, a rede neural gera uma saída com valores aceitáveis que otimizam o problema.

As entradas em uma rede neural representam o estado atual de um determinado problema e as saídas processadas representam o estado desejado como solução do problema.

Uma rede neural tem uma etapa chamada de treinamento, essa etapa consiste em adquirir conhecimento a partir das informações do próprio ambiente, as conexões entre os neurônios são utilizadas para armazenar o conhecimento adquirido. Nessa fase de treinamento a rede neural analisa o comportamento do ambiente de acordo os valores de entrada do momento, com base nessas informações é realizado um mapeamento de entrada-saída.

As conexões entre neurônios podem ter valores que determinam o peso. As conexões armazenam informações da rede, sendo que os pesos são determinados pela própria rede neural, sendo que os valores dos pesos são adaptados durante o processamento, quando maior o número de conexões entre os neurônios, maior será a redundância aumentando a confiabilidade. Um neurônio é independente dos demais essa característica permite que uma rede neural tenha habilidade de aprender devido ao processo não-linear.

Três princípios básicos em uma rede neural são: Topologia, Adaptação e Realimentação. A topologia é a forma como a rede neural é organizada em camadas e como essas camadas estão conectadas entre si. A adaptação significa como a rede está configurada para armazenar as informações. E realimentação é como uma informação armazenada anteriormente é reinserida na rede neural.

Uma grande característica da rede neural é a adaptabilidade já que os valores de entrada não são constantes durante o tempo, há uma realimentação de novos valores em intervalos de tempo. Desta forma é possível prever o comportamento futuro levando em consideração um comportamento passado similar ao comportamento atual. A Figura 5 mostra um esquema básico de rede neural.

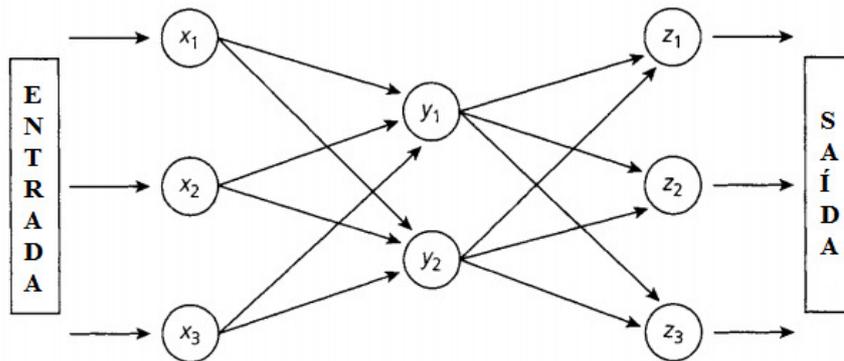


Figura 5 - Rede Neural

Um dos tipos de Rede Neural é a *backpropagation* no qual a rede é treinada com pares entradas – saídas, para cada entrada é associada uma saída desejada. O treinamento ocorre em duas fases em sentidos de propagação diferente. As fases de treinamento em uma rede *backpropagation* são: *Forward* e *Backward*.

A fase *forward* é caracterizada por um conjunto de dados que é propagado no sentido da rede para produzir uma saída conforme a entrada em questão, nesta fase não ocorre reajuste dos pesos das conexões, porém é produzido um sinal de erro quando há uma variância entre a saída produzida em relação a saída desejada.

A fase *backward* propaga de volta o sinal de erro produzido utilizando os mesmos neurônios da fase anterior, este sinal de erro emitido no sentido inverso da rede permite que os pesos das conexões sejam atualizados para que a próxima saída seja mais próxima do valor desejado. As fases *forward* e *backward* compõem um ciclo, sendo que a cada ciclo o erro quadrático médio deverá diminuir até atingir um mínimo pré-estabelecido determinando o momento de convergência da rede.

Quanto menor o valor da taxa de aprendizado menor serão as variações dos pesos das conexões tornando o aprendizado lento, quanto maior o valor da taxa de aprendizado maior serão as variações dos pesos das conexões o que pode tornar a rede instável.

Há três condições de parada na fase de treinamento: Número de ciclos de treinamento, Valor de erro, Critério de validação. Número de ciclos de treinamento: o treinamento é encerrado após um determinado número de ciclos. Valor de Erro: o treinamento termina quando o valor de erro é menor ou igual ao valor pré-determinado. Critério de validação: O treinamento é parado quando o erro no conjunto de validação para de decrescer.

O auxílio da rede neural para projetar um comportamento final de uma aplicação está associado ao conceito de *Pseudo Subjective Quality Assessment* (PSQA) que com base nas informações de entrada estipula um valor para MOS (*Mean Opinion Score*). Com base nos resultados de treinamento da rede neural é possível determinar se as atuais condições de conexão oferecerão uma boa qualidade de experiência ao usuário.

A avaliação subjetiva de qualidade não é algo simplório principalmente quando nos referimos às aplicações multimídias conforme já explicado anteriormente. As redes neurais têm importante papel de predição como solução de problemas. Em ambientes de rede sem fio heterogênea as características (condições) como: vazão, perda, atraso, *jitter*, etc, são informações que podem alimentar uma rede neural para projetar o comportamento final de uma aplicação.

## 2.6 Considerações Finais

Este capítulo descreveu os protocolos utilizados na arquitetura, explicando as principais características do IEEE 802.11e com o devido suporte de classes de serviço, o IEEE 802.16e que também possui suporte de classes de serviço e a tecnologia LTE que tem suporte para altas taxas de transmissão e por fim aborda o protocolo IEEE 802.21, responsável pela comunicação das camadas MAC de diferentes tecnologias com as camadas superiores da pilha de protocolos TCP/IP. O capítulo apresentou também as principais métricas de QoE e a técnica de inteligência computacional Rede Neural. O capítulo seguinte abordará sobre os trabalhos relacionados.

### 3. Trabalhos Relacionados

Este capítulo descreve os trabalhos relacionados aos temas envolvidos nesta tese. Os trabalhos serão analisados considerando os seguintes tópicos: trabalhos relacionados à QoE e trabalhos relacionados redes 4G .

#### 3.1 Trabalhos Relacionados a QoE

A importância da utilização das métricas de QoE como parâmetro na tomada de decisão nas novas arquiteturas de rede é discutido no (BROOKS, 2010). O artigo introduz como as novas arquiteturas devem ser desenvolvidas para dar suporte a QoE, apresentando soluções, como monitorar as aplicações de vídeos para estimar a qualidade, porém não aborda situações de congestionamento na rede e nem mesmo considera o *handover* como uma alternativa de obter melhores condições de conexão e também não aborda sobre as redes 4G justamente voltadas para um suporte a QoE dos usuários.

O artigo (YANG et al, 2009) faz um comparativo entre as tecnologias WiMAX e LTE destacando as características de cada uma, principalmente o bom desempenho de transmissão para áreas de coberturas extensas. Os resultados apresentados são apenas de métricas de QoS e não considera a possibilidade de um gerenciamento de mobilidade entre as duas tecnologias com o intuito de oferecer a melhor conectividade.

O artigo (CHERIF et al, 2011) explica a importância do monitoramento de QoE nas novas arquiteturas e por isso utiliza o PSQA (*Pseudo Subjective Quality Assessment*) baseado em redes neurais que faz o mapeamento da avaliação subjetiva do usuário as condições de transmissão da rede com base em atraso, vazão. Diferente da proposta aqui apresentada que leva em consideração na rede neural características específicas de vídeos como a ordem de relevância dos frames I, P e B e que faz o mapeamento da qualidade do vídeo com base além da avaliação subjetiva do usuário com métricas objetivas SSIM e VQM e que também leva em consideração o gerenciamento de mobilidade para oferecer a melhor conectividade aos usuários.

#### 3.2 Redes 4G

O artigo (Qinghua Li et al, 2010) aborda sobre a técnica de múltiplas antenas (MIMO –*Multiple Input Multiple Output*) utilizada na tecnologia LTE explicando que a

mesma é um dos fatores que permitem que uma rede 4G tenha uma taxa de *download* e *upload* maior do que outras tecnologias, já que a transmissão e recepção é feita por múltiplas portadores em diferentes frequências. Porém o artigo não aborda sobre suporte a mobilidade e nem o suporte as aplicações multimídias e conseqüentemente não aborda sobre a importância da qualidade de experiência ao usuário.

O artigo (GHOSH et al, 2010) dá uma visão geral e descrições sobre os conceitos e os recursos da camada física da tecnologia LTE, o mesmo também apresenta e discute resultados de desempenho para transmissões e aborda sobre o suporte que a tecnologia oferece a mobilidade transparente aos usuários. Uma das principais características da tecnologia que é o suporte as aplicações multimídias de alta definição não é abordada e nem expressa por meio de resultados.

O artigo (ASTELEY et al, 2009) aponta a tecnologia LTE como a evolução para a comunicação móvel explicando as principais características da tecnologia como flexibilidade de espectro, controle de interferência entre as células de cobertura e o uso de múltiplas antenas. O bom desempenho da tecnologia comparada as demais tecnologias foi comprovado por meio de simulações com transmissões *downlink* e *uplink*, porém não houve simulações de avaliação de QoE.

O artigo (ANAS et al, 2007) aborda sobre o gerenciamento de mobilidade em uma arquitetura LTE, o artigo propõe um mecanismo de *handover* com base em medições na intensidade do sinal para disparar a mudança de conexão com a nova estação base, a antecipação de *handover* antes da degradação do sinal mantém uma boa qualidade para as aplicações. Porém o artigo não faz uma avaliação de *handover* vertical e nenhuma avaliação de qualidade de experiência.

Em (CHANG et al, 2010) há uma avaliação das tecnologias WiMAX e LTE que nos últimos anos impulsionaram a comunicação móvel com altas taxas transmissões e proporcionando qualidade aos serviços oferecidos aos clientes. As tecnologias possuem características em comum e por isso ambas tem impulsionado o mercado de telecomunicações. Apesar do artigo fazer um levantamento sobre as tecnologias o mesmo não apresenta resultados via simulação ou *testbed* sobre o desempenho das mesmas e não aborda sobre o avanço das transmissões de aplicações multimídias nas novas arquiteturas.

Em (ANDI et al 2010) foi proposto uma arquitetura de gerenciamento de mobilidade com suporte a QoS em redes sem fio heterogêneas. A arquitetura utiliza o MIH e com base nas informações da camada de enlace. Porém os autores não avaliaram cenários móveis com

transmissões de aplicações multimídias e conseqüentemente não há avaliação da arquitetura com base nas métricas de QoE.

No artigo (QIU et al, 2011) aborda sobre uma arquitetura LTE e propõe um mecanismo de congestionamento através do controle da janela de deslizamento do protocolo TCP e as aplicações são divididas por classes de serviço. Os resultados compraram os benefícios da tecnologia e dos mecanismos propostos mas não houve nenhuma abordagem quando a mobilidade dos usuários nas redes, avaliação de *handover*, também não houve estudo sobre o desempenho de aplicações multimídias e nem avaliação de QoE.

Em (PIRO et al, 2011) foi avaliada uma arquitetura LTE com resultados de simulação. Os autores implementaram um simulador com as características da tecnologia e obtiveram resultados de vazão em cenários com mobilidade aleatória dos usuários. O artigo não avalia a qualidade de experiência e nem propõe uma arquitetura com alternativas de conectividade.

O artigo (LIOU et al, 2013) aborda especificamente sobre o gerenciamento de mobilidade em redes LTE, o estudo foi realizado por meio de um modelo analítico com base nas informações de localização dos usuários e na duração das chamadas. O modelo analítico minimiza o impacto da mobilidade para as aplicações. Porém não há uma avaliação em métrica de QoE que demonstrem a eficácia do modelo proposto.

O artigo (GUPTA et al, 2013) é um levantamento sobre o impacto das novas arquiteturas no consumo de energia devido a oportunidade de conectividades e de serviços disponíveis serem cada vez maior. O foco do artigo é debater sobre os principais desafios para a economia de energia dos dispositivos móveis diante das novas arquiteturas de comunicação.

A tabela 6 resume os trabalhos relacionados a esta tese encontrados na literatura.

	<b>Artigo</b>	<b>Proposta</b>	<b>Lacuna</b>
<b>Qualidade de Experiência</b>	(BROOKS, 2010)	O artigo introduz como as novas arquiteturas devem ser desenvolvidas para dar suporte a QoE.	Não aborda situações de congestionamento na rede e nem mesmo considera o <i>handover</i> como uma alternativa de obter melhores condições de conexão.
	(YANG et al, 2009)	O artigo faz um comparativo entre as tecnologias WiMAX e LTE destacando as características de cada uma.	Os resultados apresentados são apenas de métricas de QoS e não considera a possibilidade de um gerenciamento de mobilidade entre as duas tecnologias.

	(CHERIF et al, 2011)	O artigo explica a importância do monitoramento de QoE nas novas arquiteturas e por isso utiliza o PSQA ( <i>Pseudo Subjective Quality Assessment</i> ) baseado em redes neurais.	Não leva em consideração as características do vídeo na rede neural.
Redes 4G	(ASTLEY et al, 2009)	O artigo aponta a tecnologia LTE como a evolução para a comunicação móvel explicando as principais características da tecnologia.	Compara o LTE com as demais tecnologias, porém não teve avaliação de QoE.
	(QINGHUA Li et al, 2010)	Técnica de múltiplas antenas (MIMO – <i>Multiple Input Multiple Output</i> ) utilizada na tecnologia LTE	O artigo não aborda sobre suporte a mobilidade e nem o suporte as aplicações multimídias.
	(GHOSH et al, 2010)	Visão geral e descrições sobre os conceitos e os recursos da camada física da tecnologia LTE.	Uma das principais características do LTE que é o suporte as aplicações multimídias de alta definição não é abordada e nem expressa por meio de resultados.
	(ANAS et al, 2007)	O artigo aborda sobre o gerenciamento de mobilidade em uma arquitetura LTE.	O artigo não faz uma avaliação de handover vertical e nenhuma avaliação de qualidade de experiência
	(CHANG et al, 2010)	Uma avaliação das tecnologias WiMAX e LTE que nos últimos anos impulsionaram a comunicação móvel com altas taxas transmissões.	O artigo não apresenta resultados via simulação ou <i>testbed</i> sobre o desempenho das mesmas e não aborda sobre o avanço das transmissões de aplicações multimídias nas novas arquiteturas
	(ANDI et al 2010)	Uma arquitetura de gerenciamento de mobilidade com suporte a QoS em redes sem fio heterogêneas.	O artigo não avaliou cenários móveis com transmissões de aplicações multimídias e conseqüentemente não há avaliação da arquitetura com base nas métricas de QoE.
	(QIU et al, 2011)	Aborda sobre uma arquitetura LTE e propõe um mecanismo de congestionamento através do controle da janela de deslizamento do protocolo TCP e as aplicações são divididas por classes de serviço.	Não houve nenhuma abordagem quando a mobilidade dos usuários nas redes, avaliação de <i>handover</i> , também não houve estudo sobre o desempenho de aplicações multimídias e nem avaliação de QoE
	(PIRO et al, 2011)	Uma avaliação de uma arquitetura LTE com resultados de simulação baseado em métricas de Qualidade de Serviço.	O artigo não avalia a qualidade de experiência e nem propõe uma arquitetura com alternativas de conectividade

(LIOU et al, 2013)	O artigo aborda especificamente sobre o gerenciamento de mobilidade em redes LTE, o estudo foi realizado por meio de um modelo analítico com base nas informações de localização dos usuários e na duração das chamadas.	Não há uma avaliação em métrica de QoE que demonstrem a eficácia do modelo proposto
(GUPTA et al, 2013)	O artigo é um levantamento sobre o impacto das novas arquiteturas no consumo de energia devido a oportunidade de conectividades e de serviços disponíveis serem cada vez maior.	O foco do artigo é debater sobre os principais desafios para a economia de energia dos dispositivos móveis diante das novas arquiteturas de comunicação

Tabela 6 - Trabalhos relacionados

Em nenhum dos trabalhos relacionados foram encontradas arquiteturas que fornecem a melhor conectividade em ambientes de redes sem fio heterogêneas com base na experiência do usuário diante das aplicações multimídias oferecendo classes de serviço específicas.

### 3.3 Considerações Finais

Este capítulo discutiu alguns dos trabalhos relacionados ao tema desta dissertação e os separou em dois subgrupos de acordo com temas relativos. Esta seção descreveu trabalhos que implementaram diferentes mecanismos de suporte a qualidade de experiência e descreveu também trabalhos com foco nas novas arquiteturas de redes heterogêneas 4G. Artigos que ao longo da pesquisa serviram de referencial teórico a te mesmo comparativos em relação ao tema proposto nesta tese. O capítulo seguinte discutirá sobre a arquitetura proposta e sobre os mecanismos implementados.

