

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**QUALIDADE DE SERVIÇO EM REDES WIMAX**

**GUILHERME FIGUEIREDO OLIVEIRA FRANÇA**  
**PEDRO HÉLIO MEDEIROS DE LIMA**  
**RAFAEL DE MELO LOPES**

**ORIENTADOR: ALEX HELDER CORDEIRO DE OLIVEIRA**

**PROJETO FINAL DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**PUBLICAÇÃO:**  
**BRASÍLIA/DF: JUNHO - 2008**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**QUALIDADE DE SERVIÇO EM REDES WIMAX**

**GUILHERME FIGUEIREDO OLIVEIRA FRANÇA**  
**PEDRO HÉLIO MEDEIROS DE LIMA**  
**RAFAEL DE MELO LOPES**

**PROJETO FINAL SUBMETIDO AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL.**

**APROVADO POR:**

---

**Prof. Alex Helder Cordeiro de Oliveira, Msc. (ENE-UnB)**  
**(Orientador)**

---

**Prof. Paulo Henrique Portela de Carvalho, Dr. (ENE-UnB)**  
**(Examinador Interno)**

---

**Profa. Priscila América Solís Mendez Barreto, Dra. (CIC-UnB)**  
**(Examinadora Externa)**

**BRASÍLIA/DF, 30 DE JUNHO DE 2008**

## FICHA CATALOGRÁFICA

FRANÇA, GUILHERME FIGUEIREDO OLIVEIRA

LIMA, PEDRO HÉLIO MEDEIROS DE

LOPES, RAFAEL DE MELO

Qualidade de Serviço em Redes WiMAX [Distrito Federal] 2008.

(ENE/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Elétrica, 2008). Projeto Final de  
Graduação – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.  
Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Qualidade de Serviço

2. Redes Sem Fio

3. Wi-Fi

4. UMTS

5. WiMAX

6. Simulação em NS2

I. ENE/FT/UNB.

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FRANÇA, G. F. O., LIMA, P. H. M., LOPES, R. M. (2008). Qualidade de Serviço em Redes WiMAX. Projeto Final de Graduação, Publicação, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOMES DOS AUTORES: Guilherme Figueiredo Oliveira França, Pedro Hélio Medeiros de Lima, Rafael de Melo Lopes.

TÍTULO: Qualidade de Serviço em Redes WiMAX.

GRAU: Bacharel

ANO: 2008

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste projeto final de graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. Os autores reservam outros direitos de publicação e nenhuma parte deste projeto final de graduação pode ser reproduzida sem a autorização por escrito dos autores.

---

Guilherme Figueiredo Oliveira França

---

Pedro Hélio Medeiros de Lima

---

Rafael de Melo Lopes

Campus Universitário Darcy Ribeiro, Faculdade de Tecnologia.  
CEP 70910-900 – Brasília – DF - Brasil

## **DEDICATÓRIA**

Dedicamos esse trabalho a nossos Pais  
por sempre incentivarem nosso  
crescimento profissional.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos primeiramente à Deus por todas as graças em nossas vidas. Ao nosso orientador, Alex Helder Cordeiro de Oliveira, que nos orientou com maestria. Aos Professores da Universidade de Brasília que tiveram papel importante em nossa formação acadêmica, em especial aos do Departamento de Engenharia Elétrica. Aos nossos colegas de classe que compartilharam dessa jornada. Agradecemos também nossos Pais, familiares e amigos que nos apóiam incondicionalmente em todos os momentos.

À TODOS, NOSSO MUITO OBRIGADO!

## **RESUMO**

### **QUALIDADE DE SERVIÇO EM REDES WIMAX**

**Autores:** Guilherme Figueiredo Oliveira França; Pedro Hélio Medeiros de Lima; Rafael de Melo Lopes

**Orientador:** Alex Helder Cordeiro de Oliveira

**Projeto Final de Graduação em Engenharia Elétrica**

**Brasília, junho de 2008**

Este trabalho tem como objetivo apresentar os mecanismos de QoS utilizados nas redes sem fio Wi-Fi, UMTS e WiMAX para garantir a oferta satisfatória de serviços multimídia sobre IP. É apresentada também a simulação de uma rede WiMAX, utilizando-se do *software* livre NS2 (*Network Simulator 2*), de forma a evidenciar o funcionamento e os benefícios do QoS nessa rede.

O controle de acesso ao meio (MAC) de cada tecnologia é detalhado, fornecendo a base teórica para a compreensão de como os mecanismos de QoS aumentam a eficiência dos recursos das redes (da interface aérea).

A simulação de WiMAX no NS2 foi realizada utilizando-se do módulo WiMAX para NS2 desenvolvido pelo grupo de estudo NDSL, no intuito de validar os conceitos de QoS descritos pelos padrões IEEE 802.16d-2004 e IEEE 802.16e-2005. No entanto, os resultados obtidos são diferentes dos esperados. Dessa maneira, são levantados os possíveis erros de implementação e deficiências do módulo NDSL.

# **ABSTRACT**

## **QUALITY OF SERVICE IN WIMAX NETWORKS**

**Authors: Guilherme Figueiredo Oliveira França; Pedro Hélio Medeiros de Lima; Rafael de Melo Lopes**

**Supervisor: Alex Helder Cordeiro de Oliveira**

**Projeto Final de Graduação em Engenharia Elétrica**

**Brasilia, june 2008**

The goal of this work is to present the QoS mechanisms in the wireless networks Wi-Fi, UMTS and WiMAX, in order to guarantee the offer of multimedia services over IP. It is also presented the simulation of a WiMAX network, using the free software NS2 (Network Simulator 2), aiming to validate the operation and the benefits of QoS in this network.

The media access control (MAC) of each technology is presented, providing a theoretical basis to the comprehension of how the QoS mechanisms increase the efficiency of the network resources (of the air interface).

The WiMAX simulation in NS2 was done using the WiMAX module for NS2 developed by the NDSL study group, in order to validate the QoS concepts described on the standards IEEE 802.16d-2004 and IEEE 802.16e-2005. However, the results obtained are different from the expected. Therefore, the possible implementation errors are pointed out as well as the NDSL module deficiencies.

# SUMÁRIO

<b>1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 - WI-FI.....</b>	<b>4</b>
<b>2.1 - IEEE 802.11 – MÉTODOS LEGADOS – DCF E PCF.....</b>	<b>5</b>
<b>2.1.1 - DCF [9] .....</b>	<b>5</b>
<b>2.1.2 - PCF [9] .....</b>	<b>5</b>
<b>2.1.3 - Espaçamento entre Quadros (<i>Interframe Spacing</i>) [9].....</b>	<b>6</b>
<b>2.2 - APERFEIÇOAMENTO DOS MÉTODOS LEGADOS – IEEE 802.11E.....</b>	<b>7</b>
<b>2.2.1 - HCF Canal de Acesso Baseado em Contenção - EDCA [10, 11].....</b>	<b>8</b>
<b>2.2.2 - HCF Controlled Channel Access [10, 11].....</b>	<b>10</b>
<b>2.2.3 - Agendamento do Hybrid Coordination Function [7] .....</b>	<b>10</b>
<b>2.3 - CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>11</b>
<b>3 - UMTS (<i>UNIVERSAL MOBILE TELECOMMUNICATIONS SYSTEM</i>).....</b>	<b>12</b>
<b>3.1 - HISTÓRICO DOS SISTEMAS CELULARES.....</b>	<b>12</b>
<b>3.2 - UMTS .....</b>	<b>13</b>
<b>3.2.1 - Arquitetura de rede do UMTS.....</b>	<b>13</b>
<b>3.2.2 - Qualidade de Serviço (<i>QoS – Quality of Service</i>) no UMTS .....</b>	<b>15</b>
<b>4 - WIMAX.....</b>	<b>18</b>
<b>4.1 - TOPOLOGIAS DE REDE.....</b>	<b>19</b>
<b>4.2 - CERTIFICAÇÃO DE EQUIPAMENTOS WIMAX .....</b>	<b>20</b>
<b>4.3 - WIMAX FIXO .....</b>	<b>20</b>
<b>4.4 - WIMAX MÓVEL.....</b>	<b>21</b>
<b>4.5 - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS.....</b>	<b>22</b>
<b>4.6 - WIMAX FIXO VS WIMAX MÓVEL.....</b>	<b>27</b>
<b>4.7 - QOS.....</b>	<b>28</b>
<b>4.7.1 - <i>Service Flow</i> .....</b>	<b>29</b>
<b>4.7.1.1 - Tipos de <i>Service Flow</i> .....</b>	<b>30</b>
<b>4.7.2 - Identificador de conexão.....</b>	<b>31</b>
<b>4.7.3 - Camada MAC.....</b>	<b>31</b>
<b>4.7.4 - Métodos de requisição e concessão de banda [21].....</b>	<b>32</b>
<b>4.7.5 - Classes de Serviço [21] .....</b>	<b>34</b>
<b>4.7.6 - Funcionamento do QoS.....</b>	<b>37</b>



<b>4.8 - SIMULAÇÃO DE WIMAX NO NETWORK SIMULATOR 2 .....</b>	<b>39</b>
<b>4.8.1 - Instalação .....</b>	<b>39</b>
<b>4.8.2 - Classes Isoladas .....</b>	<b>40</b>
4.8.2.1 - UGS .....	40
4.8.2.2 - ertPS .....	41
4.8.2.3 - rtPS .....	42
4.8.2.4 - nrtPS .....	43
4.8.2.5 - BE .....	44
<b>4.8.3 - Vazão (throughput) .....</b>	<b>45</b>
4.8.3.1 - 1º Cenário: 1(um) terminal e 1(uma) Estação Base(BS).....	45
4.8.3.2 - 2º cenário: 5(cinco) terminais e 1(uma) Estação Base .....	46
<b>4.8.4 - Classes em Paralelo .....</b>	<b>48</b>
4.8.4.1 - 3º cenário: 10 (dez) terminais e 1 (uma) Estação Base (BS).....	48
4.8.4.2 - 4º cenário: 1 (um) nó e 1 (uma) Estação Base (BS) .....	50
<b>5 - CONCLUSÃO .....</b>	<b>54</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>56</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Categorias de Acesso [7] .....	9
Tabela 3.1 – Resumo da Arquitetura de rede do UMTS [13, 14, 15].....	14
Tabela 4.1 – Padrões WiMAX .....	22
Tabela 4.2 – Diferenças entre os padrões WiMAX [20] .....	27
Tabela 4.3 – Parâmetros obrigatórios para cada classe .....	36
Tabela 4.4 – Mecanismos de requisição de banda para cada classe de QoS .....	37
Tabela 4.5 - Variáveis - Cenário 1.....	45
Tabela 4.6 - Variáveis - Ambiente 2.....	46
Tabela 4.7 – Demonstrativo de Cálculo da Largura de Banda.....	47
Tabela 4.8 - Variáveis - Ambiente 2.....	48
Tabela 4.9 - Variáveis - Ambiente 2.....	51