## 4. Arquitetura de Predição de Qualidade de Experiência em Redes Heterogêneas

Este capítulo apresenta a arquitetura proposta que tem como objetivo manter a qualidade da aplicação multimídia mesmo após o *handover* vertical. O mecanismo de QoE Híbrido que realiza a medição de QoE em tempo real durante a transmissão, fator que será usado pela arquitetura na tomada de decisão. E o mecanismo de adaptação de QoE, para que em situação de congestionamento a aplicação multimídia não seja degradada através do descarte de pacotes.

A arquitetura levará em consideração parâmetros da camada física de cada tecnologia, o protocolo MIH com gerenciamento de mobilidade funcionará como uma camada intermediária entre as camadas físicas de cada tecnologia com as camadas superiores. Conforme o serviço solicitado pelo usuário uma classe de serviço será oferecido pela arquitetura. A Figura 6 exibe a pilha de protocolo TCP/IP com as funcionalidades de cada camada.

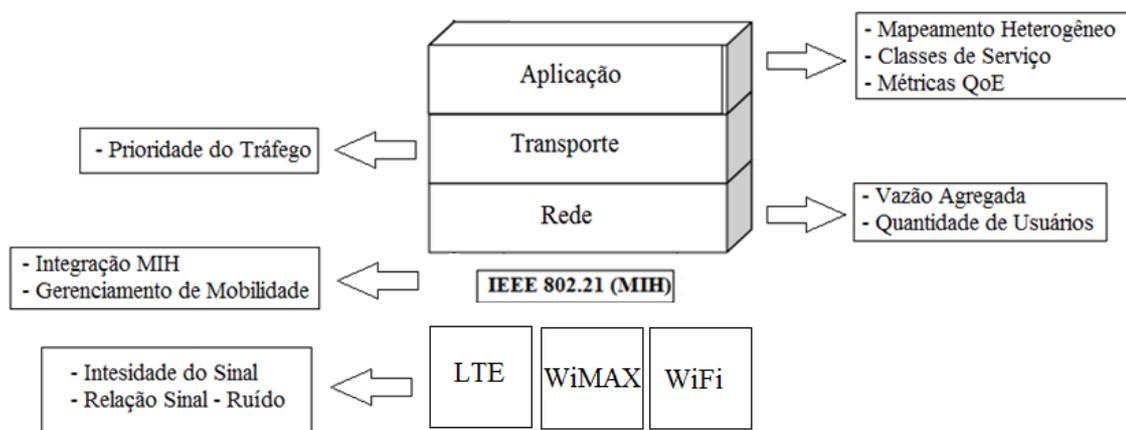


Figura 6 - Pilha de Protocolo TCP/IP

A Figura 7 apresenta uma visão geral da arquitetura, no qual um usuário móvel com múltiplas interfaces (LTE, WiMAX e WiFi) poderá se deslocar entre redes vizinhas heterogêneas, principalmente com o objetivo de manter a qualidade durante todo percurso do usuário.

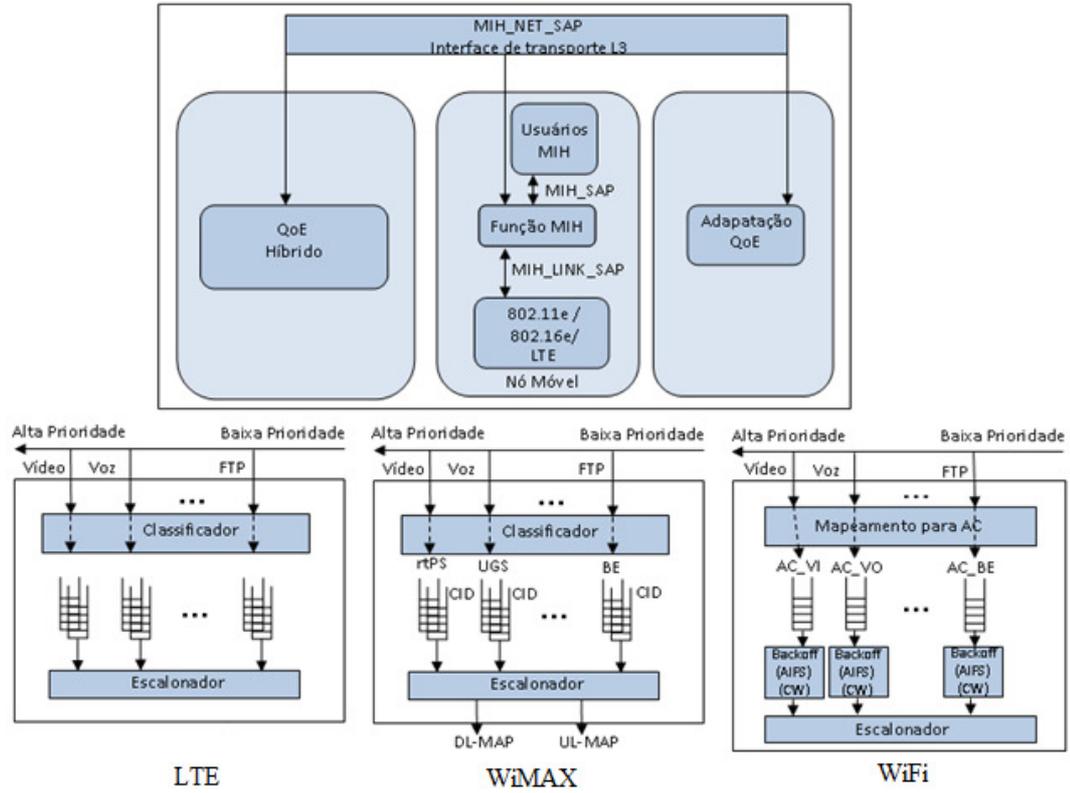


Figura 7 - Visão geral da arquitetura

#### 4.1 QoS Heterogêneo.

A integração do MIH (padrão 802.21) com as tecnologias de acesso WiMAX (padrão 802.16e), Wi-Fi (padrão 802.11e) e LTE é demonstrado na Figura 8 que mostra a arquitetura interna do nó móvel em interação com a camada MAC das tecnologias WiMAX, Wi-Fi e LTE com os mecanismos de QoS.

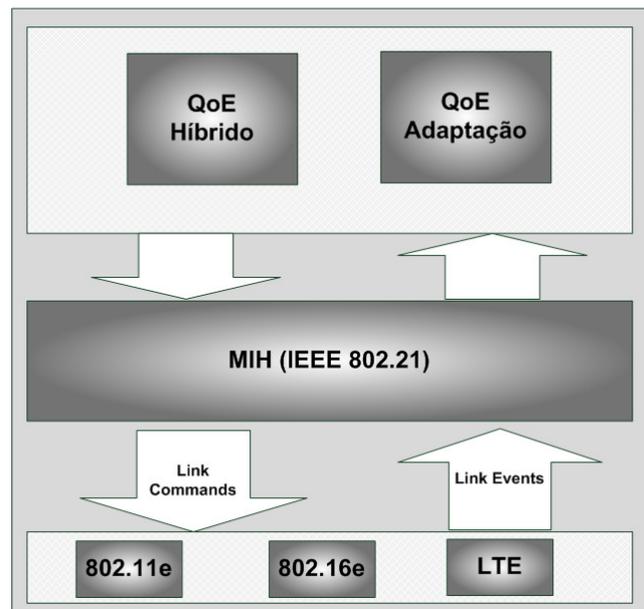


Figura 8 - Arquitetura geral com suporte de QoE

A integração das tecnologias gera um ambiente heterogêneo, usuários móveis com interfaces (WiFi, WiMAX, LTE), com suporte a mobilidade vertical transparente e garantia de QoE.

Desta forma, fluxos de serviços (vídeos) provenientes das camadas superiores são classificados para uma classe de serviço correspondente para UGS, rtPS ou BE (caso estejam ou tenham feito *handover* com a interface WiMAX ativa) na camada MAC. Conforme o tipo de fluxo e seus requisitos de QoE, estes são em seguida escalonados, ou no sentido *uplink* (UL-MAP), ou no sentido *downlink* (DL-MAP) para então receberem concessões da BS e assim ter prioridades no acesso ao meio.

Caso o usuário móvel tenha feito *handover* para a área de cobertura Wi-Fi e com a interface Wi-Fi ativa, os fluxos são mapeados para ACs (AC\_VO, AC\_VI ou AC\_BE). Em cada AC os fluxos de serviços associados tem diferentes prioridades no acesso ao meio.

Caso o usuário móvel tenha feito *handover* para a área de cobertura LTE, o fluxo de vídeo também terá suporte a QoE devido as altas taxas de transmissão da rede 4G, porém a arquitetura tem como objetivo evitar que determinada rede fique saturada, por isso o *handover* apenas será autorizado caso a rede forneça condições de receber um novo cliente.

Nesta arquitetura o *framework* MIH é responsável pela unificação das interfaces, *handover* vertical transparente, auxiliar o usuário na descoberta e seleção de um Ponto de Acesso e coletar de informações de recursos das redes vizinhas através do servidor MIIS.

O MIH comunica as camadas inferiores com as camadas superiores, baseado no número de serviços primitivos denominados de SAP (*Service Access Point*). Existem três tipos de SAP: OMIH\_SAP, MIH\_NET\_SAP e MIH\_LINK\_SAP. O MIH\_SAP é a interface que realiza a comunicação entre o MIH e as camadas superiores. O MIH\_NET\_SAP é a interface responsável pela troca de informações entre as entidades do MIH. O MIH\_LINK\_SAP é a interface responsável pela comunicação das camadas inferiores com o MIH.

É através do MIH\_LINK\_SAP que os parâmetros de QoS da camada MAC são repassados para as camadas superiores das tecnologias, na arquitetura proposta o MIH\_LINK\_SAP também repassará os parâmetros de QoE para as camadas superiores para que o mecanismo de QoE Híbrido possa calcular a predição de qualidade do vídeo. A adaptação e integração permitem a classificação e escalonamento de fluxos entre as camadas superiores e inferiores, e também permite garantir QoE nas tecnologias IEEE 802.11e, IEEE 802.16e e LTE. O usuário móvel escolherá uma tecnologia e a arquitetura oferecerá uma classe de serviço disponível, normalmente a arquitetura sempre que possível tentará oferecer a classe de serviço com alta prioridade para as aplicações multimídias.

#### **4.2.3 Mecanismo de QoE Híbrido**

O QoE Híbrido estima a qualidade do vídeo aproximado da percepção visual humana em tempo real permitindo uma melhor adaptação das aplicações multimídias nas diversas tecnologias da arquitetura.

A implementação do QoE Híbrido leva em consideração diversos parâmetros, como o tipo de vídeo e até mesmo as características da rede no momento (quantidade de frames e vazão). A finalidade destes parâmetros é detectar os níveis de degradação em uma aplicação multimídia em determinadas condições de rede. Quando o mecanismo aponta para um alto nível de degradação é recomendado que o usuário móvel troque de rede ou que seja ativado o mecanismo de descarte seletivo.

O padrão *Moving Picture Experts Group* (MPEG) define três tipos de frames: o frame I (*Intra-coded*), o frame P (*Predictive-coded*) e o frame B (*Bi-directionally predictive-coded*). O índice de porcentagem de perdas dos frames I,P,B mais o índice de perdas de frame geral foram adotados como um dos parâmetros de entrada do mecanismo de QoE Híbrido. Além disso, um outro importante fator que influencia diretamente na composição do vídeo é o

*Group of Picture* (GoP), que define a quantidade de frames que sucedem dois frames I. O comprimento do GoP é um outro parâmetro levado em consideração no mecanismo.

O mecanismo de QoE Híbrido é um preditor em tempo real que está sendo desenvolvido inicialmente baseado em aprendizado via Rede Neural. Esses parâmetros importantes para o mecanismo são avaliados em uma rede neural que através do aprendizado faz uma estimativa da qualidade do vídeo.

O motivo da utilização da rede neural na arquitetura é a capacidade de aprendizado em um determinado ambiente. O aprendizado é interativo, o aprendizado ocorre conforme as mudanças no ambiente. Desta forma, a rede neural melhora o desempenho da arquitetura, pois através da predição feita pela rede neural que a arquitetura se baseia na tomada de decisão.

O modelo de rede neural utilizado é a função não-linear de multivariáveis (um vetor  $\{x\}$  recebe o conjunto de parâmetros de entrada para gerar um vetor de saída  $\{y\}$  controlado por um vetor de pesos ajustáveis  $\{w\}$ ). Utilizando os parâmetros de entrada com o intuito de oferecer sempre o melhor ambiente de conexão para usuário móvel, a rede neural vai aprendendo com cada mudança/evento que venha ocorrer na arquitetura. Coletando os dados em tempo real a rede neural é capaz de estimar qual a qualidade do vídeo que está sendo apresentado para o usuário. A Figura 9 mostra o mecanismo.

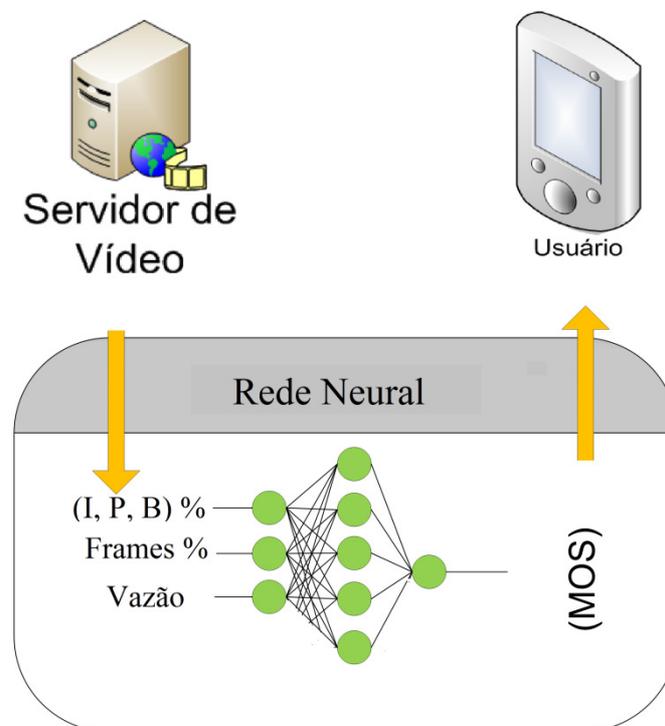


Figura 9 - QoE Híbrido

Cada entrada será armazenada no vetor  $\{x\}$ , cada entrada passará por um modelo matemático em diferentes camadas até obter um resultado final. Cada entrada é “refinada” por pesos  $\{w\}$  nas diversas camadas. Cada camada gera uma saída que serve de entrada para a camada seguinte. A fórmula (1) a seguir exhibe o cálculo para cada camada:

$$h_i^{(m)} = [w_i^{(m)}]x^{(m)} = \sum_{k=1}^M (w_{ik}^{(m)} \cdot x^{(m)}) \quad (1)$$

Onde:

- $w$ : Peso de entrada para cada camada
- $x$ : Entrada
- $m$ : Camada

Para obter o melhor resultado, uma rede neural tem que passar por um período de treinamento, nesse período de treinamento 100 simulações foram realizadas variando o nível de congestionamento para que um histórico de aprendizado fosse composto. A cada instante a rede neural é “alimentada” com os parâmetros de entrada e comparando com as informações adquiridas no treinamento a rede neural é capaz de prever o comportamento do ambiente de transmissão com base nas características de momento da arquitetura.

#### 4.2.2 Mecanismo de Adaptação de QoE

O Mecanismo de Adaptação de QoE é importante para manter a qualidade do vídeo aceitável em situações de congestionamento da rede e não há nenhuma rede vizinha disponível no momento. O mecanismo de adaptação de QoE é ativado de acordo com o MOS estimado pelo mecanismo de QoE Híbrido e considera principalmente o tamanho do GoP, pois a adaptação ocorre através do descarte seletivo de frames para obter uma melhor qualidade, dessa forma é necessário verificar a importância e a dependência entre os frames.

O mecanismo de adaptação de QoE considera a importância de cada frame, se a fila estiver cheia, primeiramente o mecanismo descartará o frame B, se a fila continua congestionada o mecanismo descartará o frame P, e um último caso se a fila continuar cheia o mecanismo descartará o frame I. O algoritmo genérico do mecanismo é demonstrado na Tabela 7 a seguir.

---

```

1: while (queue_full == true) {
2:     if(packet_type == B){
3:         drop (packet);
4:         break;}
5:     if(packet_type == P) {
6:         drop (packet);
7:         break;}
7:     if(packet_type == I){
9:         drop (packet);
10:        break;}
11:    }
```

---

Tabela 7 - Algoritmo Genérico de Adaptação de QoE

### 4.3 Gerenciamento de Mobilidade Transparente para QoE

A arquitetura gerencia a mobilidade dos usuários com o intuito de prover *handover* vertical transparente, o objetivo é manter uma boa qualidade das aplicações multimídias mesmo que trocas de rede de diferentes tecnologias venha ocorrer. A proposta considera a classe de serviço disponível na atual rede e na rede candidata, para que possa ser oferecido ao usuário móvel a melhor opção de conectividade.

Quando o usuário móvel detecta uma nova rede, o mesmo envia uma mensagem MIH\_LINK\_DETECTED, permitindo que a nova rede detecte a sua presença na área de cobertura. A rede candidata envia a mensagem MIH\_LINK\_PARAMETERS\_REPORT para a atual rede informando qual a classe de serviço disponível, cabe a arquitetura comparar as duas redes (a rede atual e a rede candidata) e informar ao usuário móvel a decisão de *handover* através da mensagem MIH\_LINK\_PARAMETERS\_REPORT. O usuário móvel inicia o *handover* enviando a mensagem MIH\_HANDOVER\_INITIATE para a nova rede candidata. A sinalização pode ser observada na Figura 10.

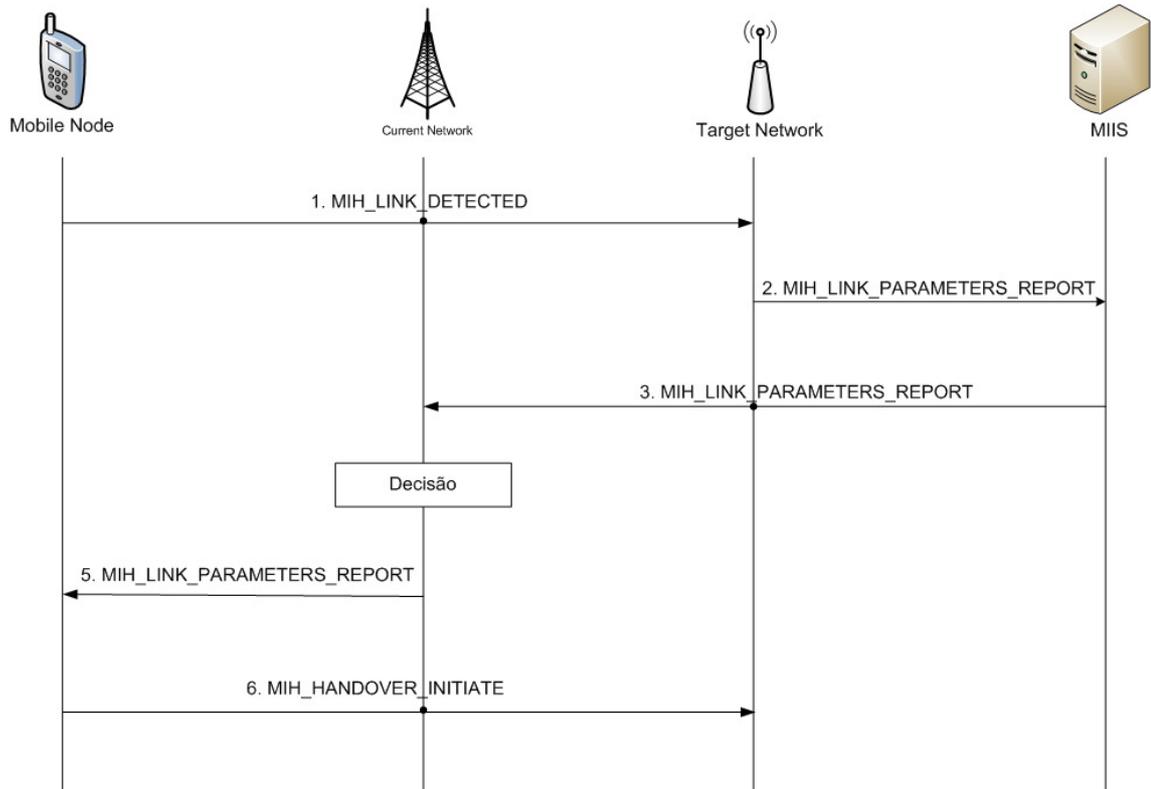


Figura 10 - Sinalização para Handover Vertical

#### 4.4 Modelo de Bateria

Um modelo matemático de bateria representa as características reais de uma bateria para estudar/prever o seu desempenho ou comportamento. Uma bateria é um conjunto de células eletroquímicas, cada célula é formada por dois eletrodos: um ânodo com polaridade negativa e um cátodo que possui polaridade positiva. As reações eletroquímicas geram os elétrons que são liberados para fornecer corrente elétrica aos dispositivos causando a descarga da bateria. (RAKHMATOV; VRUDHULA, 2001).

Nesta tese dois modelos de bateria serão utilizados para avaliar o comportamento de consumo de energia para bateria dos dispositivos móveis. Os dois modelos adotados para estudo nesta tese são: Modelo Linear e Modelo Rakhmatov – Vrudhula.

##### 4.4.1 Modelo Linear

É o modelo matemático mais simples para representar o consumo de bateria devido a fácil implementação é adotada em simuladores como o *ns-2*. O consumo de bateria no modelo

linear é constante em relação ao tempo independente do estado (transmitindo, recebendo, ocioso) do dispositivo móvel.

O consumo de energia de bateria no modelo linear é representado pela formula seguinte:

$$BF = BI - C.T \quad (1)$$

Onde:

BF = Bateria Final

BI = Bateria Inicial

C = Corrente de descarga

T = Tempo

#### 4.4.2 Modelo Rakhmatov – Vrudhula

O modelo de bateria Rakhmatov – Vrudhula é mais realista que o modelo linear pelo fato de considerar os estados do dispositivo móvel, sendo que para cada estado há um valor de descarga elétrica diferente. Este modelo de bateria considera diferentes taxas de capacidade e de recuperação (em modo ocioso é possível aumentar o tempo de vida útil da bateria) para diferentes tipos de bateria (alcalina, íons de lítio).

O consumo de energia de bateria no modelo não linear é representado pela seguinte fórmula:

$$\alpha = \sum_{k=1}^n 2I_{k-1}A(L, t_k, t_{k-1}, \beta) \quad (2)$$

Onde:

$\alpha$  = Bateria final

$\beta$  = comportamento não linear para carga e descarga

$I_{k-1}$  = Corrente de descarga para o período k - 1

A = Função para cálculo de comportamento não – linear

L = Tempo de vida da bateria

$T_k$  = Tempo de duração para o período k

$T_{k-1}$  = Tempo de duração para o período k - 1

## **4.6 Resumo do Capítulo**

Este capítulo apresentou a arquitetura que está sendo proposta na tese que possui suporte a Qualidade de Experiência, dessa forma um cliente móvel com alternativas de conectividade a arquitetura após coletar e analisar as informações de cada alternativa indicará qual rede oferece melhores condições para uma transmissão de aplicação de multimídia. Para que este objetivo seja cumprido, o capítulo detalhou os mecanismos de QoE híbrido e também de adaptação de QoE, além de detalhar o gerenciamento de mobilidade, o capítulo abordou sobre modelo de consumo de energia. O capítulo seguinte apresentará e discutirá os resultados obtidos.

## 5. Avaliação da Arquitetura

Este capítulo apresenta avaliação da arquitetura proposta nesta com o objetivo de demonstrar a eficácia do mesmo, exibindo o desempenho dos mecanismos que foram implementados. Esta tese inicialmente foi implementada utilizando as tecnologias WiFi e WiMAX, posteriormente a tecnologia LTE foi adicionada a arquitetura. Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos que demonstram os ganhos que a arquitetura proporciona.

### 5.1 Metodologia

A comprovação dos benefícios da tese foram obtidos por meio de simulação através do *ns-2* (ns, 2009). O módulo para o protocolo IEEE 802.21 (NIST, 2010) foi utilizado também no simulador. Para as transmissões de vídeo foi utilizada a ferramenta Evalvid (Evalvid, 2010) sendo que os vídeos simulados foram avaliados usando a ferramenta *MSU Video Quality Measurement Tool* (MSU, 2010).

Os procedimentos para as simulações foram:

1. Conversão do vídeo para arquivo de trace no Evalvid;
2. Leitura do trace do vídeo para simulação no ns-2 (Vide script .tcl na seção anexos);
3. Monitorar os eventos das camadas físicas das tecnologias;
4. Repassar as informações obtidas da etapa 3 para os mecanismos;
5. Tomada de decisão de acordo com a predição obtida da etapa anterior;
6. Reconstrução do vídeo através do trace de saída obtido na simulação;
7. Avaliação do vídeo na ferramenta *MSU Video Quality Measurement Tool*;

A Figura 11 corresponde ao diagrama dos procedimentos de simulação.

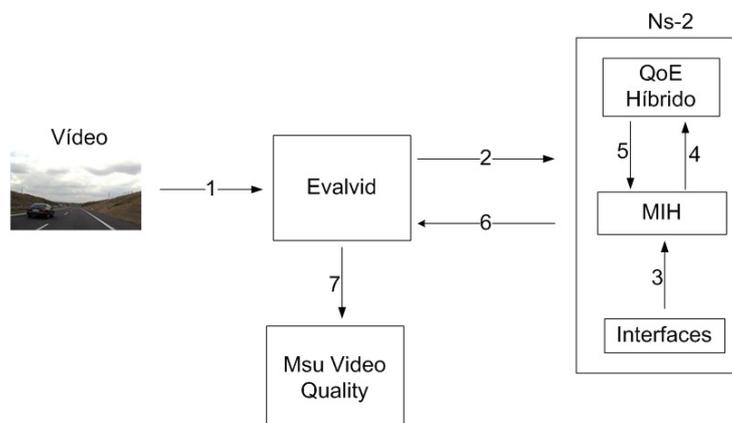


Figura 11 - Procedimento de Simulação

## 5.2 Arquitetura Heterogênea com redes WiFi e WiMAX

O primeiro cenário utilizado na avaliação da arquitetura é demonstrado na Figura 12, os usuários móveis podem começar a conexão tanto na rede IEEE 802.16e, como na rede IEEE 802.11e, mas devido a mobilidade dos usuários pode ocorrer *handover*, as tecnologias estão agregadas a arquitetura.

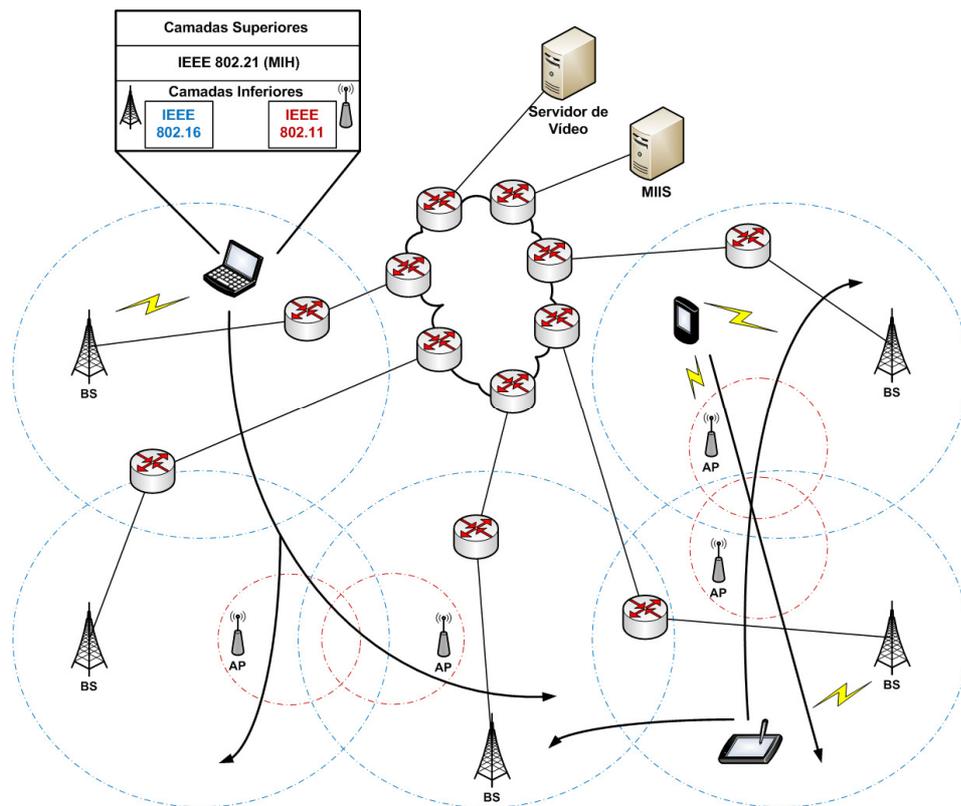


Figura 12 - Cenário de Avaliação

Os parâmetros configurados para as simulações para as tecnologias são descritas na Tabela 8 a seguir. Foram adicionados a simulação 50 usuários móveis que transitavam de forma aleatória nas redes.

	<b>802.11e</b>	<b>802.16e</b>
Taxa de Transmissão	54 Mbps	75 Mbps
Área de Cobertura	100m	1Km
Escalonador	EDCA	Round Robin(RR)
Frequência	2,4GHz	5,0Ghz

Vídeo Alta Definição	Resolução: 1280 x 720 Taxa de Frames: 30 frames/s Modo de Cor: Y, U, V
Fila	Drop Tail (40 ms delay)
Tamanho do Pacote	1052 bytes
Fragmentação Máxima do Pacote	1024 bytes
Tempo de Simulação	100 segundos
Número de Simulações	100
Intervalo de Confiança	95 %
Número de usuários	50

Tabela 8 – Parâmetros de Simulação

E os parâmetros de configuração da Rede Neural são demonstrados na seguinte Tabela

9:

Taxa de aprendizado	0,075
Taxa de Impulso	0,15
Critério de Treinamento de Erro	0,01
Número de máximo de gerações	10000
Número Total de Padrões de Treinamento	100
Número de Camadas	3
Número de Padrões	100
Número de Entradas	4
Número de Saídas	1

Tabela 9 – Parâmetros de simulação para Rede Neural

### 5.3 Gerenciamento de Mobilidade

Neste primeiro caso de uso as simulações foram realizadas utilizando as tecnologias WiMAX e WiFi, as simulações têm como objetivo demonstrar os benefícios que a proposta proporciona em termos de gerenciamento de mobilidade. Os usuários móveis começaram a transmissões dentro da área de cobertura do IEEE 802.16e (ou popularmente WiMAX) e durante ao longo das transmissões os mesmos se deslocam para a área de cobertura do IEEE 802.11e (ou popularmente WiFi).

Essa locomoção de uma tecnologia para outra caracteriza o *handover* vertical e o ideal é que ocorra de maneira transparente sem que haja quebra de conexão ou interrupção da transmissão. Na Figura 13 a seguir podemos observar através da média das vazões dos usuários móveis que não houve interrupção da transmissão durante mudança da rede WiMAX para a rede WiFi (e vice-versa). Embora a mudança de rede tenha sido de maneira transparente o excesso de *handover* prejudicou as aplicações, principalmente as aplicações multimídias. As transmissões foram caracterizadas como tráfego de vídeo, voz, FTP e neste primeiro caso, não há privilégios para nenhum tipo de aplicação que concorrem igualmente pela largura de banda em ambas tecnologias.