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Intervalo de Repetição Livre de Contenção .....	6
Figura 2.2 – Espaços entre quadros [9] .....	7
Figura 2.3 – HCF .....	8
Figura 2.4 – EDCA – Parâmetros .....	9
Figura 3.1 – Evolução dos Sistemas Celulares .....	12
Figura 3.2 – Arquitetura de rede do UMTS .....	13
Figura 3.3 – Processo de ativação de um contexto PDP [15] .....	16
Figura 3.4 – QoS fim-a-fim no UMTS [15] .....	17
Figura 4.1 – Exemplo de uma rede WiMAX, com funcionamento LOS e NLOS .....	18
Figura 4.2 – Topologias Ponto-Multiponto e <i>Mesh</i> .....	19
Figura 4.3 – Perfis de operação do WiMAX Fixo [19] .....	21
Figura 4.4 – Demonstração de <i>handoff</i> .....	21
Figura 4.5 – Perfis de operação do WiMAX Móvel [19] .....	22
Figura 4.6 – Comparação de modulações [17] .....	23
Figura 4.7 – OFDMA e subcanalização [20] .....	23
Figura 4.8 – Técnicas de duplexação .....	24
Figura 4.9 – <i>Downlink</i> : TDM, <i>Uplink</i> : TDMA .....	25
Figura 4.10 – Modulação adaptativa .....	26
Figura 4.11 – Comparação de tecnologias .....	28
Figura 4.12 – Modelo de Ativação em duas fases [4] .....	30
Figura 4.13 – Estrutura dos tipos de <i>service flow</i> [4] .....	30
Figura 4.14 – Classificação e Mapeamento de Pacotes [4] .....	32
Figura 4.15 – <i>Unsolicited Grant Service</i> .....	34
Figura 4.16 – <i>Real time polling service</i> .....	35
Figura 4.17 – <i>Non-real time polling service</i> .....	36
Figura 4.18 – <i>Best Effort</i> .....	36
Figura 4.19 – Classificação do Tráfego <i>Uplink</i> .....	38
Figura 4.20 - Classificação do Tráfego <i>Downlink</i> .....	38
Figura 4.21 – Taxa de transmissão da classe UGS .....	40
Figura 4.22 – Taxa de transmissão da classe ertPS .....	41

Figura 4.23 – Taxa de transmissão da classe rtPS .....	42
Figura 4.24 – Taxa de transmissão da classe nrtPS .....	43
Figura 4.25 – Taxa de transmissão da classe BE.....	44
Figura 4.26 – Largura de Banda – 1 Nó – BS .....	45
Figura 4.27 – Taxa de Transmissão – 5 Nós – BS .....	46
Figura 4.28 – Taxa de Transmissão – 5 Nós – 1 BS – Ampliado .....	47
Figura 4.29 – rtPS – 10 Nós – 1 BS.....	49
Figura 4.30 – ertPS - 10 Nós - 1 BS .....	49
Figura 4.31 – UGS – 10 Nós – 1 BS .....	49
Figura 4.32 – nrtPS – 10 Nós – 1 BS.....	50
Figura 4.33 – BE – 10 Nós – 1 BS .....	50
Figura 4.34 – UGS – competição com CBR/rtPS/ertPS.....	51
Figura 4.35 – rtPS – competição com CBR/UGS/ertPS.....	51
Figura 4.36 – ertPS – competição com CBR/UGS/rtPS.....	52

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

3G – 3ª Geração

AAS - *Adaptative Antenna System*

AC – *Access Category*

ACK – *Acknowledgement*

AES – *Advanced Encryption System*

AIFS – *Arbitrary Interframe Space*

BE – *Best Effort*

BPSK – *Binary Phase Shift Keying*

BS – *Base Station*

BWA – *Broadband Wireless Access*

BWREQ – *Bandwidth Request*

CBR – *Constant Bit Rate*

CFP – *Contention Free Period*

CID – *Connection ID*

CP – *Contention Period*

CPE – *Customer Premise Equipment*

CPS – *Common Part Sublayer*

CS – *Convergence Sublayer*

CSMA/CA - *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*

CTS - *Clear-to-Send*

CW<sub>max</sub> – *Maximum Contention Window*

CW<sub>min</sub> – *Maximum Contention Window*

DCF – *Função de Coordenação Distribuída*

DES – *Data Encryption Standard*

DIFS – *DCF Interframe Space*

DL-MAP – *Downlink Map*

DSA – *Dynamic Service Addition*

DSC – *Dynamic Service Change*

DSD – *Dynamic Service Delete*

EDCA – *Enhanced Distributed Channel Access*

*EIFS – Extended Interframe Space*  
 ERB – Estação Rádio Base  
 ertPS - *Extended Real-time Polling Service*  
 FDD – *Frequency Division Duplexing*  
 FEC – *Forward Error Correction*  
 GSM – *Global System for Mobile Communications*  
 HC – *Hybrid Coordinator*  
 HCCA – *HCF Controlled Channel Access*  
 HCF – *Hybrid Coordination Function*  
 IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.*  
 IP – *Internet Protocol*  
 MAC – *Media Access Control*  
 MIMO – *Multiple Input Multiple Output*  
 MMS – *Multimedia Message System*  
 MPEG – *Moving Picture Experts Group*  
 MS – *Mobile Station*  
 MSDU – *MAC Service Data Unit*  
 NDSL – *Networks & Distributed Systems Laboratory*  
 NLOS – *Non Line of Sight*  
 nQAP – *non QoS Access Point*  
 nQBSS – *non QoS Basic Service Set*  
 nrtPS - *Non-real-time Polling Service*  
 NS2 – *Network Simulator 2*  
 OFDM – *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*  
 OFDMA – *Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*  
 PCF – *Point Coordinator Function*  
 PFIS – *PCF Interframe Space*  
 QAM – *Quadrature amplitude modulation*  
 QAP - *QoS Access Point*  
 QBSS - *QoS Basic Service Set*  
 QIBSS - *QoS Independent Basic Service Set*  
 QoS – *Quality of Service*  
 QPSK – *Quadrature Phase-shift Keying*  
 QSTA – *QoS Station*

rtPS – *Real-time Polling Service*  
RTS - *Request-to-Send*  
SFID – *Service Flow ID*  
SI – *Service Interval*  
SIFS – *Short Interframe Space*  
SMS – *Short Message System*  
SNR – *Signal to Noise Ratio*  
S-OFDMA – *Scalable Orthogonal Frequency Division Multiple Access*  
SOHOs – *Small Offices Home Offices*  
SS – *Subscriber Station*  
TC – *Traffic Category*  
TDD – *Time Division Duplexing*  
TDM – *Time Division Multiplexing*  
TDMA – *Time Division Multiple Access*  
TSPEC – *Traffic Specification*  
TXOP – *Transmission Opportunity*  
UGS - *Unsolicited Grant Service*  
UIT – *União Internacional de Telecomunicações*  
UL-MAP – *Uplink Map*  
UMTS - *Universal Mobile Telecommunications System*  
UP – *User Priority*  
VoIP – *Voice Over IP*  
WCDMA – *Wideband Code Division Multiple Access*  
WiBro - *Wireless Broadband*  
Wi-Fi – *Wireless Fidelity*  
WiMAX - *Worldwide Interoperability Microwave Access*  
WLAN – *Wireless Local Area Network*  
WMAN – *Wireless Metropolitan Area Network*

# 1 - INTRODUÇÃO

As redes sem fio têm demonstrado ao longo dos últimos anos um crescimento exponencial em uso. Embora sejam comuns no dia-a-dia da população os termos redes sem fio, Wi-Fi (*Wireless Fidelity*), 3G (3ª Geração), banda larga, há 10 anos a situação era bastante diferente.

O primeiro padrão de redes locais sem fio (WLAN – *Wireless Local Area Network*) de ampla utilização comercial surgiu em 1999: o padrão IEEE 802.11 [1]. Ao longo dos anos, melhorias foram sendo adicionadas a essas redes, surgindo novos padrões: 802.11a, 802.11b, 802.11g, 802.11e, 802.11n, etc. Essas WLANs são popularmente conhecidas como redes Wi-Fi. O sucesso dessas redes pode ser comprovado ao ligar um *notebook* em determinadas esquinas de grandes cidades, detectando inúmeras redes.

É evidente também o sucesso dos sistemas celulares. Havia pouco mais de 7 milhões de celulares no Brasil ao final de 1998 [2]. Segundo a ANATEL, esse número ultrapassou os 130 milhões em maio de 2008 [3]. Além disso, há 10 anos os sistemas celulares de 1ª e 2ª gerações ofereciam basicamente o serviço de voz. Com o passar dos anos, mais serviços foram sendo oferecidos como, por exemplo, mensagens de texto (SMS) e multimídia (MMS). Todas as operadoras no Brasil já oferecem redes de 3ª geração (UMTS – *Universal Mobile Telecommunications System* – e suas evoluções), oferecendo, também, acesso à Internet com altas taxas de transmissão de dados por meio da rede celular.

Devido à maior oferta de conexões rápidas em redes de dados, surgiu a possibilidade de convergir todos os tipos de serviços (dados, voz e vídeo – *triple-play*) em uma única rede: a rede IP (*Internet Protocol*). Conhecendo-se os avanços tecnológicos de redes como Wi-Fi e suas deficiências (alcance limitado, por exemplo), a demanda pela convergência (*triple-play*) e a demanda por portabilidade e/ou mobilidade, surgiu outra tecnologia de redes sem fio bastante promissora conhecida como WiMAX (*Worldwide Interoperability Microwave Access*), baseada nos padrões IEEE 802.16d-2004 [4] e 802.16e-2005 [5]. Essas redes (sobre IP) são capazes de oferecer alcance maior que as redes Wi-Fi e altas



taxas de transmissão. Além disso, WiMAX baseado no padrão 802.16e-2005 foi aprovada como uma tecnologia 3G de celular (UIT IMT-2000) [6].

Embora as redes Wi-Fi, sistemas celulares 3G (UMTS e outros) e WiMAX ofereçam altas taxas de transmissão sobre o protocolo IP, as redes comutadas a pacotes (sobre o protocolo IP) não suportam eficientemente o *triple-play*. As redes IP tratam os diversos serviços (voz, dados e vídeo) da mesma maneira. Entretanto, cada um desses serviços exige da rede aspectos diferentes como taxa mínima de transferência de dados, atraso máximo, *jitter* (variação do atraso) máximo, etc. Para que essas redes suportem satisfatoriamente todo o tipo de serviço há a necessidade de mecanismos capazes de diferenciá-los, de forma a garantir que os requisitos de cada serviço sejam atendidos. Esses mecanismos são chamados de Qualidade de Serviço ou QoS (*Quality of Service*).

O grande sucesso das redes sem fio e a convergência sobre IP nos incentivou a estudar as redes sem fio mais comuns e como as mesmas implementam QoS.

Este trabalho tem o objetivo de mostrar como as redes Wi-Fi, UMTS e, em especial, WiMAX implementam QoS, isto é, os mecanismos utilizados por cada uma para suportar com qualidade os diversos serviços sobre IP. Além disso, será realizada simulação de redes WiMAX com a ferramenta NS2 (*Network Simulator 2*) na tentativa de validar o funcionamento de QoS.

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos. Após esta breve introdução, o segundo capítulo descreve com detalhes o método de acesso ao meio em redes Wi-Fi, bem como as melhorias adicionadas a essas redes pelo padrão IEEE 802.11e [7] para prover QoS.

O terceiro capítulo descreve o sistema celular UMTS, descrevendo primeiro o histórico das tecnologias celulares, evidenciando a necessidade por serviços comutados a pacotes com altas taxas de transmissão. Em seguida, é explicada a arquitetura do UMTS, tanto a rede de acesso (interface aérea) como o núcleo de rede (comutado a circuito e comutado a pacote). São também detalhados os principais aspectos de QoS no UMTS, que envolve a rede de acesso e o núcleo de rede comutado a pacote.

O capítulo quatro inicia explicando detalhadamente a tecnologia WiMAX. São apresentadas as suas versões (WiMAX Fixo e Móvel), topologias de rede, características técnicas, etc. Posteriormente é detalhado o método de acesso ao meio e o QoS. Vale ressaltar a importância desse capítulo, pois serve de fundamento teórico para a compreensão do funcionamento da simulação dessa rede no NS2. Neste capítulo, é ainda relatada a simulação da rede WiMAX no *software* livre NS2 com o módulo NDSL. São listados todos os *softwares* utilizados e os seus procedimentos de instalação, bem como as topologias utilizadas na simulação. Os resultados obtidos são apresentados e discutidos.