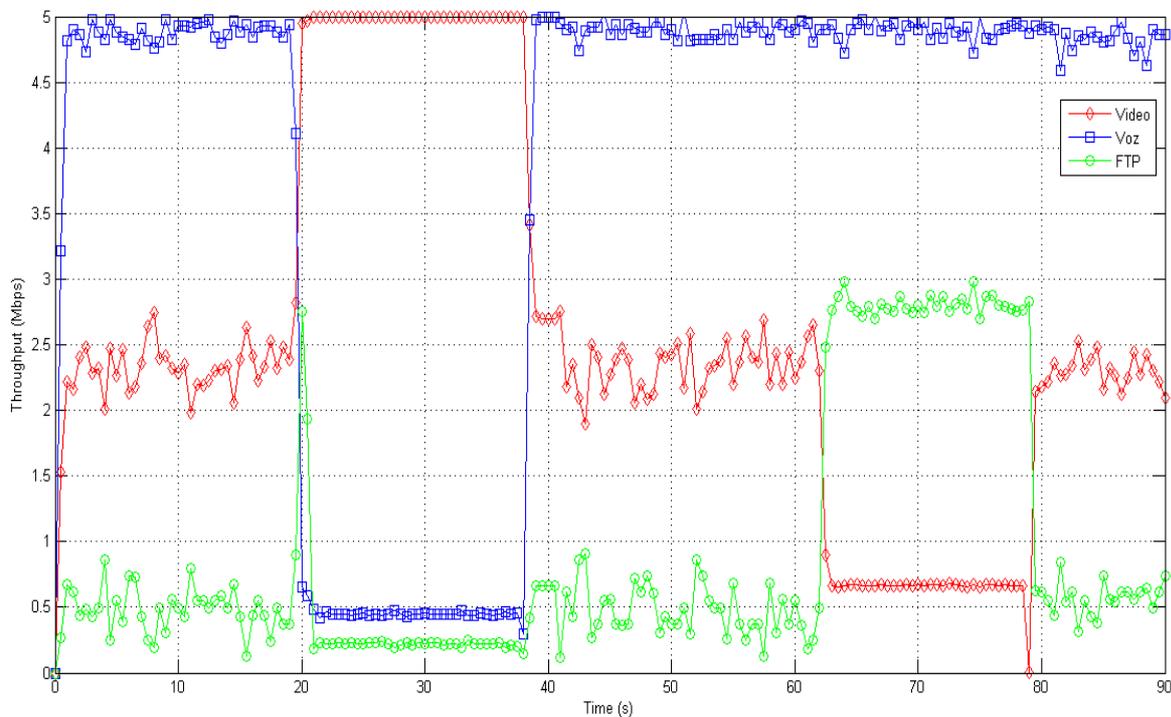


Figura 13 - Vazão sem suporte a QoS

Neste segundo caso de uso ainda utilizando as tecnologias WiMAX e WiFi, as simulações têm como objetivo demonstrar os benefícios que a arquitetura proporciona utilizando as classes de serviço. O gerenciamento de mobilidade continua ativo e por isso a mobilidade permanece sendo transparente aos usuários móveis não havendo interrupção das transmissões.

As transmissões continuam sendo caracterizadas como tráfego de Vídeo, Voz e FTP mas neste caso cada aplicação será associada a uma classe de serviço que possuem uma escala de prioridade no atendimento. A aplicação de vídeo na rede WiMAX é associada a classe rtPS

e na rede WiFi é associada a classe AC\_VI, a aplicação de Voz é associada a classe UGS na rede WiMAX e associada a classe AC\_VO quando estiver na rede WiFi e a aplicação FTP é associada a classe BE e AC\_BE nas redes WiMAX e WiFi respectivamente.

Podemos observar na Figura 14 a seguir pela média das vazões que a aplicação de vídeo teve prioridade em relação aos demais tráfegos obtendo vantagem quando comparado com a situação anterior sem as classes de serviço, mesmo após o *handover* para a rede WiFi.

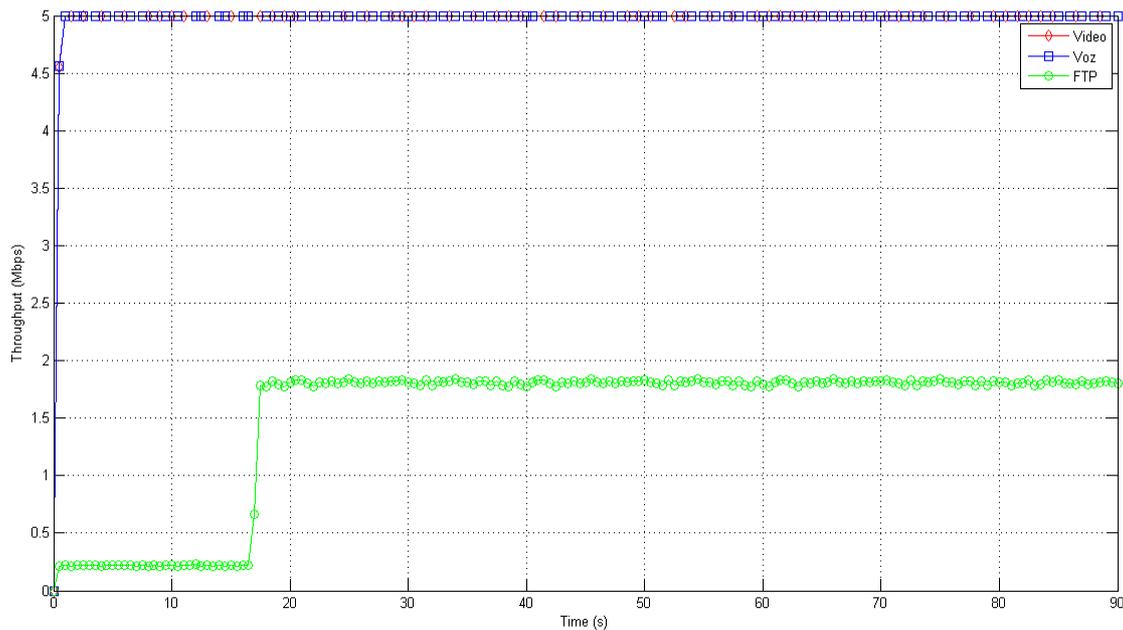


Figura 14 - Vazão com suporte de QoS

## 5.4 Avaliação de Qualidade de Experiência

Neste terceiro caso de uso, as simulações têm como objetivo demonstrar os benefícios que a arquitetura proporciona em termos de qualidade de experiência. As simulações foram realizadas analisando quatro situações: (1) MIH Puro: Padrão conforme as suas configurações originais. (2) Completo: Quando há recursos suficientes para que o redirecionamento das aplicações para as classes de serviços corretamente; (3) Parcialmente: Quando a arquitetura não pode oferecer a melhor classe de serviço para a aplicação, uma classe de serviço alternativa é oferecida; (4) Descarte: O descarte de pacote seletivo de acordo com a ordem de importância dos frames.

Os vídeos utilizado nas simulações foram o “Highway” e “Grandmother” que possui 2000 frames e 760 frames respectivamente, no formato YUV com dimensão de 352x288, que foi codificado com o MPEG-4 CODEC a uma taxa de 30 frame/s (YUV CIF,2010).

Haverá situações que a arquitetura não poderá oferecer a melhor classe de serviço para uma aplicação de vídeo, devido a uma situação de congestionamento na rede atual e a rede vizinha não possuir melhores condições de conexão do que a rede atual.

Em situações desse tipo, será oferecido uma classe de serviço que possui uma escala mais baixo de prioridade que a classe de serviço destino a aplicações de multimídia. O fato de uma aplicação de vídeo estar associada a uma classe de serviço com escala mais baixa pode gerar significativas perdas de pacotes e conseqüentemente degradar a qualidade de experiência.

O mecanismo de adaptação de qualidade de experiência controlará a chegada dos pacotes de vídeos na fila e quando necessário descartará os frames menos importantes que não causam tantos prejuízos na qualidade do vídeo, dessa forma impedindo que o congestionamento na fila. Conforme já explicado anteriormente, o descarte de frames obedece ordem de importância do mesmo.

A Figura 15 mostra os resultados do percentual de frames perdidos conforme os níveis de congestionamento aumentam. A arquitetura utiliza tal informação adquirida pela rede neural para ativar o redirecionamento de fluxo correto para uma classe de serviço de acordo com a tecnologia e os recursos disponíveis no momento e também para ativar o descarte seletivo de pacotes.

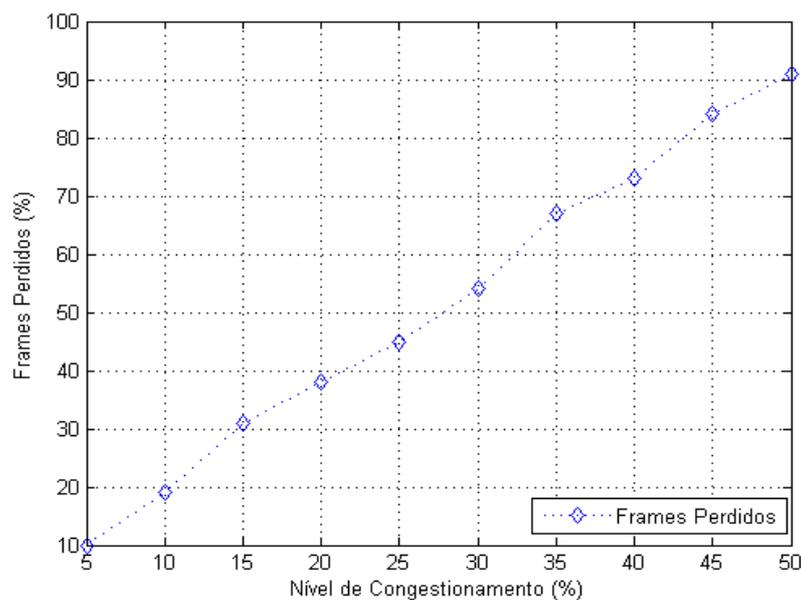


Figura 15 - Frames Perdidos x Congestionamento

Os resultados do MOS mostram que a qualidade do vídeo foi garantida mesmo em situações de rede congestionada. Com o MIH Puro a qualidade do vídeo durante as transmissões foi degradado sendo considerada uma aplicação de vídeo de péssima qualidade. Com o descarte seletivo de pacotes manteve a qualidade do vídeo boa até com 30% de rede congestionada. O Parcialmente garantiu uma boa qualidade do vídeo, quando as aplicações multimídias foram mapeadas para classes de serviços menos importantes (UGS - AC\_VO) e descartando os pacotes menos importantes conforme aumentava o nível de congestionamento na rede. A solução completa ofereceu a melhor a classe de serviço (rtPS - AC\_VI) em ambas as redes e descartando os pacotes menos importantes conforme aumentava o nível de congestionamento na rede manteve a qualidade do vídeo como excelente. A Figura 16 exibe os resultados.

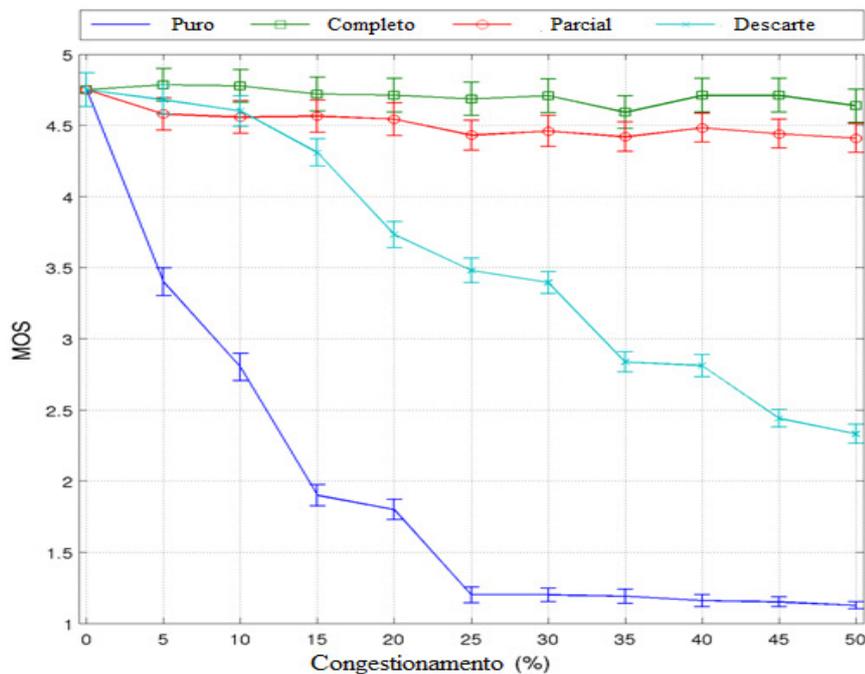


Figura 16 – MOS

Além da avaliação de MOS, outro resultado que também comprova os benefícios da arquitetura proposta é a métrica objetiva SSIM. A arquitetura obteve um melhor desempenho de 40%. A Figura 17 exibe os resultados para a métrica SSIM.

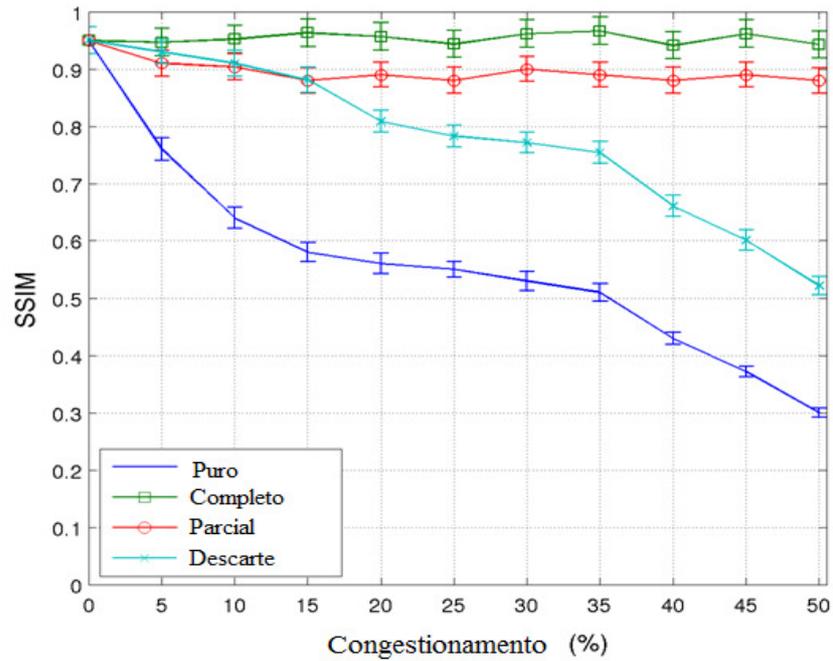


Figura 17 - SSIM

Os valores de SSIM são detalhados melhor na Tabela 10.

	Puro	Completo
Média	0.76	0.96
Valor Máximo	0.78	0.97
Valor Mínimo	0.74	0.95
Desvio Padrão	0.04	0.03

Tabela 10 - Valores SSIM

Outra métrica objetiva de QoE que também comprova os ganhos obtidos pela arquitetura é o VQM, nesta métrica quanto mais próximo do valor zero, melhor é a avaliação do vídeo. (Figura 18)

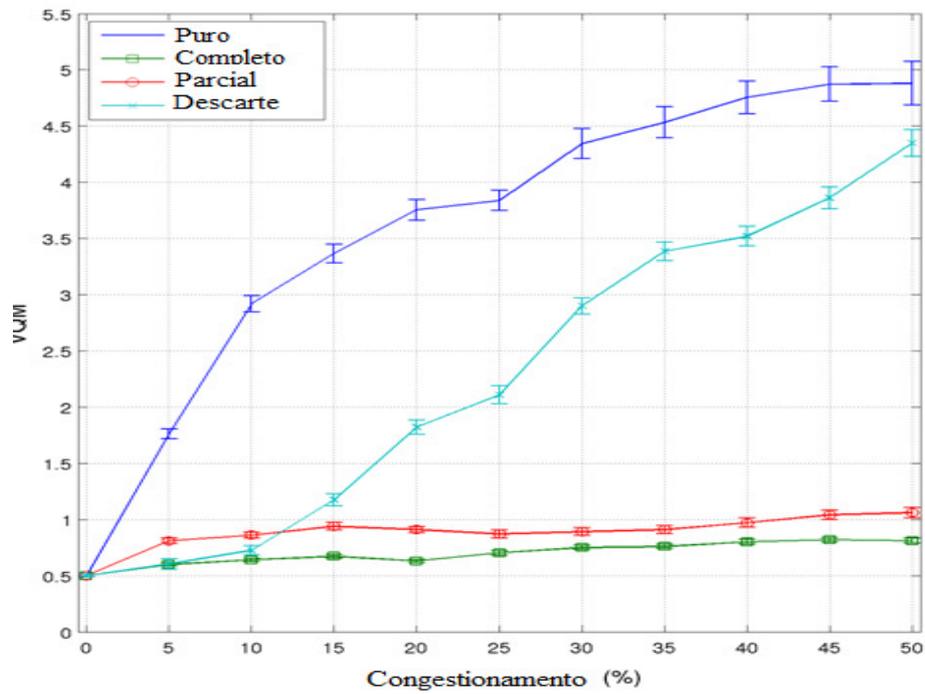


Figura 18 - VQM

Os resultados de VQM são expressos numericamente na Tabela 11.