Para encerrar, são apresentadas as conclusões deste trabalho assim como as sugestões para futuros desenvolvimentos.

## 2 - WI-FI

As redes locais sem fio, regulamentadas pelo padrão IEEE 802.11 [8], conhecidas como redes Wi-Fi, são uma grande novidade tecnológica nos últimos anos. Atualmente, a tecnologia é utilizada em ampla escala devido a seu baixo custo de implementação, a mobilidade limitada dentro da área de cobertura e a não alteração do espaço físico (não utilização de fios).

Apesar do uso em grande escala atualmente, há alguns pontos negativos que devem ser levados em consideração. Ao comparar Redes Ethernet IEEE 802.3 às redes Wi-Fi IEEE 802.11 devemos salientar a menor eficiência e imprevisibilidade destas redes, além de limitação de largura de banda, alto índice de *overhead* e maior sensibilidade à interferências do meio. A utilização de banda não-licenciada também é uma preocupação, uma vez que as estações têm que disputar o meio com aparelhos sem-fio que operam na mesma frequência, além de outras redes de comunicação. Não menos importante, as limitações de tamanho, peso e bateria de aparelhos sem-fio limitam a potência dos transmissores e, conseqüentemente, o alcance dessas redes.

O padrão 802.11 oferece um serviço do tipo melhor esforço, isto é, o primeiro a requisitar serviço é o primeiro a ser servido. Dessa maneira, aplicações como VoIP e *Streaming Video* podem ser altamente prejudicadas por aplicações de Correio Eletrônico e Navegação Web. Devido a esses fatores e com intuito de oferecer Qualidade de Serviço em níveis aceitáveis foi especificada uma nova extensão ao Padrão IEEE 802.11, a extensão ‘e’, desenvolvida pelo Grupo de Trabalho E (Task Group E) do IEEE [7] que propõe um mecanismo de diferenciação na camada de Controle de Acesso ao Meio (MAC) do 802.11. Esse mecanismo é baseado nos métodos de Controle de Acesso ao Meio (MAC) legados que são a Função de Coordenação Distribuída (DCF) e a Função de Coordenação Pontual (PCF), explicados posteriormente. Vale ressaltar que as funções DCF e PCF já fornecem um mecanismo simples de priorização de tráfego.

O padrão 802.11e [7] tem como principal aperfeiçoamento a introdução da Função de Coordenação Híbrida (HCF) que consiste em duas sub-funções: o Controle de Acesso

Distribuído Aprimorado (EDCA) e o HCF Acesso de Canal Controlado (HCCA). O funcionamento em paralelo dos métodos supracitados fornece ao sistema um acesso distribuído e centralizado.

## **2.1 - IEEE 802.11 – MÉTODOS LEGADOS – DCF E PCF**

Os métodos legados de acesso ao meio, DCF e PCF, definidos pelo padrão IEEE 802.11 [8], não implementam QoS. No entanto, servem de base para o entendimento dos mecanismos de acesso ao meio estabelecidos pelo padrão IEEE 802.11e [7].

### **2.1.1 - DCF [9]**

O DCF [9] é a base do mecanismo padrão de acesso CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*). O meio é escutado antes da transmissão, caso livre, a transmissão ocorre, caso contrário, o nó entra em um período de *backoff* (espera sem acessar o meio). Um mecanismo que também é utilizado para evitar colisões é *Clear-to-Send* (CTS)/*Request-to-Send* (RTS), que reduz ainda mais as colisões, além de evitar o problema de estações escondidas (*hidden-stations*).

### **2.1.2 - PCF [9]**

O PCF [9] adiciona à rede sem-fio um QoS (Qualidade de Serviço) ‘primitivo’. Baseado em um esquema de *polling* controlado pelo Ponto de Acesso, onde o meio, que anteriormente possuía somente o período de contenção, passa a ter dois períodos distintos de acesso ao meio: o período livre de contenção (CFP) e o período baseado em contenção (CP). Os dois períodos juntos formam o Intervalo de Repetição Livre de Contenção, que se repete em intervalos regulares. A Figura 2.1 [9] mostra o intervalo mencionado.

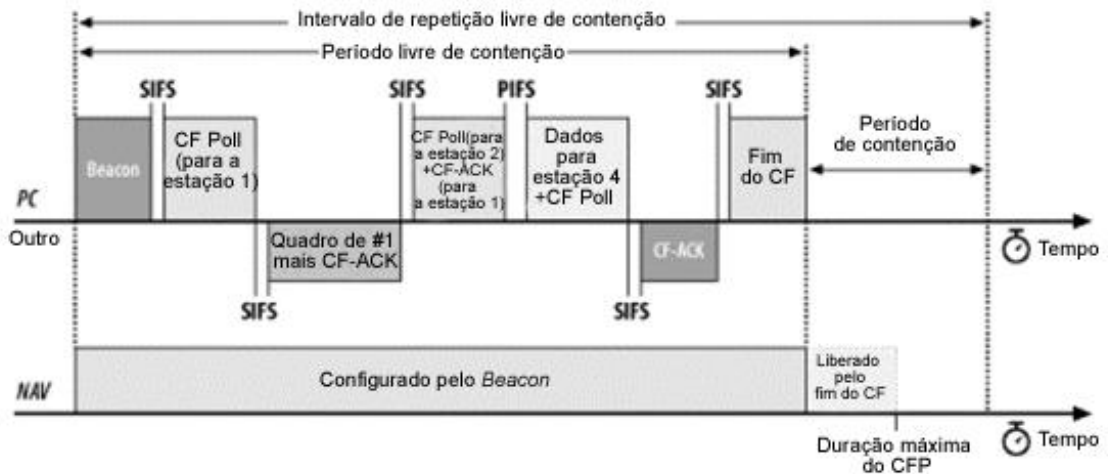


Figura 2.1 – Intervalo de Repetição Livre de Contenção

Com o intuito de bloquear acesso baseado em contenção pelas estações participantes do CFP durante este período, o ponto de acesso envia no início do CFP um quadro de *beacon* (sinalização). Uma das informações deste quadro é o tamanho máximo do período livre de contenção, fazendo com que as estações participantes aloquem esse tamanho máximo para o CFP, bloqueando o uso do DCF durante período livre de contenção.

Outro recurso faz com que estações não participantes do CFP não consigam acesso a este. Isso se deve ao PCF ter um menor espaçamento entre quadros que o DCF, determinando assim o acesso exclusivo das estações participantes do CFP.

### 2.1.3 - Espaçamento entre Quadros (*Interframe Spacing*) [9]

No padrão 802.11 são utilizados quatro tipos de espaçamento entre quadros. A diferença entre o espaçamento leva a diferença de acesso ao meio entre os quadros, priorizando alguns com em detrimento de outros. A Figura 2.2 [9], ilustra tais espaçamentos.

- *Short interframe space (SIFS)*

Utilizado para transmissão de alta prioridade, como quadros CTS/RTS e ACKs positivos. Essas transmissões podem ocorrer depois que o período do SIFS tiver terminado.

- *PCF interframe space (PIFS)*

Maior que o SIFS, o PIFS é utilizado pelo PCF durante o período livre de contenção, dando maior prioridade em relação ao DCF.

- *DCF interframe space (DIFS)*

O DIFS é o tempo mínimo que uma estação deve esperar para transmitir serviços baseados em contenção.  $DIFS > PIFS > SIFS$ .

- *Extended interframe space (EIFS)*

Não está ilustrado, pois não é um intervalo fixo, e acontece quando ocorre erro na transmissão de um quadro.

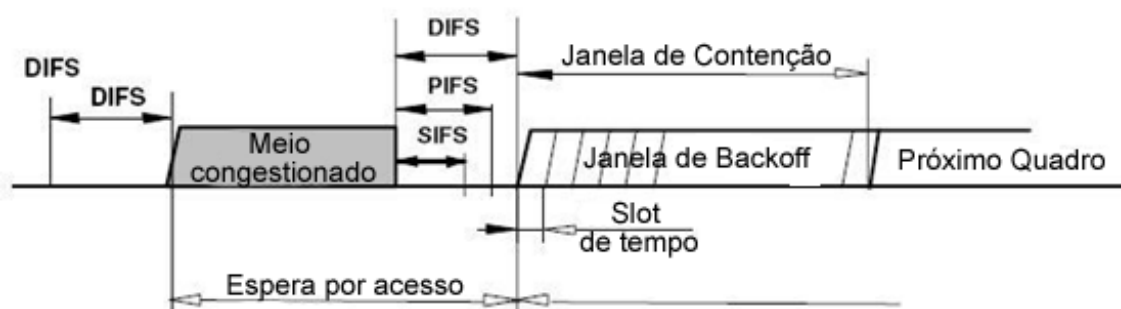


Figura 2.2 – Espaços entre quadros [9]

## 2.2 - APERFEIÇOAMENTO DOS MÉTODOS LEGADOS – IEEE 802.11E

Devida a crescente demanda de serviços críticos, o padrão IEEE 802.11e [7] propõe alguns aperfeiçoamentos aos métodos legados de acesso ao meio do 802.11 à camada MAC.

O novo padrão [7] define um novo modo de operação chamado de *Hybrid Coordination Function* (HCF). O HCF combina dois modos de acesso ao meio, como pode ser visto na Figura 2.3 [10]. O *Enhanced Distributed Channel Access* (EDCA) utiliza algoritmo baseado em contenção para acessar o meio e é complementado por outro método, o *HCF*

*Controlled Channel Access* (HCCA), este utiliza um esquema de acesso centralizado, baseado em *polling* para garantir acesso aos fluxos de dados. Para determinar o agendamento de *polling*, o HCF utiliza os parâmetros de fluxo especificados na requisição de reserva provido por cada fluxo na inicialização.

Um conceito básico que abrange os dois métodos é a noção de oportunidade de transmissão (TXOP). O TXOP é um intervalo de tempo pelo qual cada nó tem a oportunidade de transmitir. No modo EDCA, o TXOP é determinado pelo tipo de fluxo de dados, já no HCCA esses são selecionados baseados nos nós.

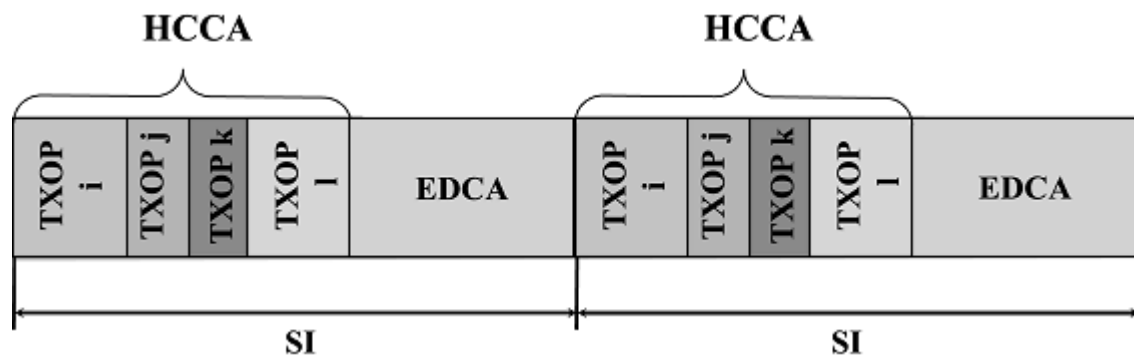


Figura 2.3 – HCF

### 2.2.1 - HCF Canal de Acesso Baseado em Contenção - EDCA [10, 11]

Com o objetivo de suportar diferenciação de serviços, o 802.11e aperfeiçoa o legado DCF através do EDCA. O EDCA é uma versão parametrizada do DCF e associa diferentes parâmetros de acessos ao canal aos diferentes fluxos de dados, separando-os em diferentes categorias de acesso (ACs), de modo a priorizar o acesso a diferentes categorias de tráfego (TCs).

Os parâmetros [7] modificados estão listados abaixo:

*Arbitration Interframe Spacing (AIFS)* – O mínimo intervalo de tempo necessário de espera para acessar o meio, antes da transmissão. Este tempo é no mínimo do tamanho do DIFS e pode aumentar de acordo com a AC: quanto menor a prioridade maior o tempo de espera para acessar o meio.

*Oportunidade de Transmissão(TXOP)* – É a oportunidade de tempo máxima que uma estação tem para transmitir.

*Parâmetros de janela de contenção ( $CW_{min}$  e  $CW_{max}$ )* – Número de *slots* que uma estação terá que esperar antes de transmitir. Esse número de *slots* é variável.

O esquema do EDCA está ilustrado na Figura 2.4.

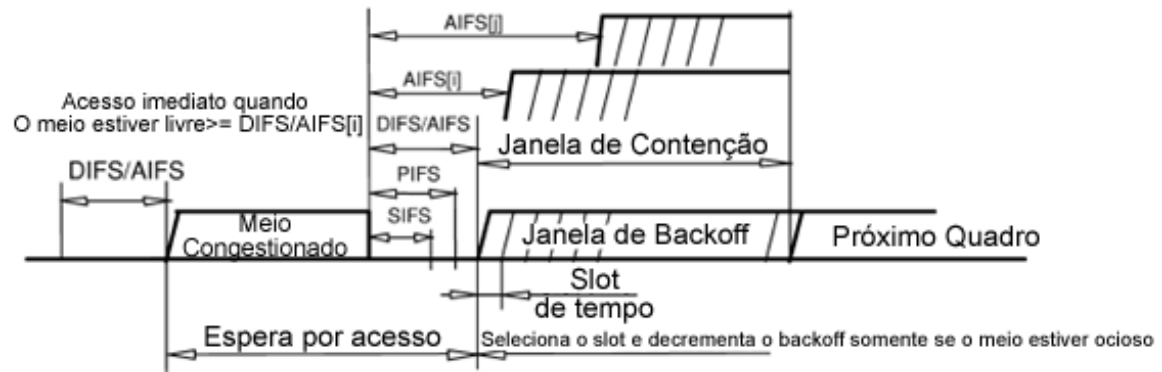


Figura 2.4 – EDCA – Parâmetros

Para cada AC, os parâmetros de acesso são determinados pelo QAP (*QoS Access Point*), que é o ponto de acesso que implementa o 802.11e.

O período EDCA suporta 8 valores de prioridade de usuário, denominados UPs (*User Priority*) [7]. O valor da UP é definido por inteiros de 0 a 7, cada um definindo uma categoria de acesso (AC). Um MSDU (*MAC Service Data Unit*) com um determinado UP é associado a uma Categoria de Tráfego (TC). O UP é provido pelo Serviço de Ponto de Acesso do Controle de Acesso ao Meio (MAC\_SAP).

Logo abaixo é possível visualizar as Prioridades (UP) e as Categorias de Acesso (AC), na Tabela 2.1:

Tabela 2.1 – Categorias de Acesso [7]

Prioridade	UP (a mesma que um usuário com prioridade 801.D)	Designação 802.1D	AC	Designação (Informativa)
Menor ↓ Maior	1	BK	AC_BK	Background
	2	—	AC_BK	Background
	0	BE	AC_BE	Best Effort
	3	EE	AC_BE	Best Effort
	4	CL	AC_VI	Video
	5	VI	AC_VI	Video
	6	VO	AC_VO	Voice
	7	NC	AC_VO	Voice



### **2.2.2 - HCF Controlled Channel Access [10, 11]**

Complementando o EDCA, o 802.11e descreve um método centralizado de controle de acesso ao meio chamado *HCF Controlled Channel Access* (HCCA). Este método tem por objetivo prover garantia de QoS, utilizando o legado PCF como base, através de um esquema baseado em *polling*, onde o acesso ao meio é controlado pelo QAP. A grande diferença entre o PCF e o HCCA é que no HCCA existe uma flexibilidade quanto ao momento em que o período livre de contenção pode ocorrer. O HCCA pode começar um período livre de contenção caso o meio esteja livre por um intervalo PIFS, que é menor que o menor AIFS possível.

Durante o período HCCA livre de contenção, o QAP aloca oportunidades de transmissão (TXOP), que é calculado baseado nas informações de reserva, enviados periodicamente para o QAP por cada fluxo de tráfego. Então o QAP envia uma requisição de *polling* para cada nó. Logo após essa requisição os nós podem transmitir nas direções de *uplink* e *downlink*.

A periodicidade das transmissões, ou Intervalo de Serviço (SI), são calculadas de acordo com as especificações dos fluxos de tráfego. O término desse período está atrelado ao acontecimento de qualquer uma das opções seguintes: Nem o QAP nem a QSTA (Estação com QoS ou *QoS Station*) tem quadros a transmitir, o tempo livre do canal expirou, ou o tempo do período expirou.

### **2.2.3 - Agendamento do Hybrid Coordination Function [7]**

As QSTAs fazem a requisição de reserva que contenham informação de fluxo, como taxa da aplicação crítica de dados, tamanho crítico do pacote, tamanho máximo MSDU, atraso associado à aplicação e taxa mínima de transmissão da camada física.

A partir das requisições de reserva, o QAP, através da política de agendamento, determina a periodicidade mínima do intervalo de serviço (SI) para ser utilizado por todas as QSTA, de modo a não prejudicar a aplicação da QSTA onde o serviço é mais crítico. O SI é o maior submúltiplo do intervalo de *beacon* (sinalização) do 802.11e que satisfaça o

requerimento de atraso de cada fluxo. Caso aplicações Voz sobre IP (VoIP) estejam trafegando na rede, o máximo intervalo de serviço deve ser o atraso tolerado por esse tipo de aplicação.

## 2.3 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Durante esta etapa de estudo foram constatadas algumas deficiências importantes na Qualidade de Serviço (QoS) nas redes Wi-Fi. De acordo com testes realizados por terceiros, o 802.11e, ao tratar tráfegos com variação na taxa de bit (VBR), tem uma grande dificuldade em entregar a Qualidade de Serviço. Esta falha está atrelada ao fato de o tráfego VBR ser tratado no período HCCA, devido a sua inflexibilidade em relação a variação do número de *slots* alocados durante o *polling*, causando perda de pacotes e a conseqüente não qualidade no serviço. Quanto a tráfegos onde as taxas de bits são constantes (CBR), há a entrega de QoS [10]. Alguns artigos propõem mudanças no padrão IEEE 802.11e para que o QoS possa ser entregue para os mais diversos tipos de tráfego [10, 11].

Além disso, para que o QoS proposto pelo padrão 802.11e esteja disponível devem existir Estações QoS (QSTA) associadas a Pontos de Acesso QoS (QAP) numa QBSS (*QoS Basic Service Set*). Um subconjunto do aperfeiçoamento QoS está disponível para uso em redes *ad-hoc*, isto é, entre as QSTAs que fazem parte da mesma *QoS Independent Basic Service Set* (QIBSS). As QSTA também podem estabelecer conexão com pontos de acesso sem QoS (nQAP) em um ambiente sem serviço básico de QoS (nQBSS). Ou seja, não há garantia de entrega de QoS caso qualquer nó que participe da rede ou da transmissão não tenha mecanismos de Qualidade de Serviço.

Este capítulo demonstrou o funcionamento de QoS para as redes locais sem fio mais comuns atualmente: as redes Wi-Fi. Foi mostrado o funcionamento dos mecanismos de acesso legados – DCF e PCF – e os aperfeiçoamentos desses mecanismos com o padrão IEEE 802.11e – EDCA e HCCA. É objeto de estudo deste trabalho mecanismos de QoS em redes sem fio de maior alcance como o UMTS e o WiMAX, discutidos nos próximos capítulos.

### 3 - UMTS (UNIVERSAL MOBILE TELECOMMUNICATIONS SYSTEM)

#### 3.1 - HISTÓRICO DOS SISTEMAS CELULARES

Os sistemas celulares foram desenvolvidos visando o tráfego de voz. A 1ª geração desses sistemas funciona com transmissões analógicas como, por exemplo, AMPS. A 2ª geração é representada por sistemas digitais como GSM, TDMA IS-136, CDMA IS-95.

Com o decorrer do tempo, houve uma demanda crescente para tráfego de dados por meio dos sistemas celulares. Para suprir essa demanda, a UIT (União Internacional de Telecomunicações) definiu os requisitos para os sistemas de 3ª geração por meio do projeto IMT-2000 (*International Mobile Telecommunications – 2000*). Podem-se destacar os seguintes requisitos:

- Altas taxas de transmissão de dados (mínimo de 144 kbps em qualquer ambiente);
- Serviços baseados em comutação de circuito e comutação de pacote;
- Vários serviços simultâneos para os usuários (serviços multimídia);
- Incorporação suave dos sistemas de 2ª geração. [12, 13]

A migração de uma operadora para sistemas de 3ª geração envolve grandes investimentos. Buscou-se o desenvolvimento de sistemas de 3ª geração que facilitassem a evolução dos padrões existentes de 2ª geração, minimizando os custos. Isto deu origem a duas grandes linhas de evolução de tecnologias: UMTS e Cdma2000. A Figura 3.1 ilustra a evolução dos sistemas celulares.

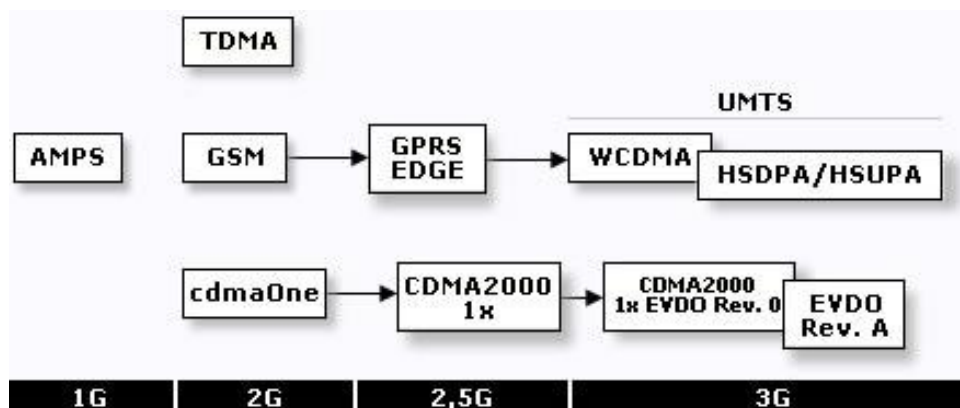


Figura 3.1 – Evolução dos Sistemas Celulares

### 3.2 - UMTS

UMTS é o termo adotado para designar o padrão de 3ª geração estabelecido como evolução para operadoras de GSM (*Global System for Mobile Communicatons*). Decidimos estudar esta tecnologia, pois esta (GSM) é a adotada pela maioria das operadoras de telefonia celular, isto é, pela maior parte dos usuários de telefonia celular. No Brasil, todas as operadoras adotam essa linha de evolução de tecnologia.

A tecnologia GSM foi desenvolvida e padronizada pelo grupo SMG (*Special Mobile Group*) da ETSI (*European Telecommunication Standard Institute*) até o ano 2000, quando passou para a responsabilidade do grupo de padronização 3GPP (*3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project*). Esse grupo é, também, responsável pela padronização da tecnologia UMTS [13].