	Puro	Completo
Média	1.8	0.55
Valor Máximo	1.9	0.6
Valor Mínimo	1.7	0.52
Desvio Padrão	0.02	0.03

Tabela 11 - Valores VQM

Quando comparamos os frames do vídeo recebido na arquitetura do MIH Puro (sem mecanismos) com os frames do vídeo recebido na arquitetura (com mecanismos) é possível verificar visualmente uma melhor qualidade dos frames recebidos no segundo caso. (Figura 19).

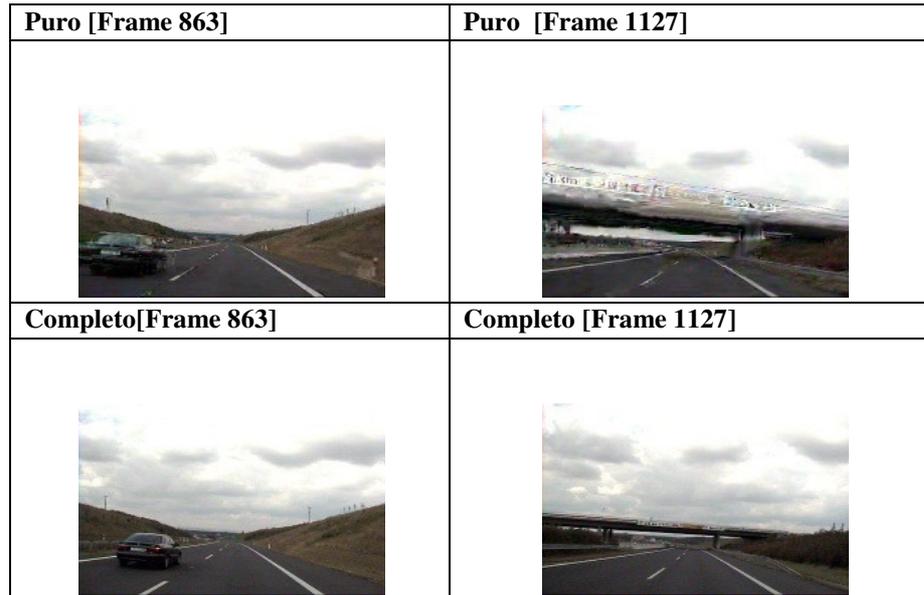


Figura 19 - Comparação dos Frames

Na Figura 20 a seguir podemos observar que o vídeo recebido sem descarte seletivo não obteve uma boa qualidade, diferentemente do vídeo recebido com descarte seletivo obteve uma boa qualidade.

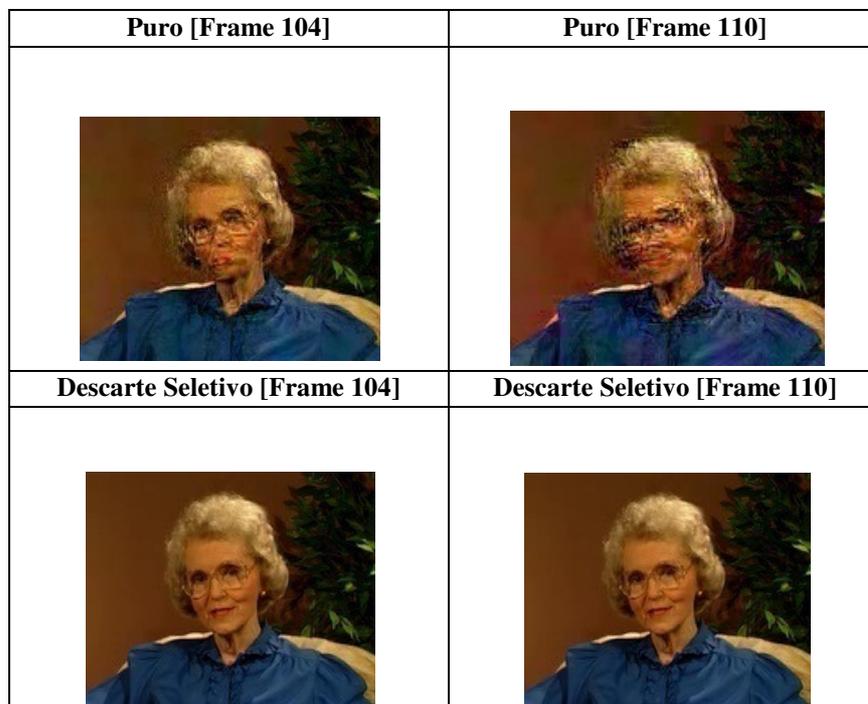


Figura 20 – Qualidade dos Frames

Uma outra análise que também demonstra o ganho da arquitetura são os resultados sobre a distorção de cor e o nível de ruído dos vídeos recebidos. O vídeo recebido sem a configuração da arquitetura ativa teve 6.26dB de distorção de cor e apresentou um nível de ruído de 23.8dB, enquanto o vídeo recebido pela arquitetura ativa apresentou 1.8dB de distorção de cor e um nível de ruído de 9.3dB. A Figura 21 exibe o gráfico comparativo.

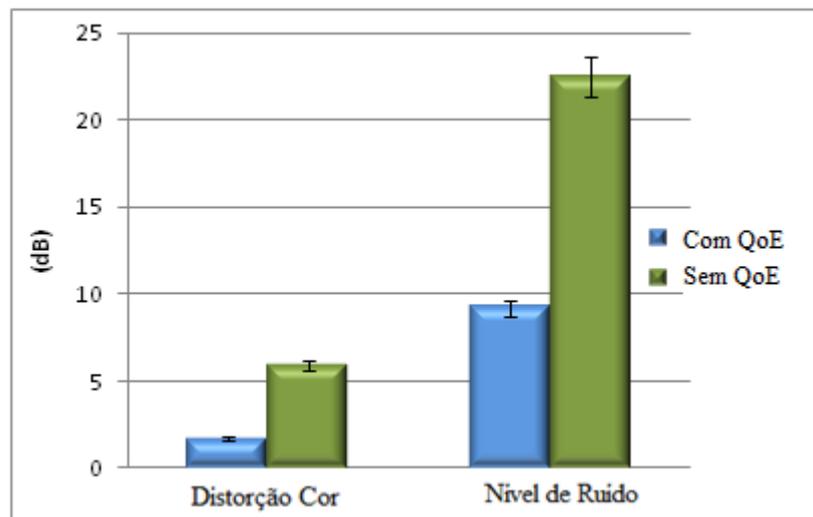


Figura 21 - Distorção de Cor e Nível de Ruído.

## 5.5 Arquitetura heterogênea com redes 4G

O segundo cenário utilizado na avaliação da arquitetura é demonstrado na Figura 22, os usuários móveis podem começar a conexão tanto na rede IEEE 802.16e, como na rede IEEE 802.11e quanto na rede 4G LTE, mas devido a mobilidade dos usuários pode ocorrer *handover*, as tecnologias estão agregadas a arquitetura.

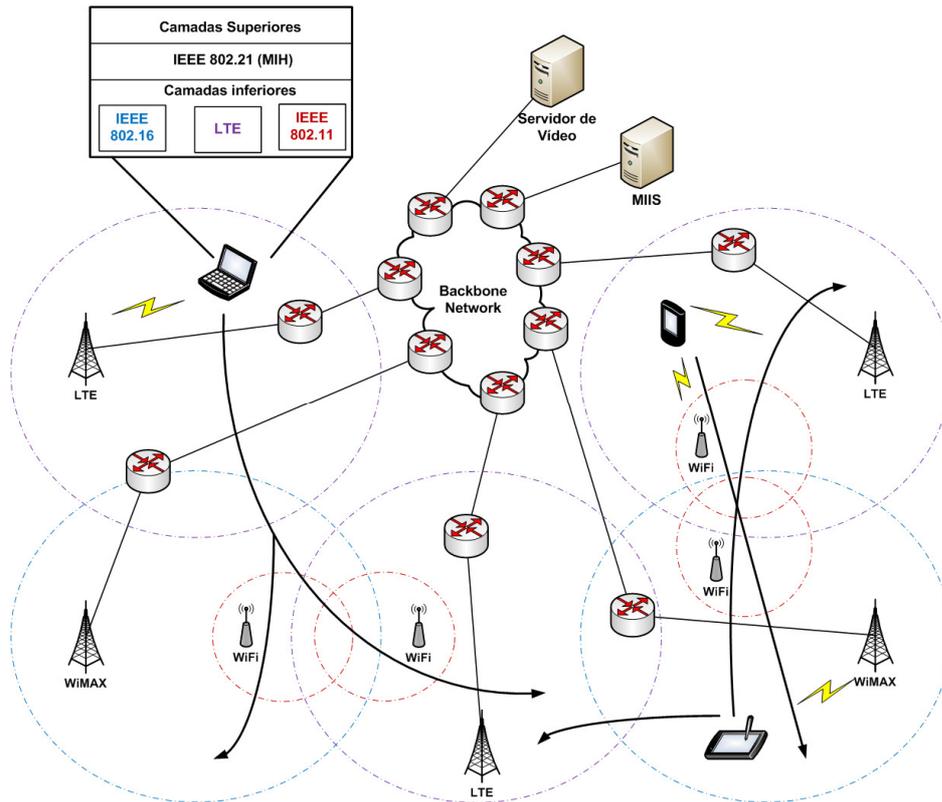


Figura 22 – Cenário de Avaliação

Os parâmetros configurados para as simulações para as tecnologias são descritas na Tabela 12 a seguir. Foram adicionados a simulação 50 usuários móveis que transitavam de forma aleatória redes.

	<b>802.11e</b>	<b>802.16e</b>	<b>LTE</b>
Taxa de Transmissão	54 Mbps	75 Mbps	100Mbps
Área de Cobertura	100m	1Km	1Km
Escalonador	EDCA	Round Robin(RR)	-
Frequência	2,4GHz	5,0Ghz	2,5GHz
Vídeo Alta Definição	Resolução: 1280 x 720 Taxa de Frames: 30 frames/s Modo de Cor: Y, U, V		
Fila	Drop Tail (40 ms delay)		
Tamanho do Pacote	1052 bytes		
Fragmentação Máxima do Pacote	1024 bytes		
Tempo de Simulação	100 segundos		
Número de Simulações	100		
Intervalo de Confiança	95 %		
Número de usuários	50		

Tabela 12 - Parâmetros de Simulação

Neste quarto caso de uso as simulações foram realizadas utilizando as tecnologias WiMAX, WiFi e LTE. Os usuários móveis começaram a transmissões dentro da área de cobertura do LTE (ou popularmente rede 4G) e durante ao longo das transmissões os mesmos podem se deslocar para as demais áreas de cobertura.

Os resultados a seguir avaliam o desempenho com base nas métricas de Qualidade de Experiência que mostram que a arquitetura proposta garante a qualidade do vídeo de alta definição. É possível verificar um ganho de até 50% na qualidade do vídeo transmitidos nas simulações no qual os mecanismos de QoE híbrido e de adaptação de QoE estavam desativados na arquitetura em relação aos vídeos transmitidos nas simulações no qual ambos os mecanismos estavam ativados. Na arquitetura pura a qualidade do vídeo durante as transmissões foi degradada devido a quantidade de troca de redes sendo considerada uma aplicação de vídeo de péssima qualidade. A arquitetura proposta garantiu uma boa qualidade do vídeo, oferecendo a melhor conectividade disponível e descartando os pacotes menos importantes mantendo a qualidade do vídeo como excelente. A Figura 23 exibe o resultado para a métrica *Peak Signal-to- Noise Ratio* (PSNR) da arquitetura pura com valor 28dB e para a arquitetura proposta valor de 48dB.

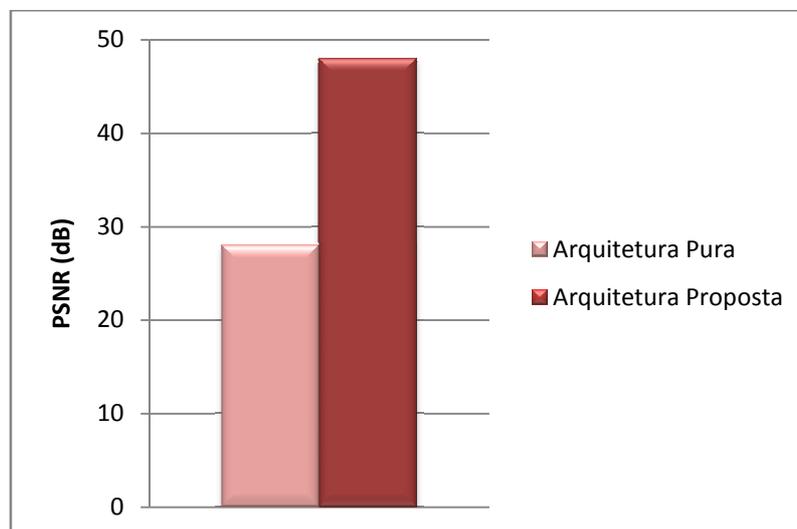


Figura 23 - PSNR

Além da avaliação de PSNR, outro resultado que também comprova os benefícios da arquitetura proposta é a métrica objetiva *Structural Similarity* (SSIM). A arquitetura pura obteve resultado de 0,7 contra 0,9 da arquitetura proposta, a Figura 24 exibe os resultados para a métrica SSIM.

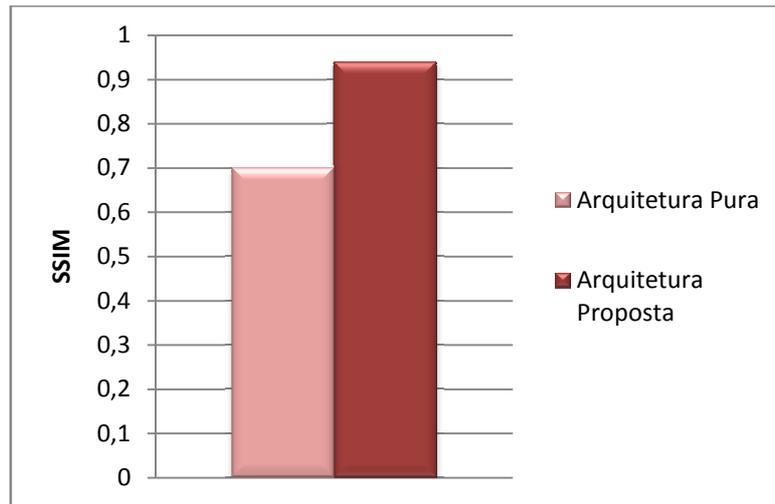


Figura 24 - SSIM

E a métrica objetiva *Video Quality Metric* (VQM), considerada mais completa que a métrica SSIM e PSNR, também comprova o melhor desempenho da arquitetura proposta, mantendo a qualidade das aplicações multimídias de alta definição. Na métrica VQM, quanto mais próximo o valor de 0, melhor é a qualidade. A arquitetura pura apresentou valor de VQM de 6,9 e a arquitetura proposta apresentou valor de 2,4. A Figura 25 exibe o gráfico com os valores de VQM.

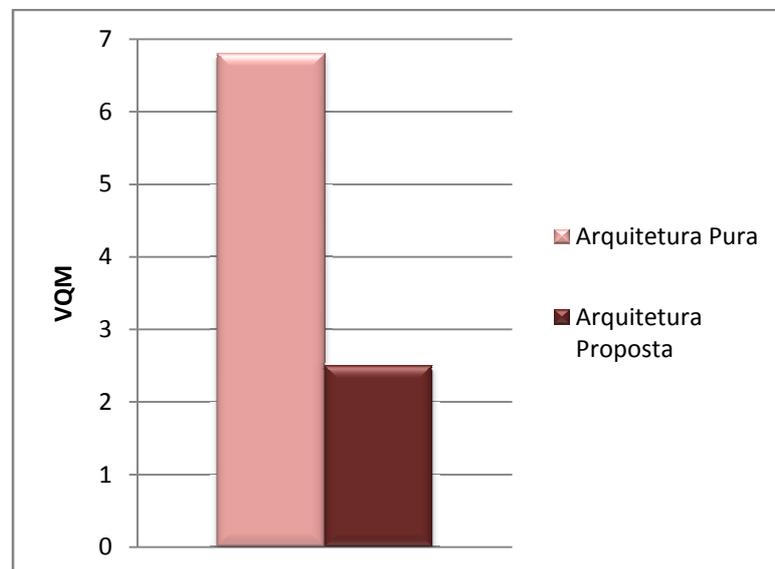


Figura 25 - VQM

O vídeo de alta definição utilizado nas simulações foi o “Sintel” que possui 1253 frames no formato YUV com dimensão de 1280x720, que foi codificado com o MPEG-4 CODEC a uma taxa de 30 frame/s (Xiph.org, 2013).