#### 3.2.1 - Arquitetura de rede do UMTS

A arquitetura do UMTS pode ser representada pela Figura 3.2 a seguir.

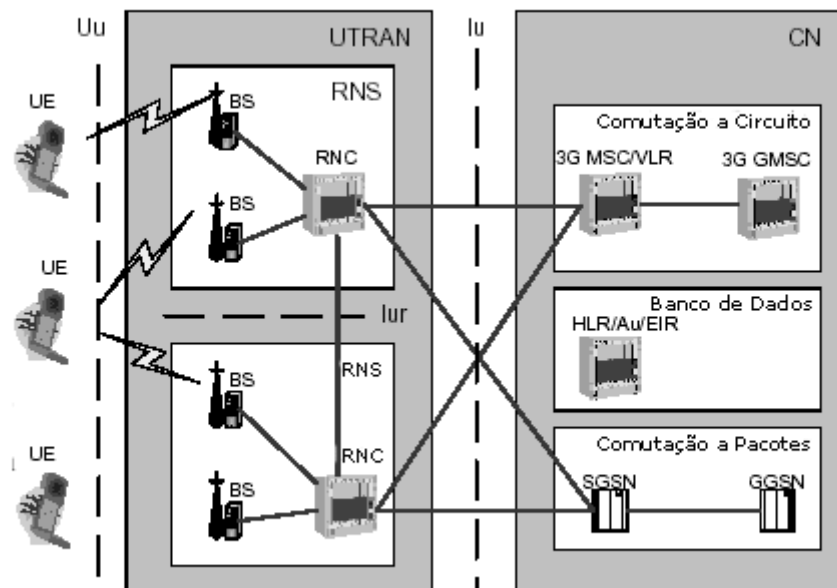


Figura 3.2 – Arquitetura de rede do UMTS

Segue abaixo a tabela com a descrição das siglas dos elementos de rede e das interfaces entre eles:

Tabela 3.1 – Resumo da Arquitetura de rede do UMTS [13, 14, 15]

Elemento de rede	Descrição
UE	<i>User Equipment</i> , ou equipamento do usuário. É o terminal móvel e seu módulo de indentidade de serviços do usuário (USIM).
BS (Node B)	<i>Base Station</i> , ou Estação Base. Converte o tráfego de dados entre as interfaces Uu e Iub. Também exerce funções de gerenciamentos dos recursos de rádio.
RNC	<i>Radio Network Controller</i> , ou Controlador da rede à rádio. Controla os recursos de rede sob seu domínio (BSs conectados a ele).
SGSN	<i>Serving GPRS Support Node</i> . Função similar a do MSC/VLR para a rede comutada de pacotes.
GGSN	<i>Gateway GS</i> . Função similar a do GMSC para a rede comutada de pacotes. Conecta o UMTS com a Internet, por exemplo.
HLR/Au/EIR	<i>Home Location Register/Authentication Centre/Equipment Identity Register</i> . Banco de dados que contém as informações dos usuários e os IMEIs dos aparelhos celulares. Realiza autenticação no sistema.
MSC/VLR	Comutador ( <i>MSC – Mobile Switching Centre</i> ) e banco de dados ( <i>Visitor Location Register</i> ). Serve o UE em sua localidade para os serviços comutados de circuito.
GMSC	<i>Gateway MSC</i> . Ponto de comutação onde o UMTS é conectado com outras redes comutadas de circuito (por exemplo, rede de telefonia pública comutada).
Subsistema de rede	Descrição
RNS	<i>Radio Network Subsystem</i> , ou Subsistema da rede à rádio.
UTRAN	<i>UMTS Terrestrial Rádio Access Network</i> , ou rede terrestre de acesso rádio do UMTS baseada no <i>Wideband Code Division Multiple Access (WCDMA)</i> .
CN	<i>Core Network</i> , ou núcleo da rede que suporta serviços baseados em comutação de circuitos e comutação de pacotes.
Interface de rede	Descrição
Uu	Interface de rádio entre EU e BS, baseada no WCDMA.
Iub	<i>Interface entre BS e RNC. Até o Release 5, baseada em ATM. A partir do Release 5, pode ser também baseada em IP.</i>
Iu	Interface entre RNC (UTRAN) e elementos de CN. Baseada em IP.

### 3.2.2 - Qualidade de Serviço (*QoS – Quality of Service*) no UMTS

Diferentemente dos sistemas orientados a circuito, que alocam os recursos de rede na configuração da sessão e os mantêm durante toda ela (garantindo conexão estável em termos de atraso e largura de banda), as redes orientadas a pacotes alocam os recursos de rede dinamicamente, baseando-se na necessidade dos nós. Não há garantia que os recursos de rede estarão disponíveis durante toda a sessão, tendo uma conexão instável em termos de atraso e largura de banda [14].

Algumas aplicações são sensíveis ao atraso e requerem uma taxa de dados controlada (ligação telefônica, por exemplo), enquanto outras toleram atraso (transferência de dados). Adicionalmente, existem aplicações sensíveis a perdas de pacote (transferência de dados) e outras não. Outro parâmetro comum exigido por certas aplicações é a largura de banda alocada. O conceito de QoS em sistemas orientados a pacote é criado para determinar corretamente quando uma aplicação necessita de recursos, assim como a qualidade e a quantidade desses recursos. QoS é definido para fazer isso de uma maneira que vários tipos de usuários e aplicações com diferentes requisitos de transporte possam ser suportados nesses tipos de sistemas [14].

Este trabalho concentra-se nos serviços comutados a pacotes do UMTS. Isto é, na relação entre o UE, BS (*Node B*), RNC, SGSN e GGSN. Portanto, para este trabalho, Qualidade de Serviço (*QoS – Quality of Service*) no UMTS é o conjunto de funções, mecanismos e procedimentos destes elementos e suas interconexões que garantem o provimento de um serviço com a qualidade (parâmetros de rede) negociada.

Alguns dos atributos de QoS utilizados para categorizar as aplicações e serviços de transporte no UMTS, à partir do 3GPP Release 99, estão listados abaixo. Esses atributos fornecem uma maneira do sistema priorizar a alocação de recursos de rede a um nó, aplicação ou serviço de transporte em detrimento de outro [14, 15].

- 4 classes de tráfego:
  - *Real-time* (RT): 2 classes para aplicações que exigem baixa latência.
    1. Classe *Streaming*: música e notícias sob demanda, programas de rádio e televisão;
    2. Classe *Conversational*: telefonia.

- *Non Real-Time (NRT)*: 2 classes para aplicações sem restrição de latência.
  - 3. Classe *Background*: e-mail, SMS;
  - 4. Classe *Interactive*: navegação Web.
- Taxa máxima de transferência de dados;
- Taxa garantida de transferência de dados (atributo utilizado pelas classes RT – *streaming* e *conversational*);
- Ordem de entrega de dados (sim/não): indica se é necessária a entrega de pacotes em sequência;
- Atraso: atraso máximo, em *ms*, da transferência de dados;
- Prioridade de tráfego: utilizado dentro da classe *interactive* para dar priorizar um tráfego em relação a outro desta mesma classe;
- Prioridade de alocação/retenção: indica prioridade de uma sessão em relação à outra, retendo o recurso de rede ou priorizando na alocação. Importante com recursos escassos.

QoS no UMTS é negociado pelo PDP (*Packet Data Protocol*), responsável pela criação de um túnel (conexão lógica ou contexto PDP) entre o UE e o GGSN [15]. A Figura 3.3 descreve o procedimento de estabelecimento de um contexto PDP entre o UE e o GGSN:

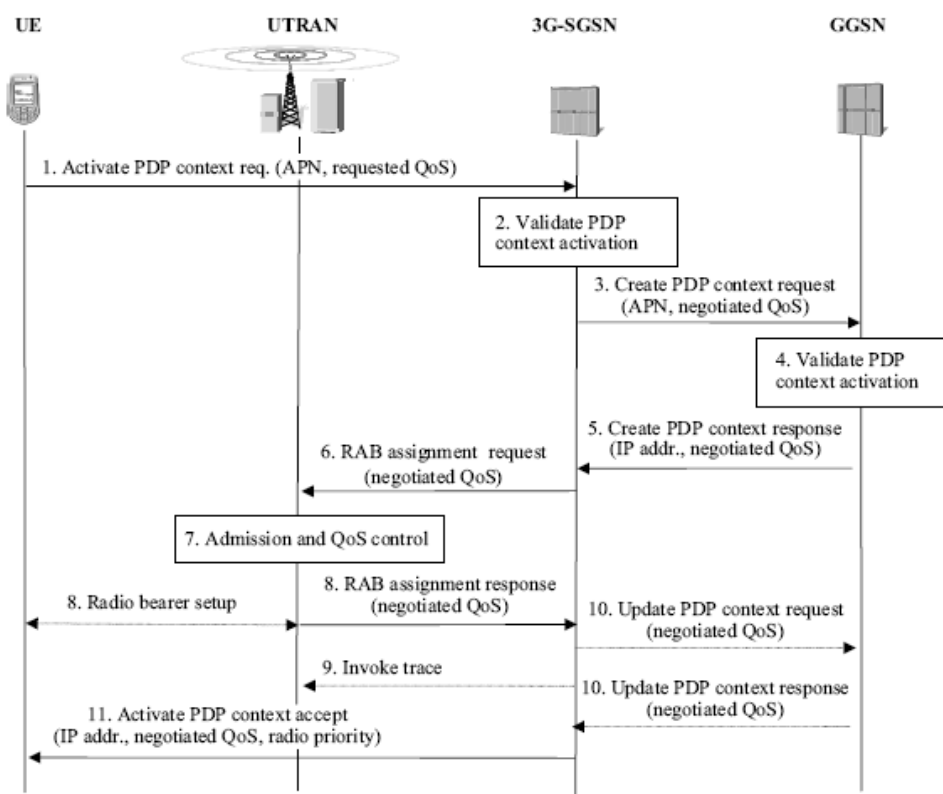


Figura 3.3 – Processo de ativação de um contexto PDP [15]

É importante frisar que na solicitação de criação do contexto PDP (item 1 da Figura 3.3) o UE pode incluir o perfil de QoS do tráfego (valores para os atributos descritos anteriormente como classe, atraso, etc).

A arquitetura de QoS fim-a-fim do UMTS é bastante complexa. Diversos elementos da rede participam do QoS, com diferentes funções. De acordo com o escopo deste trabalho, seria interessante explicar as funções da interface aérea (WCDMA) no QoS, como, por exemplo, controle de admissão, sincronização dos UEs, agendamento das transferências de dados de cada um, etc. Entretanto, na literatura pesquisada não foi encontrada a descrição detalhada dessas funções.

Outro aspecto importante que vale a pena ser ressaltado, embora não é detalhado é que, ao longo do túnel PDP estabelecido entre UE e GGSN deve ser feita a tradução dos parâmetros de QoS do UMTS em parâmetros de QoS IP devido a existência de interfaces entre os elementos ser baseada em IP, de forma a garantir qualidade de serviço em uma conexão fim-a-fim.