Quando comparamos os frames do vídeo recebido na arquitetura pura com os frames do vídeo recebido na arquitetura com suporte a QoE e com gerenciamento de mobilidade (oferecendo a rede LTE para conexão) é possível verificar visualmente uma melhor qualidade dos frames recebidos no segundo caso. As Figuras 26 e 27 mostram o frame 480 do vídeo recebido pela arquitetura sem suporte a QoE e o frame recebido pela arquitetura com suporte a QoE.

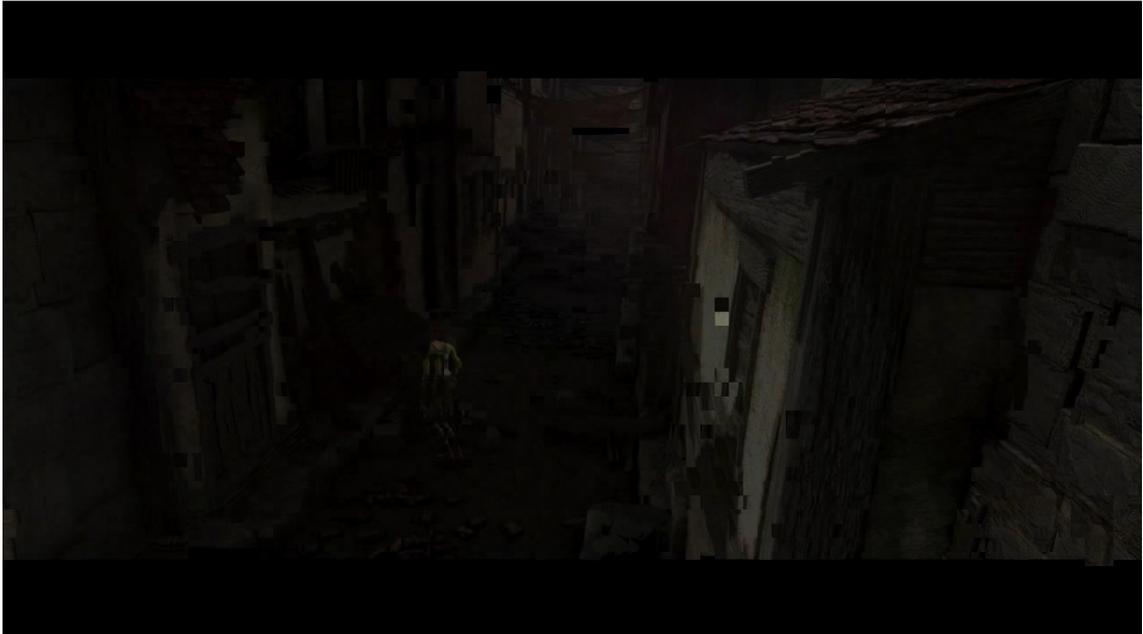


Figura 26 - Frame recebido sem suporte a QoE.



Figura 27 - Frame recebido com suporte a QoE em redes 4G.

## 5.6 Consumo de energia

Nesta tese o consumo de energia de bateria também foi avaliado, o grande número de redes sem fio disponíveis, os diversos tipos de serviços fornecidos causam um maior consumo de energia de bateria dos dispositivos móveis. Embora esta tese não tenha implementado nenhum mecanismo de economia de consumo de energia de bateria, o objetivo foi demonstrar que a escolha da tecnologia a ser usada gera um consumo de energia diferente sendo um fator que pode inclusive ser fundamental na tomada de decisão.

As simulações utilizaram os dois modelos de bateria já explicados anteriormente: modelo de bateria linear no qual o consumo é constante independente da tecnologia e do estado do dispositivo móvel e o modelo de bateria Rakhmatov - Vrudhula que leva em consideração os estados do dispositivo móvel e o tipo de tecnologia utilizada.

Os parâmetros de simulação para avaliação de consumo de energia são descritos na tabela 13. O valor inicial de bateria foi de 100 *Joules* e para cada tecnologia foram adotados valores de potência diferentes para transmissão e recepção. Para a tecnologia WiFi foram adotados os valores conforme (MARIE et al, 2001) e os valores para WiMAX e LTE foram adotados conforme (DERUYCK et al, 2010).

	Transmissão (W)	Recepção (W)
WiFi	1.3	0.9
WiMAX	1.7	1.5
LTE	2.5	2.5

Tabela 13 - Parâmetros de simulação para energia

Podemos observar na Figura 28 a seguir os consumos de energia durante as simulações. O modelo linear gera um maior consumo sendo igual para as três tecnologias, já o modelo realístico Rakhmatov – Vrudhula gera um consumo menor de bateria considerando as potências de cada tecnologia. É possível observar que as tecnologias WiMAX e LTE tem um consumo de bateria maior que a tecnologia WiFi devido a distância entre o cliente móvel e a estação base ser maior que a distância do mesmo para o Ponto de Acesso.

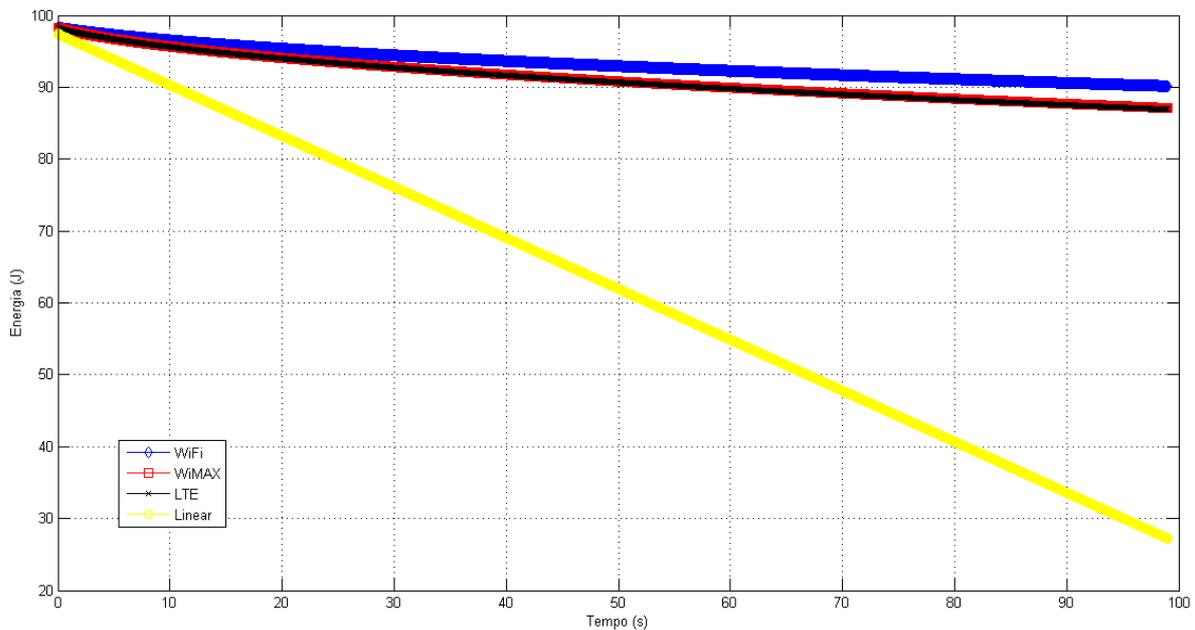


Figura 28 - Consumo de Energia

Com base na figura anterior podemos concluir que há tentativa de oferecer uma qualidade de experiência ao usuário gera uma desvantagem já que o consumo de bateria será maior. Há necessidade de um equilíbrio entre qualidade x consumo, pois haverá momentos em que o usuário opte por mais qualidade diminuindo o tempo de vida de bateria, assim como haverá momentos em que o usuário optará por migrar para uma rede com menos qualidade porém com um tempo de vida de bateria maior.

## 5.7 Resumo do Capítulo

Este capítulo apresentou as avaliações da arquitetura através de resultados obtidos via simulação. Os resultados mostraram que não há quebra/interrupção da aplicação quando um cliente móvel realiza *handover* para uma nova rede e quando há recursos disponíveis a arquitetura redireciona a aplicação do cliente móvel a uma classe de serviço adequada. Os resultados também comprovaram os benefícios por métricas de QoE e também através da visualização da qualidade dos frames dos vídeos transmitidos. E este capítulo também mostrou resultados em relação ao comportamento de consumo de energia de bateria observando que a escolha da tecnologia embora seja benéfica em relação a qualidade será prejudicial quanto ao tempo de vida útil da bateria.

## 6. Conclusão

O principal objetivo desta tese foi propor uma nova arquitetura heterogênea sem fio que fornecesse o suporte à mobilidade transparente e QoE às aplicações móveis de vídeo. Por isso, a escolha dos protocolos a serem integrados para compor a arquitetura foi de suma importância para que o objetivo fosse alcançado. A arquitetura adotou o padrão IEEE 802.11e, o padrão IEEE 802.16e e o padrão LTE. Para o gerenciamento das camadas MAC adotou-se o protocolo IEEE 802.21.

As novas arquiteturas para redes NGN (*Next Generation Networks*) devem considerar também avaliações baseadas em métricas de QoE, que expressam precisamente a experiência que o usuário obtém diante de uma aplicação de vídeo real.

A arquitetura não foi avaliada, como feito tradicionalmente, apenas em termos das métricas de QoS, pelo fato de não expressar o sentimento do usuário diante das aplicações multimídias. As novas arquiteturas para a Internet do Futuro devem considerar também avaliações baseadas em métricas de QoE, que expressam de forma mais precisa a experiência que usuário obtém diante da execução de uma aplicação.

Os resultados das simulações comprovaram a eficácia da proposta em prover a mobilidade transparente dos usuários móveis, não havendo nem quebra de conexão durante a mudança de ponto de acesso. A mobilidade transparente e controle na decisão de *handover* têm sido garantidos com o auxílio do MIH. A proposta permitiu que os usuários móveis de maior prioridade tenham seus requisitos de QoE satisfeitos, mesmo em situações em que a rede está congestionada.

As principais contribuições desta proposta até o momento são:

- Arquitetura formada pela integração das tecnologias IEEE 802.11e, IEEE 802.16e e LTE ao padrão IEEE 802.21.
- Suporte a QoE com o uso de classes de serviços em cenário heterogêneo móvel.
- Mecanismo de gerenciamento de mobilidade vertical entre as tecnologias controlado pelo padrão IEEE 802.21

- Mecanismo de monitoramento e estimação de qualidade de experiência em tempo real através da inteligência computacional rede neural.
- Mecanismo de adaptação de qualidade de experiência através de descarte seletivo de frames de acordo com a ordem de importância de cada frame.
- Transmissão e avaliação de aplicações multimídias de alta definição.
- Avaliação de modelo de consumo de energia de bateria não linear.
- Uso de inteligência artificial em dispositivos móveis com múltiplas interfaces.

## 6.2 Trabalhos Futuros

Podem ser destacados como desdobramentos futuros para esta tese os seguintes aspectos:

- Adicionar novas tecnologias a arquitetura para aumentar as oportunidades de conectividade aos usuários móveis.
- Testes subjetivos de avaliação da qualidade de experiência com os usuários para aprimorar o treinamento da rede neural;
- Realizar as mesmas simulações com outras técnicas de inteligência computacional e comparar o desempenho.
- Estudos de consumo e economia de energia de bateria para que também seja uma métrica na tomada de decisão de mudança de rede;
- Mecanismos de suporte a qualidade de experiência no *backbone* do núcleo da rede;
- Realizar estudos comparativos utilizando outros modelos de propagação.

### 6.3 Dificuldades encontradas

Durante o desenvolvimento da tese foram encontradas dificuldades que também serão relatadas com o objetivo de auxiliar novos estudos nesta mesma linha de pesquisa que venham utilizar os conhecimentos desta tese.

Entre as principais dificuldades podemos citar:

- A tese envolveu várias linhas de pesquisas requerendo um estudo da arte detalhado sobre os diversos tipos de redes sem fio, sobre as técnicas de inteligência artificial e também um estudo sobre simuladores de eventos discretos.

- A tese envolveu estudo sobre as tecnologias WiFi, WiMAX e LTE e por uma questão de custos financeiros não foi possível adquirir equipamentos para *testbeds*. A comprovação da mesma foi através de simulações.

- Um estudo aprofundado sobre a ferramenta de simulação de evento discreto e conseqüentemente um estudo aprofundado em linguagens de programação para que os mecanismos propostos fossem desenvolvidos.

- A repetição de quantidade de simulações causando um grande consumo de tempo de execução e também gerando uma grande quantidade de dados a serem filtrados para que se chegasse a um resultado final.

Ao optar por uma tese em uma linha de pesquisa abrangente a fim de solucionar um problema crítico que é a seleção de conectividade em ambientes de redes sem fio heterogêneas, a ponto de desenvolver mecanismos que sejam viáveis a serem utilizados encontra-se uma série de dificuldades que são: desde um estudo intenso da literatura para que a partir disso seja possível elaborar uma proposta de tese, assim como, um estudo intenso para que o desenvolvimento da mesma gere resultados significantes a uma área de pesquisa tão abrangente.

## 6.4 Publicações

Essa seção mostra as principais publicações obtidas até o momento por esta tese na Tabela 14.

<b>Artigo</b>	<b>Conferência</b>	<b>Ano</b>
A Quality of Experience Handover Architecture for Heterogeneous Mobile Wireless Multimedia Networks	IEEE Communications Magazine	2013
Arquitetura com Suporte à Predição de QoE e Mobilidade para Aplicações de Vídeo em Redes Sem Fio Heterogêneas	XI Workshop em Desempenho de Sistemas Computacionais e de Comunicação (WPerformance)	2012
A Mobile WiMAX Architecture with QoE Support for the Future Multimedia Internet	WiMAX / Book 2	2011
Aprovisionamento de QoS e QoE em Redes Sem Fio Heterogêneas com Suporte a Balanceamento de Carga	XVI Workshop de Gerência e Operação de Redes e Serviços (WGRS 2011), 2011, Campo Grande. XVI Workshop de Gerência e Operação de Redes e Serviços (WGRS)	2011
Arquitetura de Pré-Authenticação Segura com Suporte a QoE para Aplicações Móveis Multimídia em Redes WiMAX.	I Workshop de Redes de Acesso em Banda Larga (WRA)	2011
QoS Mapping in Heterogeneous Wireless Networks	IWT - International Workshop on Telecommunications	2011
Gerenciamento de Handover Transparente com Suporte Integrado a QoS/QoE em Redes Heterogêneas	X Workshop em Desempenho de Sistemas Computacionais e de Comunicação – Wperformance	
Arquitetura heterogênea com gerenciamento da QoE e suporte a handover transparente através de um Sistema Fuzzy-Genético	XVI Simpósio Brasileiro de Sistemas Multimídia e Web (Webmedia)	2010

Tabela 14 – Publicações.

## Referências Bibliográficas

ASTELY, D. ; DAHLMAN, E.; FURUSKAR, A. ; JADING, Y. ; LINDSTROM, M. ; Parkvall, S. LTE: the evolution of mobile broadband. **IEEE Communications Magazine**, Volume: 47. p.: 44 – 51, 2009.

ANAS, M. ; CALABRESE, F. ; OSTLING, P.; PEDERSEN, K. ; MOGENSEN, P. Performance Analysis of Handover Measurements and Layer3 Filtering for Utran . IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, p.: 1 – 5, 2007

ANATEL. Disponível em <<http://www.anatel.gov.br/Portal/exibirPortalNoticias.do?acao=carregaNoticia&codigo=25125>> Acesso em: 20. jan. 2013

AOYAMA, T. A New Generation Network: Beyond the Internet and NGN. **IEEE Communications Magazine**, Volume 47. p: 82 – 87. 2009.

BROOKS, P.; HESTNES, B.; User measures of quality of experience: why being objective and quantitative is important. **IEEE Network**. Volume: 24 , Issue: 2. p.: 8 – 13, 2010.

CHERIF, W.; KSENTINI, A.; NEGRU, D.; SIDIBE, M. “A\_PSQA: Efficient real-time video streaming QoE tool in a future media internet context” .IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME). 2011

DAHLAM, E. PARKVALL, S. SKÖLD, J. “4G LTE/LTE – Advanced for Mobile Broadband”. Academic Press. ISBN: 978 – 0 – 12 – 385489 – 6. 2011

DERUYCK, M. ; VEREECKEN, W. ; TANGHE, E. ; JOSEPH, W. ; Pickavet, M. ; MARTENS, L. ; DEMEESTER, P. Comparison of power consumption of mobile WiMAX, HSPA and LTE access networks. 9th Conference on Telecommunications Internet and Media Techno Economics (CTTE), p.: 1 – 7, 2010.