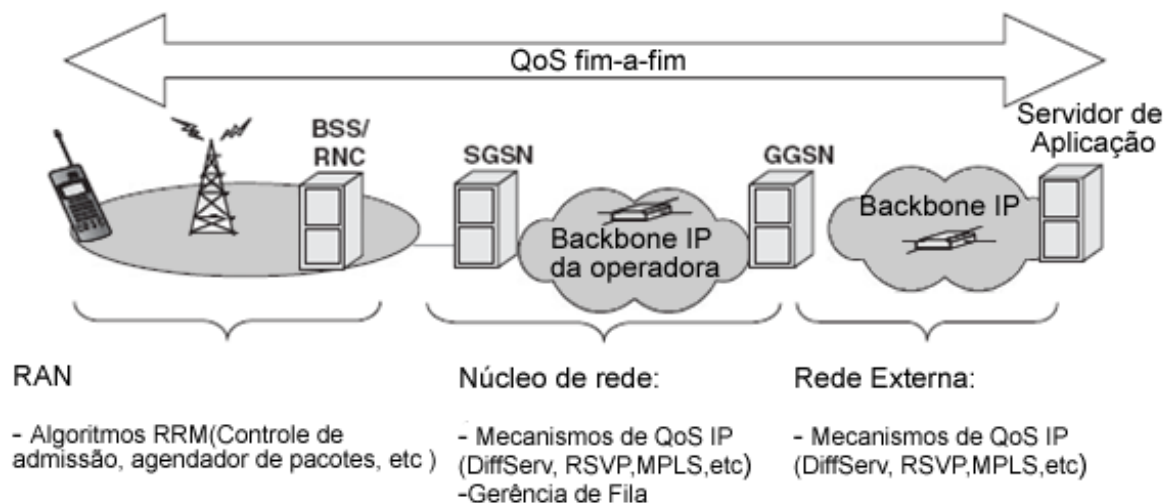


Figura 3.4 – QoS fim-a-fim no UMTS [15]

Este capítulo falou da evolução dos sistemas celulares. Mostrou a arquitetura do UMTS e o básico do QoS nesse sistema, isto é, o estabelecimento de conexão na rede e os parâmetros QoS disponíveis. O próximo capítulo abordará as redes WiMAX e como essas implementam QoS.



## 4 - WiMAX

WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) é o nome dado à tecnologia de acesso sem fio banda larga (BWA – *Broadband Wireless Access*), baseada em padrões (IEEE 802.16d-2004 e IEEE 802.16e-2005). É uma tecnologia de redes para áreas metropolitanas (WMAN – *Wireless Metropolitan Area Network*).

Tem a capacidade de funcionamento sem e com linha de visada (NLOS ou LOS – *Non* ou *Line of Sight*), isto é, sem e com obstrução do sinal de comunicação entre o terminal de acesso (CPE – *Customer Premise Equipment*) e a Estação Base (BS – *Base Station*). Alguns tipos de obstruções comuns são árvores, prédios, etc [17]. A Figura 4.1 ilustra um exemplo de uma rede WiMAX típica, com funcionamento LOS e NLOS.

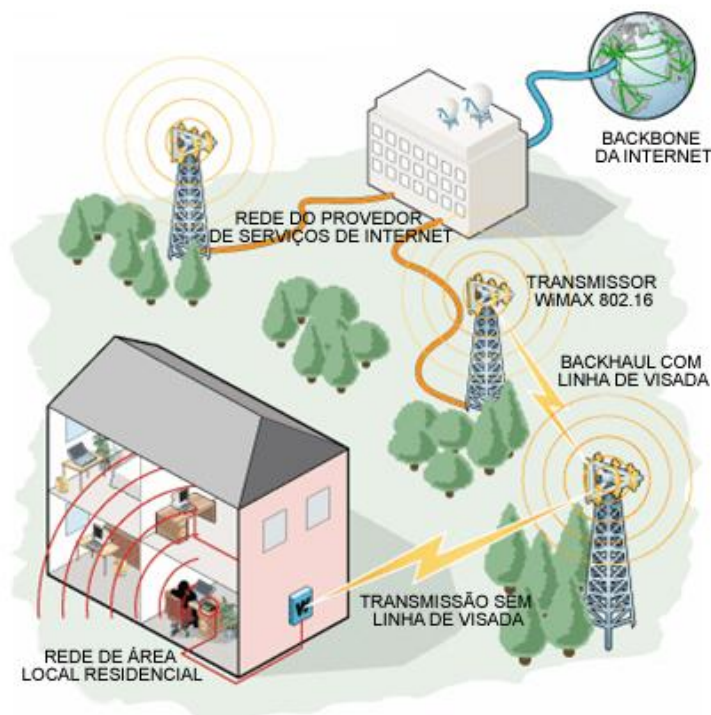


Figura 4.1 – Exemplo de uma rede WiMAX, com funcionamento LOS e NLOS

WiMAX oferece suporte a segurança dos dados (criptografia, certificação digital) e qualidade de serviço (QoS – *Quality of Service*).

As principais aplicações de WiMAX são:

- Prover acesso de última milha, como uma alternativa ao cabo e DSL, onde, por exemplo, não é economicamente viável a instalação de redes cabeadas;
- Prover serviços de banda larga, de baixa latência (*streaming* de áudio e vídeo, VoIP);
- Interconexão de SOHOs (Small Offices Home Offices), redes Wi-Fi (*hotspots*), viabilizando o surgimento de cidades digitais.

#### 4.1 - TOPOLOGIAS DE REDE

A rede WiMAX, sob protocolo IP (orientada a pacotes), suporta as seguintes topologias: ponto-a-ponto, ponto-multiponto e malha (*mesh*, opcional) [4, 5]. Funciona de forma similar à rede celular, isto é, uma estação base ou BS (*Base Station*) transmite e recebe informação digital (dados, voz ou vídeo) para e dos terminais de acesso ou CPE (*Customer Premise Equipment*). Pode, inclusive, utilizar técnicas como reuso de frequência, setorização, comuns em redes celulares.

Para ocorrer uma troca de informação entre dois ou mais CPEs em uma topologia ponto-multiponto os dados são enviados da CPE à BS que repassa a informação à(s) CPEs. Os fabricantes podem optar por desenvolver equipamentos que funcionem em topologia de malha (*mesh*), cuja característica consiste na existência de diversos caminhos redundantes por onde a informação pode trafegar para chegar a seu destino. A Figura 4.2 evidencia a diferença das topologias ponto-multiponto e *mesh*.

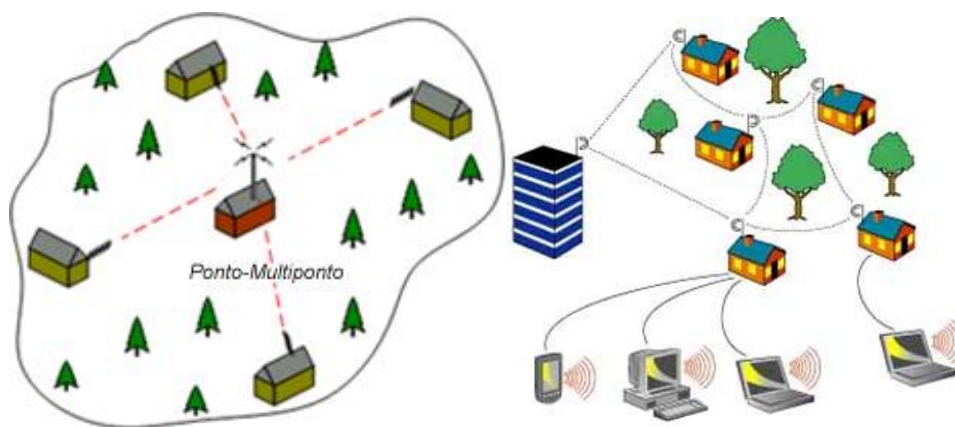


Figura 4.2 – Topologias Ponto-Multiponto e *Mesh*

Os sinais são trocados na faixa de frequências de microondas, em canais cuja largura pode variar entre 1,75 a 20 MHz.

Existem dois padrões de WiMAX (incompatíveis entre si):

- WiMAX Fixo ou Nomádico (baseado no padrão IEEE 802.16d-2004);
- WiMAX Móvel (baseado no padrão IEEE 802.16e-2005).

## **4.2 - CERTIFICAÇÃO DE EQUIPAMENTOS WIMAX**

Operadoras de telecomunicações, fabricantes de componentes e equipamentos interessados no desenvolvimento da tecnologia baseada nos padrões do grupo de trabalho IEEE 802.16 criaram o *WiMAX Forum*. O *Forum* tem o objetivo de garantir a interoperabilidade de equipamentos de diversos fabricantes baseados nos padrões supracitados e, dessa forma, promover e acelerar a introdução da tecnologia WiMAX no mercado [18].

Para garantir a interoperabilidade e conformidade aos padrões, os equipamentos produzidos são submetidos a testes, realizados nos laboratórios do *WiMAX Forum*, e, se aprovados, recebem o selo “*WiMAX Forum Certified*” [18]. Existem alguns equipamentos em conformidade com os padrões IEEE 802.16 que não atendem às especificações do Forum como, por exemplo, os equipamentos do padrão coreano WiBro.

## **4.3 - WIMAX FIXO**

Solução baseada no padrão IEEE 802.16d-2004. É dito fixo ou nomádico, pois a localização dos CPEs pode variar dentro da área de cobertura de uma única BS, mas a CPE deve estar parada para ter conectividade. Portanto, não suporta *handoff* (Figura 4.4).

WiMAX Fixo pode operar atualmente em duas frequências: 3,5 GHz (licenciada) e 5,8 GHz (ISM - não licenciada). Licenciada significa que a operadora deve obter uma licença junto a ANATEL para implantar uma rede utilizando a frequência desejada [19]. A Figura 4.3 lista os perfis de WiMAX Fixo aprovados pelo Forum. Os métodos de duplexação TDD e FDD são explicados na seção 4.5.

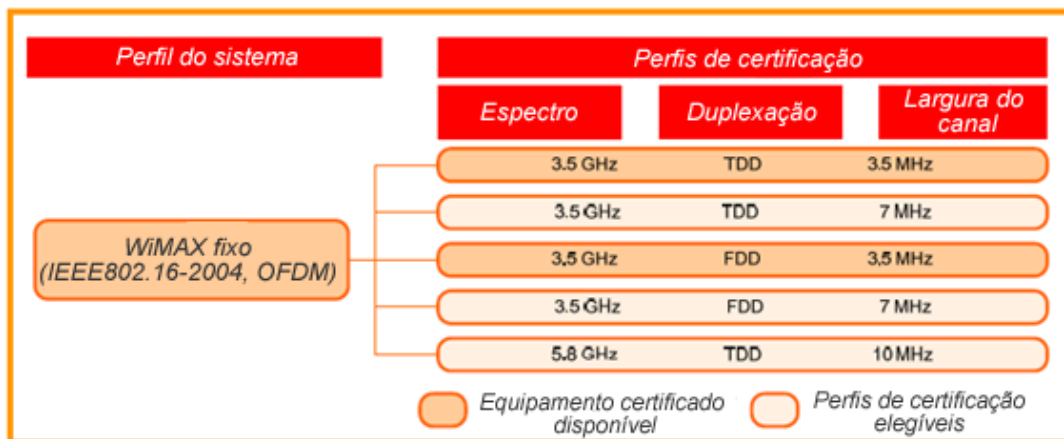


Figura 4.3 – Perfis de operação do WiMAX Fixo [19]

O padrão fixo tem capacidade para atingir velocidades de transmissão médias de 40 Mbps para uma célula de raio médio de até 3 km à partir da BS [16].

A medida que o CPE distancia-se da BS, a intensidade do sinal vai se degradando. Para manter a conectividade, o sistema utiliza modulação adaptativa (explicada na seção 4.5), alternando para uma modulação mais robusta permitindo que o CPE tenha conectividade a uma distância maior, porém com uma velocidade de conexão mais lenta.

#### 4.4 - WIMAX MÓVEL

Solução baseada no padrão IEEE 802.16e-2005. É dito móvel pois um CPE pode movimentar-se sem perder a conectividade. Além disso, há o suporte de transferência entre BS (*handoff*) [5]. Comutação ocorre quando um CPE se desloca da célula de cobertura de uma BS para a área de cobertura de outra BS sem perder a conectividade, assim como ocorre na rede de telefonia celular. A Figura 4.4 ilustra o *handoff* de um terminal.

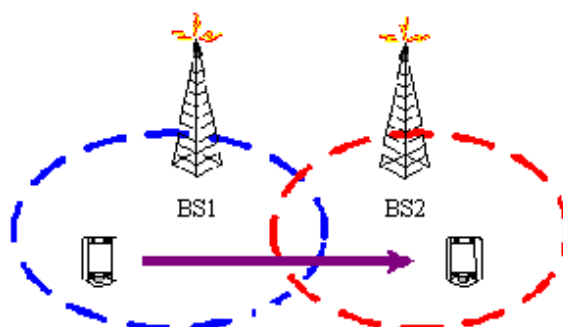


Figura 4.4 – Demonstração de *handoff*

WiMAX Móvel opera nas frequências: 2,3 , 2,5, 3,3 e 3,5 GHz, todas licenciadas. Destina-se, portanto, às operadoras de telecomunicações. Espera-se uma capacidade de até 15 Mbps (canal de 8,75 MHz) para uma célula de raio médio de 3 km [16]. A Figura 4.5 lista os perfis de WiMAX Móvel aprovados pelo Forum.

Classe da Banda	Faixa de Frequência	Largura do Canal	Tamanho da FFT
1A	2.3-2.4 GHz	8.75 MHz	1024
1B	2.3-2.4 GHz	5 MHz/10 MHz	512/1024
3A	2.496-2.69 GHz	5 MHz/10 MHz	512/1024
5A	3.4-3.8 GHz	5 MHz	512
5B	3.4-3.8 GHz	7 MHz	1024
5AL	3.4-3.6 GHz	5 MHz	512
5BL	3.4-3.6 GHz	7 MHz	1024

Figura 4.5 – Perfis de operação do WiMAX Móvel [19]

Da mesma forma que o WiMAX Fixo, os CPEs móveis que estiverem situados longe da BS terão conexões mais lentas que às dos CPEs que estiverem perto da mesma. Segue o comparativo das versões do WiMAX na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Padrões WiMAX

	WiMAX Fixo ou Nomádico	WiMAX Móvel
<b>Padrão</b>	802.16d-2004	802.16e-2005
<b>Portabilidade e Mobilidade</b>	Não	Sim
<b>Frequências de Operação</b>	3,5 GHz (licenciada) 5,8 GHz (ISM – não licenciada)	2,3 / 2,5 / 3,3 / 3,5 GHz (licenciadas)

## 4.5 - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Cada tipo de WiMAX utiliza um tipo de modulação, o que torna um incompatível com o outro:

- OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) – WiMAX Fixo;
- S-OFDMA (*Scalable Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) – WiMAX Móvel.

Esses tipos de modulações oferecem uma série de vantagens.

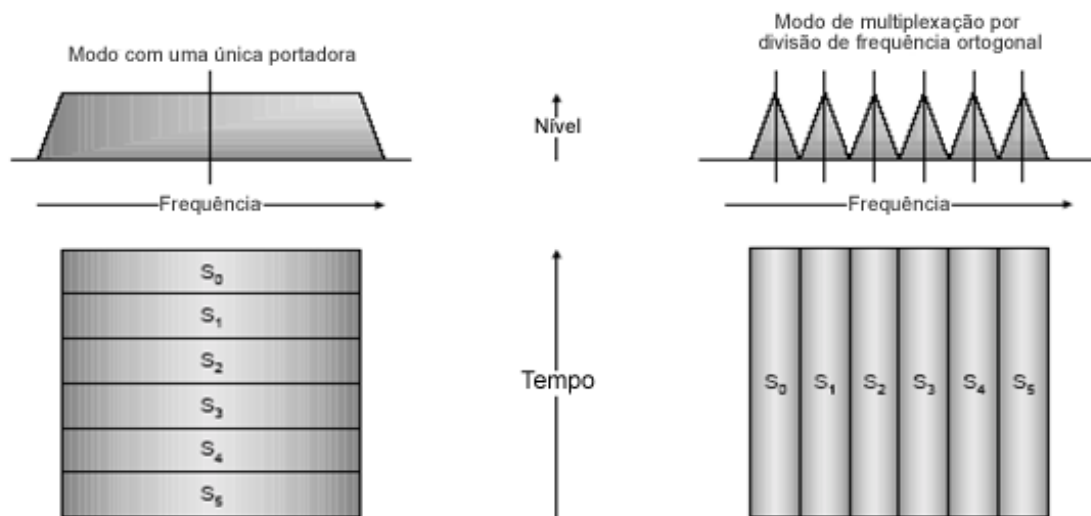


Figura 4.6 – Comparação de modulações [17]

Na Figura 4.6, observa-se que na modulação OFDM os símbolos contendo os bits de informação, são transmitidos paralelamente, utilizando técnicas de múltiplas portadoras ortogonais entre si. Dessa maneira, os símbolos são transmitidos durante um intervalo de tempo maior comparado com uma modulação que utilize uma única portadora, oferecendo ao sinal uma maior tolerância a atraso, alargamento de sinal, múltiplo percurso [17, 20].

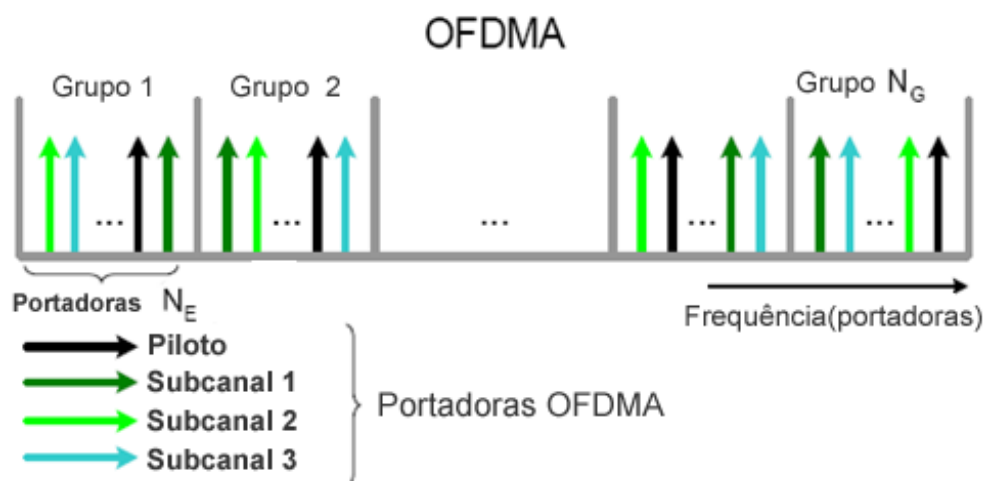


Figura 4.7 – OFDMA e subcanalização [20]

S-OFDMA é semelhante ao OFDM, entretanto pode-se variar o número de sub-portadoras (FFT Size) para manter o espaçamento entre elas constante, de acordo com a largura do canal disponível. Além disso, permite sub-canalização: grupos de portadoras são alocadas a diferentes usuários, permitindo uma maior escalabilidade da rede e uso eficiente do espectro, como pode ser observado na Figura 4.7 [17, 20].

WiMAX Fixo suporta ambas técnicas de duplexação: FDD (*Frequency Division Duplexing*) e TDD (*Time Division Duplexing*), enquanto o WiMAX Móvel, apenas a técnica TDD [4, 5]. A Figura 4.8 mostra a diferença entre as técnicas.

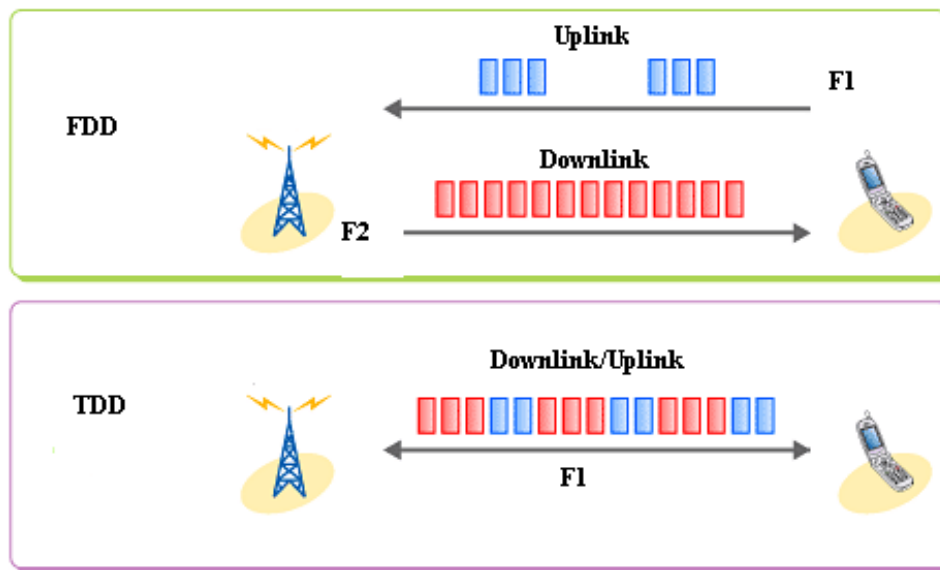


Figura 4.8 – Técnicas de duplexação

Na técnica FDD, *downlink* e *uplink* usam canais distintos. Portanto, a divisão entre *uplink* e *downlink* é fixa (Ex: 30% da banda pra *downlink* e 70% para *uplink*). Entretanto, em frequências licenciadas, em geral, são licenciados pares de frequências de mesmo tamanho, fixando 50% da banda para cada direção de fluxo de dados.

Na técnica TDD, *downlink* e *uplink* usam o mesmo canal. Portanto, a divisão entre *downlink* e *uplink* pode ser dinâmica e ocorre no domínio do tempo. Pode ser que em uma rede, em variados momentos do dia, o fluxo de dados seja maior em uma direção do que em outra. Dessa maneira, TDD oferece uma melhor eficiência em perfis de dados variáveis.

No *downlink* (fluxo de dados da BS aos CPEs), a BS utiliza técnica TDM (*Time Division Multiplexing*). A BS multiplexa o tempo de transmissão do canal *downlink* para transmitir informações para os diversos CPEs de acordo com o volume de dados destinado a cada CPE. Em cada intervalo de tempo podem ser alocados mais tempo para algumas CPEs do que para outras. Como a tecnologia oferece QoS, a BS pode transmitir, a cada unidade de tempo, mais pacotes para aquelas CPEs com maior prioridade, de modo a assegurar a banda garantida para uma determinada aplicação.

No *uplink* (fluxo de dados dos CPEs à BS) faz-se necessário uso de uma técnica de múltiplo acesso. A técnica utilizada é a TDMA (*Time Division Multiple Access*). À medida que os CPEs desejam enviar informações, fazem requisições à sua BS para utilizar o meio. A BS então aloca intervalos de tempo (*time slots*) às CPEs, para que cada um envie dados de cada vez, para que não haja colisões. Serão atribuídos mais ou menos *time slots* para as CPEs de acordo com o volume de dados que cada uma tem a transmitir. No caso de QoS, os *time slots* são alocados em frequência e quantidade suficientes para assegurar prioridade para os dados das aplicações mais críticas. [4, 5]. A Figura 4.9 ilustra a multiplexação no *uplink* e no *downlink*.