EBERHART, R. SHI, Y. Computational Intelligence. **Academic Press**. 2001.

Evalvid. Disponível em: <http://www.tkn.tu-berlin.de/research/evalvid/>. Acesso em: 20 jan. 2010.

FALLAHI, A. HOSSAIN, E., QoS provisioning in wireless video sensor networks: a dynamic power management framework. **IEEE Wireless Communication**. Volume 14. p. 40 – 49. ISSN: 1536-1284. 2007.

FERRUS, R.; GELONCH, A.; CASADEVALL, F.; REVES, X.; NAFISI, N. “EVEREST testbed: QoS management evaluation in B3G networks”. 2nd International Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities. 2006.

GHOSH, A. ; RATASUK, R. ; MONDAL, B. ; MANAGALVEDHE, N. ; THOMAS, T. (2010) LTE-advanced: next-generation wireless broadband technology. **IEEE Wireless Communications**, vol. 17, p. 10 – 22.

GUPTA, M. ; JHA, C. ; KOC, T. ; VANNITHAMBY, R. “Energy impact of emerging mobile internet applications on LTE networks: issues and solutions”. **IEEE Communications Magazine**, Volume 51, Issue 2. pp 90 – 97. 2013.

GUSTAFSSON, E.; JONSSON, A. Always Best Connected, **IEEE Wireless Communications**, v. 10, 1. ed., p. 49-55, 2006.

HEIDARINEZHAD, .R. et al. A Connection Selection Method and Vertical Handoff in Hybrid Wireless Environment, IEEE International Conference on Future Networks, p. 161-165, 2009.

HU,W. et al. An Intelligent Resource Management Scheme for WiFi and WiMAX Heterogeneous Multi-Hop Relay Networks, Expert Systems with Applications. Elsevier, p. 1134-1142, 2010.

HUANG, C. et al. Multihomed SIP-Based Network Mobility Using IEEE 802.21 Media Independent Handover , IEEE International Conference Communications - ICC, p. 1-5, 2009.

IEEE 802.11. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control MAC and Physical Layer PHY Specifications, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1999.

IEEE 802.16-2009. Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2009.

IEEE P802.21. Standard for Local and Metropolitan Area Networks: Media Independent Handover Services, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2009.

IETF. Internet Engineering Task Force. RFC 3775. Mobility Support in IPv6, 2006.  
Disponível em: <http://datatracker.ietf.org/doc/rfc3775/>. Acesso em: 20 jan. 2012.

ITU. International Telecommunications Union. P.800: Methods for subjective determination of transmission quality. Disponível em: <http://www.itu.int/rec/T-REC-P.800-199608-I/en>. Acesso em: 20 jan. 2012.

ITU-R Recommendation BT.500-7, “Methodology for the Subjective Assessment of the Quality of Television Pictures”, Technical Report, 1990.

ITU-R Recommendation P.800, “Methods for objective and subjective assessment of quality”, Technical Report, 1996.

JAIN, R. “Quality of experience”. **IEEE Multimedia**. Volume 11, p. 90 – 98. 2004.

KASSAR M. et al. An Overview of vertical handover decision strategies in heterogeneous wireless networks, IEEE Computer Communications 31, p. 2607-2620, 2008.

MANGOLD, S.; CHOI, S.; MAY, P.; KLEIN, O.; HIERTZ, G.; STIBOR, L.; “IEEE 802.11e Wireless LAN for Quality of Service”, European Wireless. Fevereiro, 2002.

MARIE, L; NILSSON, M.; Investigating the energy consumption of a wireless network interface in an ad hoc networking environment. p.: 1548–1557,2001.

LIU, R. ; LIN, Y.; TSAI, S.; An Investigation on LTE Mobility Management. IEEE Transactions on Mobile Computing, Volume: 12. p.: 166 – 176. 2013

MSU. Disponível em <  
[http://compression.ru/video/quality\\_measure/video\\_measurement\\_tool\\_en.html](http://compression.ru/video/quality_measure/video_measurement_tool_en.html) > Acesso em:  
 20. jan.2010

NIST. Disponível em: <http://w3.antd.nist.gov/seamlessandsecure/pubtool.shtml#tools>. Acesso em: 20 jan. 2010.

NKANSAH-GYEKYE, Y.; AGBINYA, I. The Vertical Handoff Decision Algorithm for Next Generation Wireless Networks, IEEE Third International Conference on Broadband Communications, Information Technology & Biomedical Applications, p. 358 – 364, 2007.

ns. The Network Simulator. Disponível em : <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>. Acesso em: 20 jan. 2010.

PIRO, G. ; GRIECO, L.; BOGGIA, G. ; CAPOZZI, F. ; CAMARDA, P. Simulating LTE Cellular Systems: An Open-Source Framework. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Volume 60. p.: 498 – 513. 2011

RAKHMATOV, D.; VRUDHULA, S. An analytical high-level battery model for use in energy management of portable electronic systems. International conference on Computer-aided design (ICCAD). p. 488–493, 2001.

RAPPAPORT, S., "Traffic Model and Performance Analysis for Cellular Mobile Radio Telephone Systems with Prioritized and Nonprioritized Handoff Procedures", IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. VT-35, nº 3, p.: 77-92, 1986.

LI, Q.; LI, G.; LEE, W. ; LEE, M. ; MAZZARESE, D. ; CLERCKX, B. ; LI, Z.; MIMO Techniques in WiMAX and LTE: A Feature Overview IEEE Communications Magazine, vol. 48 ,p. 86 – 92. 2010.

QIU. Q ; ZHAO L.; PING L. ; WU, C. “Avoiding the evolved node B buffer overflow by using advertisement window control”. 11th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT), p.: 268 – 273. 2011.

SEZIA, S.; TOUFIK, I.; BAKER, M. “ LTE: The UMTS Long Term Evolution ”. John Wiley & Sons, Ltd. 2ª Edição. ISBN: 978 – 0 – 47 – 066025 – 6. 2011

SEHRAWAT, S.; PRASAD, R.; HARIHAR, D. “Performance Analysis of QoS supported by Enhanced Distributed Channel Access (EDCA) mechanism in IEEE 802.11e”. International Journal of Computer Science. 2007.

SHE, J.; FEN, H.; PIN-HAN, H.; LIANG-LIANG, X.; “IPTV over WiMAX: Key Success Factors, Challenges, and Solutions [Advances in Mobile Multimedia]”. IEEE Communications Magazine. Volume 45. p 87 – 93. 2007.

TAKAHASHI , A.; HANDS, D.; BARRIAC , V. “Standardization activities in the ITU for a QoE assessment of IPTV”. **IEEE Communication Magazine**. 2008.

TAKAHATA, K.; UCHIDA, N.; SHIBATA, Y. QoS control for real time video stream over hybrid network by wired and wireless LANs. Advanced Information Networking and Applications (AINA). p 35 – 41. 2005.

UEMURA, S.; FUKUMOTO, N.; YAMADA, H.; NAKAMURA, H. “QoS/QoE Measurement System Implemented on Cellular Phone for NGN”. IEEE Consumer Communications and Networking Conference. p. 117 – 121. 2008.

VQEG, “Video Quality Experts Group”. Disponível em <<http://www.its.bldrdoc.gov/vqeg> >. Acesso em 10 de abril de 2012.

WANG, Z; LU, L.; BOVIC, A.; Video quality assessment based on structural distortion measurement, *Signal Processing: Image Communication*, vol. 19, no. 2, 2004.

Wi-Fi Alliance. Disponível em: <http://www.wi-fi.org/>. Acesso em: 20 jan. 2011.

WINKLER, S. Perceptual video quality metrics – a review, in *Digital Video Image Quality and Perceptual Coding*, cap.5, CRC Press, 2005.

YUV CIF. Disponível em: <http://www.tkn.tu-berlin.de/research/evalvid/cif.html>. Acesso em: 20 jan. 2010.

Yang Y. ; HU, H. ;XU, J.; MAO, G.; Relay technologies for WiMax and LTE-advanced mobile systems. **IEEE Communications Magazine**, vol.47, p. 100 – 105. 2009.

ZHENG, H.; WANG, S.; COPELAND, J.; QoS constrained resource allocation for multimedia wireless networks. *IEEE Vehicular Technology Conference*. Volume 2. p 913 – 933. 2000.

## Anexos

Script Tcl

```
set max_fragmented_size 1024
```

```
#add udp header(8 bytes) and IP header (20bytes)
```

```
set packetSize 1052
```

```
global ns
```

```
#set debug attributes
```

```
Agent/ND set debug_ 1
```

```
Agent/MIH set debug_ 1
```

```
Agent/MIHUser/IFMNGMT/MIPV6 set debug_ 1
```

```
Mac/802_16 set debug_ 1
```

```
Mac/802_11 set debug_ 1
```

```
Mac/802_16 set dcd_interval_ 5 ;#max 10s
```

```
Mac/802_16 set ucd_interval_ 5 ;#max 10s
```

```
set default_modulation OFDM_16QAM_3_4 ;#OFDM_BPSK_1_2
```

```
set contention_size 5 ;#for initial ranging and bw
```

```
Mac/802_16 set t21_timeout_ 0.02 ;#max 10s, to replace the timer for looking at  
preamble
```

```
Mac/802_16 set client_timeout_ 50
```

```
#defines function for flushing and closing files
```

```
proc finish {} {
```



```
set router0 [$ns node 0.0.0] ; $router0 set X_ 500.0; $router0 set Y_ 500.0; $router0 set Z_
0.0 ;

set router1 [$ns node 1.0.0]; $router1 set X_ 550.0; $router1 set Y_ 500.0; $router1 set Z_ 0.0
;

set router2 [$ns node 2.0.0]; $router2 set X_ 650.0; $router2 set Y_ 500.0; $router2 set Z_ 0.0
;

set router3 [$ns node 3.0.0]; $router3 set X_ 700.0; $router3 set Y_ 500.0; $router3 set Z_ 0.0
;

set router4 [$ns node 4.0.0]; $router4 set X_ 550.0; $router4 set Y_ 500.0; $router4 set Z_ 0.0
;

set router5 [$ns node 5.0.0]; $router5 set X_ 650.0; $router5 set Y_ 500.0; $router5 set Z_ 0.0
;

set router6 [$ns node 6.0.0]; $router6 set X_ 500.0; $router6 set Y_ 400.0; $router6 set Z_ 0.0
;

set router7 [$ns node 7.0.0] ; $router7 set X_ 600.0; $router7 set Y_ 400.0; $router7 set Z_
0.0 ;

set router8 [$ns node 8.0.0] ; $router8 set X_ 700.0; $router8 set Y_ 400.0; $router8 set Z_
0.0 ;

# connect links

$ns duplex-link $router0 $router1 1000Mb 40ms DropTail

$ns duplex-link $router1 $router2 1000Mb 40ms DropTail

$ns duplex-link $router2 $router3 1000Mb 40ms DropTail

$ns duplex-link $router1 $router4 1000Mb 40ms DropTail

$ns duplex-link $router2 $router5 1000Mb 40ms DropTail
```

```

$ns duplex-link $router4 $router6 1000Mb 40ms DropTail

$ns duplex-link $router4 $router7 1000Mb 40ms DropTail

$ns duplex-link $router5 $router8 1000Mb 40ms DropTail

# creation of the MultiFaceNodes. It MUST be done before the 802.11

$ns node-config -multiIf ON                ;#to create MultiFaceNode

for {set i 1} {$i <= $nb_mn} {incr i} {

    set multiFaceNode($i) [$ns node [expr 15+$i].0.0]

}

$ns node-config -multiIf OFF

# parameter for wireless nodes

set opt(chan)      Channel/WirelessChannel ;# channel type for 802.11

set opt(prop)      Propagation/TwoRayGround ;# radio-propagation model 802.11

set opt(netif)     Phy/WirelessPhy        ;# network interface type 802.11

set opt(mac)       Mac/802_11             ;# MAC type 802.11

set opt(ifq)       Queue/DropTail/PriQueue ;# interface queue type 802.11

set opt(ll)        LL                      ;# link layer type 802.11

set opt(ant)       Antenna/OmniAntenna    ;# antenna model 802.11

set opt(ifqlen)    50                      ;# max packet in ifq 802.11

set opt(adhocRouting) DSDV                ;# routing protocol 802.11

set opt(umtsRouting) ""                   ;# routing for UMTS (to reset node config)

```

```
set opt(x)          2000                ;# X dimension of the topography

set opt(y)          2000                ;# Y dimension of the topography

set namtrace [open namout.nam w]

$ns namtrace-all-wireless $namtrace $opt(x) $opt(y)

# configure rate for 802.11

Mac/802_11 set basicRate_ 6Mb

Mac/802_11 set dataRate_ 54Mb

Mac/802_11 set bandwidth_ 54Mb

#create the topography

set topo [new Topography]

$topo load_flatgrid $opt(x) $opt(y)

#puts "Topology created"

set chan [new $opt(chan)]

# create God

create-god 20                                ;# give the number of nodes

Phy/WirelessPhy set Pt_ 0.0134

Phy/WirelessPhy set freq_ 2412e+6

Phy/WirelessPhy set RXThresh_ 5.25089e-10

Phy/WirelessPhy set CStresh_ [expr 0.9*[Phy/WirelessPhy set RXThresh_]]

# configure Access Points
```

```
$ns node-config -adhocRouting $opt(adhocRouting) \
```

```
  -llType $opt(ll) \
```

```
  -macType $opt(mac) \
```

```
  -channel $chan \
```

```
  -ifqType $opt(ifq) \
```

```
  -ifqLen $opt(ifqlen) \
```

```
  -antType $opt(ant) \
```

```
  -propType $opt(prop) \
```

```
  -phyType $opt(netif) \
```

```
  -topoInstance $topo \
```

```
  -wiredRouting ON \
```

```
  -agentTrace ON \
```

```
  -routerTrace OFF \
```

```
  -macTrace ON \
```

```
  -movementTrace OFF
```

```
# configure Base station 802.11
```

```
set bstation802 [$ns node 10.0.0] ;
```

```
$bstation802 set X_ 550.0
```

```
$bstation802 set Y_ 350.0
```

```
$bstation802 set Z_ 0.0
```

```
puts "bstation802: tcl=$bstation802; id=[$bstation802 id]; addr=[$bstation802 node-addr]"

# we need to set the BSS for the base station

set bstationMac [$bstation802 getMac 0]

set AP_ADDR_0 [$bstationMac id]

puts "bss_id for bstation=$AP_ADDR_0"

$bstationMac bss_id $AP_ADDR_0

$bstationMac enable-beacon

set bstation802_1 [$ns node 11.0.0] ;

$bstation802_1 set X_ 620.0

$bstation802_1 set Y_ 350.0

$bstation802_1 set Z_ 0.0

puts "bstation802_1: tcl=$bstation802_1; id=[$bstation802_1 id]; addr=[$bstation802_1
node-addr]"

# we need to set the BSS for the base station

set bstationMac_1 [$bstation802_1 getMac 0]

set AP_ADDR_1 [$bstationMac_1 id]

puts "bss_id for bstation=$AP_ADDR_1"

$bstationMac_1 bss_id $AP_ADDR_1

$bstationMac_1 enable-beacon

# creation of the wireless interface 802.11

$ns node-config -wiredRouting OFF \
```

```

-macTrace ON

for {set i 1} {$i <= $nb_mn} {incr i} {

set iface11_($i) [$ns node 10.0.$i]                ;# node id is 8.

$iface11_($i) random-motion 0                      ;# disable random motion

$iface11_($i) base-station [AddrParams addr2id [$bstation802 node-addr]] ;#attach mn to
basestation

$iface11_($i) set X_ 450.$i

$iface11_($i) set Y_ 330.0

$iface11_($i) set Z_ 0.0

# define node movement. We start from outside the coverage, cross it and leave.

$ns at 5.0 "$iface11_($i) setdest 750.($i) 330.0 3.0"

}

# add link to backbone

$ns duplex-link $bstation802 $router6 1000Mb 40ms DropTail

$ns duplex-link $bstation802_1 $router7 1000Mb 25ms DropTail

# add Wimax nodes

set opt(netif)    Phy/WirelessPhy/OFDM    ;# network interface type 802.16

set opt(mac)      Mac/802_16             ;# MAC type 802.16

# radius =

Phy/WirelessPhy set Pt_ 0.025

Phy/WirelessPhy set RXThresh_ 1.26562e-13 ;#1000m radius

```

```
Phy/WirelessPhy set CStresh_ [expr 0.8*[Phy/WirelessPhy set RXThresh_]]
```

```
# configure Access Points
```

```
$ns node-config -adhocRouting $opt(adhocRouting) \
```

```
    -llType $opt(ll) \
```

```
    -macType $opt(mac) \
```

```
    -channel $chan \
```

```
    -ifqType $opt(ifq) \
```

```
    -ifqLen $opt(ifqlen) \
```

```
    -antType $opt(ant) \
```

```
    -propType $opt(prop) \
```

```
    -phyType $opt(netif) \
```

```
    -topoInstance $topo \
```

```
    -wiredRouting ON \
```

```
    -agentTrace ON \
```

```
    -routerTrace ON \
```

```
    -macTrace ON \
```

```
    -movementTrace OFF
```

```
# configure Base station 802.16
```

```
set bstation802_16 [$ns node 9.0.0] ;
```

```
$bstation802_16 set X_ 450
```

```
$bstation802_16 set Y_ 350
```

```
$bstation802_16 set Z_ 0.0
```

```
puts "bstation802_16: tcl=$bstation802_16; id=[$bstation802_16 id]; addr=[$bstation802_16  
node-addr]"
```

```
set clas [new SDUClassifier/Dest]
```

```
[$bstation802_16 set mac_(0)] add-classifier $clas
```

```
#set the scheduler for the node. Must be changed to -shed [new $opt(sched)]
```

```
set bs_sched [new WimaxScheduler/BS]
```

```
$bs_sched set-default-modulation $default_modulation
```

```
[$bstation802_16 set mac_(0)] set-scheduler $bs_sched
```

```
[$bstation802_16 set mac_(0)] set-channel 1
```

```
set bstation802_16_1 [$ns node 12.0.0] ;
```

```
$bstation802_16_1 set X_ 670
```

```
$bstation802_16_1 set Y_ 350
```

```
$bstation802_16_1 set Z_ 0.0
```

```
puts "bstation802_16_1: tcl=$bstation802_16_1; id=[$bstation802_16_1 id];  
addr=[$bstation802_16_1 node-addr]"
```

```
set clas_1 [new SDUClassifier/Dest]
```

```
[$bstation802_16_1 set mac_(0)] add-classifier $clas_1
```

```
#set the scheduler for the node. Must be changed to -shed [new $opt(sched)]
```

```
set bs_sched_1 [new WimaxScheduler/BS]
```

```

$bs_sched_1 set-default-modulation $default_modulation

[$bstation802_16_1 set mac_(0)] set-scheduler $bs_sched_1

[$bstation802_16_1 set mac_(0)] set-channel 0

# creation of the wireless interface 802.16

$ns node-config -wiredRouting OFF \

    -macTrace ON

for {set i 1} {$i <= $nb_mn} {incr i} {

set iface16_($i) [$ns node 9.0.$i]                ;# node id is 8.

$iface16_($i) random-motion 0                    ;# disable random motion

$iface16_($i) base-station [AddrParams addr2id [$bstation802_16 node-addr]] ;#attach mn to
basestation

$iface16_($i) set X_ 450.$i

$iface16_($i) set Y_ 330.0

$iface16_($i) set Z_ 0.0

set clas_($i) [new SDUClassifier/Dest]

[$iface16_($i) set mac_(0)] add-classifier $clas_($i)

#set the scheduler for the node. Must be changed to -shed [new $opt(sched)]

set ss_sched($i) [new WimaxScheduler/SS]

[$iface16_($i) set mac_(0)] set-scheduler $ss_sched($i)

[$iface16_($i) set mac_(0)] set-channel 1

# define node movement. We start from outside the coverage, cross it and leave.

```

```
$ns at 5.0 "$iface16_($i) setdest 750.($i) 330.0 3.0"
```

```
puts "iface16_($i): tcl=$iface16_($i); id=[$iface16_($i) id]; addr=[$iface16_($i) node-addr]"
```

```
}
```

```
#####LTE
```

```
Phy/WirelessPhy set freq_ 2.6e9
```

```
Phy/WirelessPhy set Pt_ 0.025
```

```
Phy/WirelessPhy set RXThresh_ 1.26562e-13 ;#1000m radius
```

```
Phy/WirelessPhy set CStresh_ [expr 0.8*[Phy/WirelessPhy set RXThresh_]]
```

```
# configure Access Points
```

```
$ns node-config -adhocRouting $opt(adhocRouting) \
```

```
    -llType $opt(ll) \
```

```
    -macType $opt(mac) \
```

```
    -channel $chan \
```

```
    -ifqType $opt(ifq) \
```

```
    -ifqLen $opt(ifqlen) \
```

```
    -antType $opt(ant) \
```

```
    -propType $opt(prop) \
```

```
    -phyType $opt(netif) \
```

```
    -topoInstance $topo \
```

```
    -wiredRouting ON \
```

```
-agentTrace ON \  
  
-routerTrace ON \  
  
-macTrace ON \  
  
-movementTrace OFF  
  
# configure Base station 802.16  
  
set bstation_lte [$ns node 13.0.0] ;  
  
$bstation_lte set X_ 400  
  
$bstation_lte set Y_ 350  
  
$bstation_lte set Z_ 0.0  
  
puts "bstation_lte: tcl=$bstation_lte; id=[$bstation_lte id]; addr=[$bstation_lte node-addr]"  
  
$bs_sched_lte set-default-modulation $default_modulation  
  
set bstation_lte_1 [$ns node 14.0.0] ;  
  
$bstation_lte_1 set X_ 750  
  
$bstation_lte_1 set Y_ 350  
  
$bstation_lte_1 set Z_ 0.0  
  
puts "bstation_lte_1: tcl=$bstation_lte_1; id=[$bstation_lte_1 id]; addr=[$bstation_lte_1  
node-addr]"  
  
$bs_sched__lte_1 set-default-modulation $default_modulation  
  
# creation of the wireless interface 802.16  
  
$ns node-config -wiredRouting OFF \  
  
-macTrace ON
```

```

for {set i 1} {$i <= $nb_mn} {incr i} {

set ifacelte_($i) [$ns node 13.0.$i]                ;# node id is 8.

$ifacelte_($i) random-motion 0                      ;# disable random motion

$ifacelte_($i) base-station [AddrParams addr2id [$bstation_lte node-addr]] ;#attach mn to
basestation

$ifacelte_($i) set X_ 450.$i

$ifacelte_($i) set Y_ 330.0

$ifacelte_($i) set Z_ 0.0

# define node movement. We start from outside the coverage, cross it and leave.

$ns at 5.0 "$ifacelte_($i) setdest 750.($i) 330.0 3.0"

puts "ifacelte_($i): tcl=$ifacelte_($i); id=[$ifacelte_($i) id]; addr=[$iface16_($i) node-addr]"

}

#####

$ns duplex-link $bstation802_16 $router6 4Mb 40ms DropTail

$ns duplex-link $bstation_lte $router6 4Mb 40ms DropTail

$ns duplex-link $bstation802_16_1 $router8 4Mb 25ms DropTail

$ns duplex-link $bstation_lte_1 $router8 4Mb 25ms DropTail

$ns duplex-link-op $router0 $router1 orient right

$ns duplex-link-op $router1 $router2 orient right

$ns duplex-link-op $router2 $router3 orient right

$ns duplex-link-op $router1 $router4 orient down

```

```

$ns duplex-link-op $router2 $router5 orient down

$ns duplex-link-op $router4 $router6 orient left-down

$ns duplex-link-op $router4 $router7 orient right-down

$ns duplex-link-op $router5 $router8 orient right-down

$ns duplex-link-op $router6 $bstation_lte orient left-down

$ns duplex-link-op $router6 $bstation802_16 orient down

$ns duplex-link-op $router6 $bstation802 orient right-down

$ns duplex-link-op $router7 $bstation802_1 orient down

$ns duplex-link-op $router8 $bstation802_16_1 orient down

$ns duplex-link-op $router8 $bstation_lte_1 orient right-down

# add interfaces to MultiFaceNode

for {set i 1} {$i <= $nb_mn} {incr i} {

    $multiFaceNode($i) add-interface-node $iface11_($i)

    $multiFaceNode($i) add-interface-node $iface16_($i)

    $multiFaceNode($i) add-interface-node $ifacelte_($i)

}

# install ND modules

# now WLAN

set nd_bs [$bstation802 install-nd]

$nd_bs set-router TRUE

```

```
$nd_bs router-lifetime 1800

set nd_bs3 [$bstation802_1 install-nd]

$nd_bs3 set-router TRUE

$nd_bs3 router-lifetime 1800

for {set i 1} {$i <= $nb_mn} {incr i} {

set nd_mn_($i) [$iface11_($i) install-nd]

}

# now WIMAX

set nd_bs2 [$bstation802_16 install-nd]

$nd_bs2 set-router TRUE

$nd_bs2 router-lifetime 20 ;#just enough to expire while we are connected to wlan.

set nd_bs5 [$bstation802_16_1 install-nd]

$nd_bs5 set-router TRUE

$nd_bs5 router-lifetime 20 ;#just enough to expire while we are connected to wlan.

for {set i 1} {$i <= $nb_mn} {incr i} {

set nd_mn2_($i) [$iface16_($i) install-nd]

}

#now LTE

set nd_bs6 [$bstation_lte install-nd]

$nd_bs6 set-router TRUE
```

```

$nd_bs6 router-lifetime 20 ;#just enough to expire while we are connected to wlan.

set nd_bs7 [$bstation_lte_1 install-nd]

$nd_bs7 set-router TRUE

$nd_bs7 router-lifetime 20 ;#just enough to expire while we are connected to wlan.

for {set i 1} {$i <= $nb_mn} {incr i} {

set nd_mn3_($i) [$ifacelte_($i) install-nd]

}

# install interface manager into multi-interface node and CN

Agent/MIHUser/IFMNGMT/MIPV6/Handover/Handover2 set debug_ 1

for {set i 1} {$i <= $nb_mn} {incr i} {

set handover($i) [new Agent/MIHUser/IFMNGMT/MIPV6/Handover/Handover2]

$multiFaceNode($i) install-ifmanager $handover($i)

$nd_mn_($i) set-ifmanager $handover($i)

$handover($i) nd_mac $nd_mn_($i) [$iface11_($i) set mac_(0)] ;#to know how to send RS

$nd_mn2_($i) set-ifmanager $handover($i)

$handover($i) nd_mac $nd_mn2_($i) [$iface16_($i) set mac_(0)] ;#to know how to send RS

$nd_mn3_($i) set-ifmanager $handover($i)

$handover($i) nd_mac $nd_mn3_($i) [$ifacelte_($i) set mac_(0)] ;#to know how to send RS

}

set ifmgmt_cn [$router0 install-default-ifmanager]

```

```

# install MIH in multi-interface node

for {set i 1} {$i <= $nb_mn} {incr i} {

set mih($i) [$multiFaceNode($i) install-mih]

}

for {set i 1} {$i <= $nb_mn} {incr i} {

$handover($i) connect-mih $mih($i) ;#create connection between MIH and iface management

}

# install MIH on AP/BS

set mih_bs [$bstation802 install-mih]

set tmp_bs [$bstation802 set mac_(0)]

$tmp_bs mih $mih_bs

$mih_bs add-mac $tmp_bs

set mih_bs [$bstation802_1 install-mih]

set tmp_bs [$bstation802_1 set mac_(0)]

$tmp_bs mih $mih_bs

$mih_bs add-mac $tmp_bs

set mih_bs [$bstation802_16 install-mih]

set tmp_bs [$bstation802_16 set mac_(0)]

$tmp_bs mih $mih_bs

$mih_bs add-mac $tmp_bs

```

```

set mih_bs [$bstation802_16_1 install-mih]

set tmp_bs [$bstation802_16_1 set mac_(0)]

$tmp_bs mih $mih_bs

$mih_bs add-mac $tmp_bs

set mih_bs [$bstation_lte install-mih]

set tmp_bs [$bstation_lte set mac_(0)]

$tmp_bs mih $mih_bs

$mih_bs add-mac $tmp_bs

set mih_bs [$bstation_lte_1 install-mih]

set tmp_bs [$bstation_lte_1 set mac_(0)]

$tmp_bs mih $mih_bs

$mih_bs add-mac $tmp_bs

# Now we can register the MIH module with all the MACs

for {set i 1} {$i <= $nb_mn} {incr i} {

set tmp2 [$iface11_($i) set mac_(0)] ;#in 802.11 one interface is created

$tmp2 mih $mih($i)

$mih($i) add-mac $tmp2 ;#inform the MIH about the local MAC

set tmp2 [$iface16_($i) set mac_(0)] ;#in 802.16 one interface is created

$tmp2 mih $mih($i)

$mih($i) add-mac $tmp2 ;#inform the MIH about the local MAC

```

```
set tmp2 [$ifaceIte_($i) set mac_(0)] ;#in 802.16 one interface is created
```

```
$tmp2 mih $mih($i)
```

```
$mih($i) add-mac $tmp2 ;#inform the MIH about the local MAC
```

```
}
```

```
# set the starting time for Router Advertisements
```

```
$ns at 2 "$nd_bs start-ra"
```

```
$ns at 2 "$nd_bs2 start-ra"
```

```
$ns at 2 "$nd_bs3 start-ra"
```

```
$ns at 2 "$nd_bs5 start-ra"
```

```
$ns at 2 "$nd_bs6 start-ra"
```

```
$ns at 2 "$nd_bs7 start-ra"
```

```
#####
```

```
for {set i 1} {$i < 2} {incr i} {
```

```
set udp_($i) [new Agent/myUDP]
```

```
$ns attach-agent $router0 $udp_($i)
```

```
$udp_($i) set packetSize_ $packetSize
```

```
$udp_($i) set fid_ [expr $i]
```

```
$ns bind-flowid-to-SBTS [expr $i]
```

```
$udp_($i) set_filename sd_a0$i
```

```
set null_($i) [new Agent/myEvalvid_Sink]
```

```
$ns attach-agent $multiFaceNode($i) $null_($i)

$ns connect $udp_($i) $null_($i)

$null_($i) set_filename rd_a0$i

set original_file_name_($i) st_a01

set trace_file_name_($i) video$i.dat

set original_file_id_($i) [open $original_file_name_($i) r]

set trace_file_id_($i) [open $trace_file_name_($i) w]

set pre_time_($i) 0

while {[eof $original_file_id_($i)] == 0} {

    gets $original_file_id_($i) current_line

    scan $current_line "%d%s%d%d%f" no_frametype_ length_ tmp1_ tmp2_

    #set time [expr int(($tmp2_ - $pre_time)*1000000.0)]

    set time [expr 1000 * 1000/30]

    if { $frametype_ == "I" } {

        set type_v 1

        set prio_p 0

    }

    if { $frametype_ == "P" } {

        set type_v 2

        set prio_p 0

    }

}
```

```
}

if { $frametype_ == "B" } {

    set type_v 3

    set prio_p 0

}

if { $frametype_ == "H" } {

    set type_v 1

    set prio_p 0

}

puts $trace_file_id_($i) "$time $length_ $type_v $prio_p $max_fragmented_size"

set pre_time $tmp2_

}

close $original_file_id_($i)

close $trace_file_id_($i)

set end_sim_time_($i) $tmp2_

puts "$end_sim_time_($i)"

set trace_file_($i) [new Tracefile]

$trace_file_($i) filename $trace_file_name_($i)

set video_($i) [new Application/Traffic/myEvalvid]

$video_($i) attach-agent $udp_($i)
```

```

$video_($i) attach-tracefile $trace_file_($i)

$handover($i) add-flow $null_($i) $udp_($i) $ifacelte_($i) 1

$ns at 5.0 "$video_($i) start"

$ns at 75.1 "$video_($i) stop"

}

$ns at 75.1 "finish"

#####

for {set i 2} {$i <= $nb_mn} {incr i} {

set source_($i) [new Agent/UDP]

$source_($i) set fid_ [expr $i]

$ns color [expr $i] "red"

set sink_($i) [new Agent/LossMonitor]

$ns attach-agent $router0 $source_($i)

$ns attach-agent $multiFaceNode($i) $sink_($i)

$ns connect $source_($i) $sink_($i)

set cbr_($i) [new Application/Traffic/CBR]

$source_($i) set packetSize_ 100

$cbr_($i) set packetSize_ 100

$cbr_($i) set rate_ 1Mb

$cbr_($i) attach-agent $source_($i)

```

```
$ns at 5.0 "$cbr_($i) start"
```

```
$handover($i) add-flow $sink_($i) $source_($i) $ifacelte_($i) 1
```

```
}
```

```
#####
```

```
$ns run
```