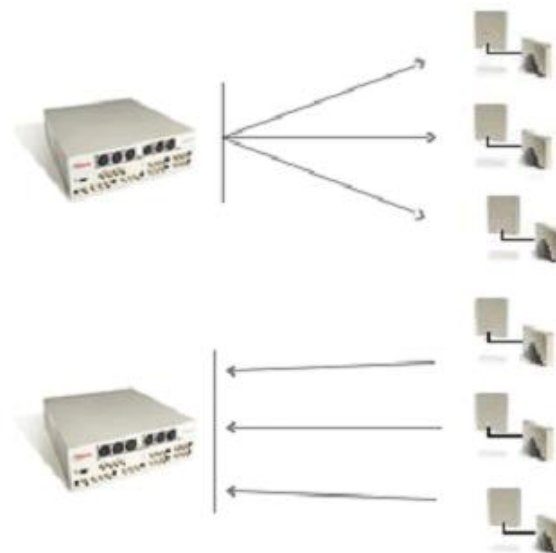


Figura 4.9 – *Downlink*: TDM, *Uplink*: TDMA

Como foi dito anteriormente, à medida que o CPE distancia-se da BS a relação sinal ruído SNR (*signal to noise ratio*) diminui. O WiMAX utiliza técnica de modulação e codificação FEC (*forward error correction*) adaptativa, isto é, se o SNR diminui até um limite, muda-se a modulação e/ou codificação do sinal. As modulações suportadas são: BPSK, QPSK,



16-QAM, 64-QAM. As vezes, não é necessário mudar a modulação e, portanto, muda-se apenas o nível de codificação FEC, inserindo ou retirando bits redundantes [4, 5]. Esse processo é ilustrado na Figura 4.10.

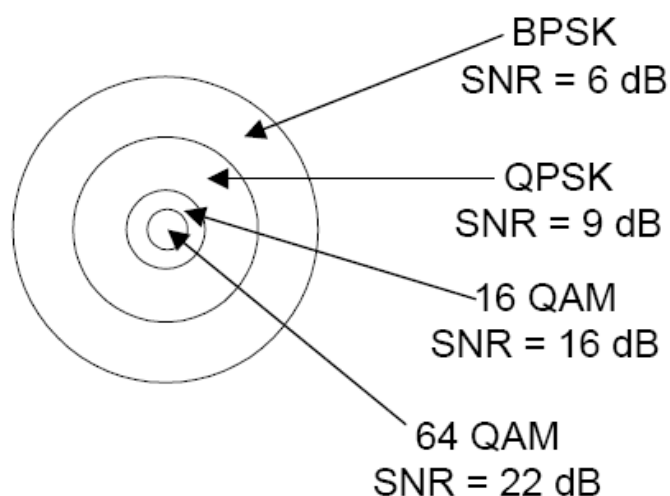


Figura 4.10 – Modulação adaptativa

Em relação à segurança, a autenticação é feita com certificados x.509 e a criptografia de dados utilizando os algoritmos DES (*Data Encryption Standard*) e AES (*Advanced Encryption System*) [4, 5].

Pode ser feito uso de antenas direcionais para aumentar o alcance, ou no caso de BS setorizadas, para cobrir as áreas dos setores correspondentes. Além disso, técnicas de antenas inteligentes podem ser utilizadas (principalmente nos equipamentos mais robustos), como AAS (*Adaptive Antenna System*) e MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) [4, 5]. MIMO refere-se ao uso de múltiplas antenas no transmissor e receptor. Utiliza-se de técnicas como enviar o mesmo sinal em antenas diferentes com defasamento de fase, dividir o *streaming* de dados entre diferentes antenas (multiplexação espacial), diversidade, onde o mesmo *streaming* de dados é enviado em todas as antenas com codificação diferentes. Todas essas técnicas tentam reduzir efeitos de multipercurso, interferência inter-simbólica. Todas essas técnicas combinadas, além de possibilitar o uso do WiMAX em ambientes sem linha de visada (NLOS), melhoram o *throughput* (taxa de transmissão de dados real) e aumentam o alcance.

#### 4.6 - WIMAX FIXO VS WIMAX MÓVEL

Cada padrão WiMAX pode ser utilizado em ambientes comuns, mas tem aplicações distintas. A Tabela 4.2 resume as diferenças.

Tabela 4.2 – Diferenças entre os padrões WiMAX [20]

Definição	Dispositivos	Localizações/ Velocidade	Handoffs	802.16-2004	802.16e
Acesso Fixo	CPEs internas e externas	Simples/ Estacionário	Não	Sim	Sim
Acesso Nomádico	CPEs internas, Cartões PCMCIA	Múltiplo/ Estacionário	Não	Sim	Sim
Portabilidade	Laptop PCMCIA ou mini cards	Múltiplo/ Velocidade de caminhada	Hard handoffs	Não	Sim
Mobilidade Simples	Laptop PCMCIA ou mini cards, PDAs ou smartphones	Múltiplo/ Baixa velocidade de veículo	Hard handoffs	Não	Sim
Mobilidade Total	Laptop PCMCIA ou mini cards, PDAs ou smartphones	Múltiplo/ Alta velocidade de veículo	Soft handoffs	Não	Sim

Segue as vantagens de cada padrão:

- WiMAX Fixo:
  - Modulação menos complexa;
  - Banda livre de licença;
  - Maior *throughput*;
  - Disponível no mercado antes que o padrão móvel.
- WiMAX Móvel:
  - Suporta mobilidade e *handoff*;
  - Maior disponibilidade de espectro;
  - Melhor cobertura em espaços fechados;
  - Ótima flexibilidade em lidar com recursos de espectro.

O mercado alvo do WiMAX Fixo são os mercados residenciais e comerciais, como alternativa a soluções de banda larga como DSL e cabo. O padrão Móvel pode ser utilizado em todas as aplicações do fixo, além de competir com outras tecnologias de sistema móvel.

A possibilidade de WiMAX Móvel competir com sistemas celulares foi confirmada com a inclusão da interface de rádio IP-OFDMA (correspondente ao WiMAX Móvel – IEEE 802.16e-2005) no padrão IMT-2000 da UIT, que define os sistemas de comunicação sem fio de 3ª geração.

Espera-se uma disputa pelo mercado de rede celular de 4ª geração entre evoluções das redes WiMAX e UMTS. Essas redes deverão suportar serviços multimídia. A Figura 4.11 compara as diversas tecnologias sem fio disponíveis atualmente.

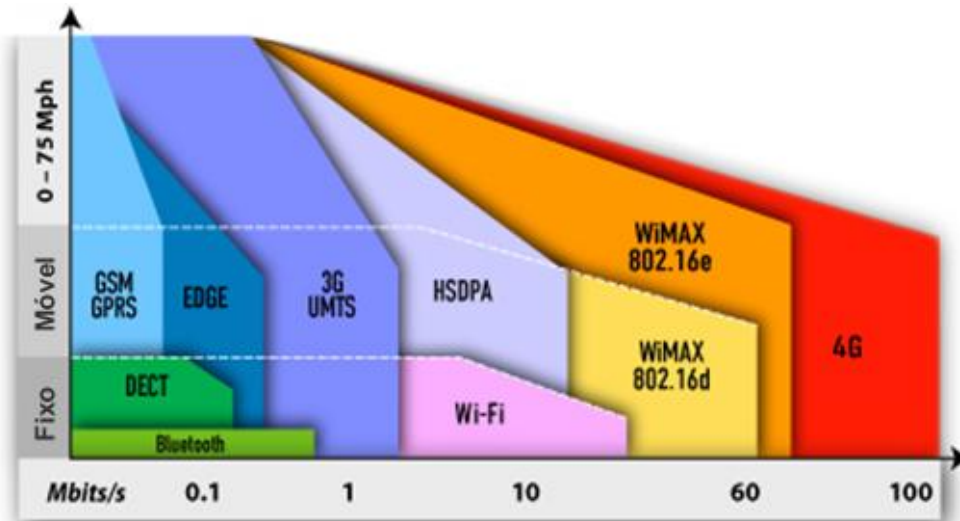


Figura 4.11 – Comparação de tecnologias

#### 4.7 - QOS

Para que possamos prover uma solução de Qualidade de Serviço (QoS) fim-a-fim em uma rede que faz o uso do WiMAX, é necessário a implementação de QoS tanto na interface aérea como na rede cabeada ou outro tipo de rede que esteja conectada à rede WiMAX. No entanto, o objeto de estudo deste projeto se refere apenas a interface aérea, sendo estudados os mecanismos de acesso ao meio e a forma como o agendamento é feito, isto é, somente na rede WiMAX..

A fim de entendermos o funcionamento do QoS no WiMAX, primeiramente serão abordados alguns conceitos básicos para que depois possamos entender o seu real funcionamento.

O primeiro dos conceitos que será abordado – *service flow* – é de fundamental importância para o entendimento de todo o processo.

#### 4.7.1 - Service Flow

Um *service flow* é um serviço de transporte da camada MAC que provê o fluxo unidirecional de pacotes tanto no *uplink* como no *downlink*. Cada *service flow* é composto por um conjunto de atributos e parâmetros QoS. Estes parâmetros possuem os detalhes da forma como as estações móveis (MS – *Mobile Station*) farão a requisição de banda que deve ser alocada pela estação base (BS – *Base Station*), e a forma a qual o agendador da estação base deve responder a estas requisições [21].

Existem diversos parâmetros QoS, os quais podem ser encontrados no padrão 802.16-2004, no entanto, apenas os de maior relevância foram abordados aqui. São eles [21]:

- ***Minimum reserved traffic rate*** – Taxa de tráfego mínima reservada média por *service flow* (bps);
- ***Maximum sustained traffic rate*** – Taxa de tráfego máxima do *service flow* (bps);
- ***Request/transmission policy*** – Este valor determina a capacidade para especificar alguns atributos do *service flow*;
- ***Tolerated jitter*** – Variação máxima do atraso;
- ***Maximum latency*** – Latência máxima permitida entre o encaminhamento para a interface aérea e a recepção de um pacote pela estação base ou móvel;
- ***Traffic priority*** – Prioridade de um *service flow* em relação a outro no caso de todos os outros parâmetros serem idênticos, de modo que o que possuir a maior prioridade deverá receber um atraso menor e uma preferência maior no *buffer*.

Alguns dos atributos que caracterizam um *service flow* são (17):

- ***Service Flow ID (SFID)*** – Identificador do *service flow* composto por 32 bits. Cada *service flow* possui um SFID diferente;
- ***Connection ID (CID)*** – Identificador de conexão composto por 16 bits;
- ***ProvisionedQoSParamSet*** – Define um conjunto de parâmetros QoS provisionados. Está fora do escopo do padrão 802.16, mas deve ser definido preferencialmente pelo sistema de gerência da rede;
- ***AdmittedQoSParamSet*** – Define um conjunto de parâmetros QoS para os quais a BS ou SS/MS (*Subscriber Station* ou *Mobile Station*) está reservando recursos, principalmente largura de banda.

- **ActiveQoSParamSet** – Define um conjunto de parâmetros QoS que estão sendo fornecidos para um *service flow*.
- **Módulo de Autorização** – É um módulo lógico localizado na estação base responsável pela aprovação ou negação de qualquer mudança nos parâmetros QoS de um *service flow* ou criação de um novo.

#### 4.7.1.1 - Tipos de *Service Flow*

Existem 3 tipos de *service flow*, são eles:

- Provisionado
- Admitido
- Ativo

Sendo que o provisionado deve ser preferencialmente definido pelo sistema de gerência da rede, e o admitido deve ser um subconjunto deste, assim como o ativo deve ser do admitido. O provisionado funciona como um envelope que determina o máximo autorizado. Isto pode ser visto pela Figura 4.12 [21].

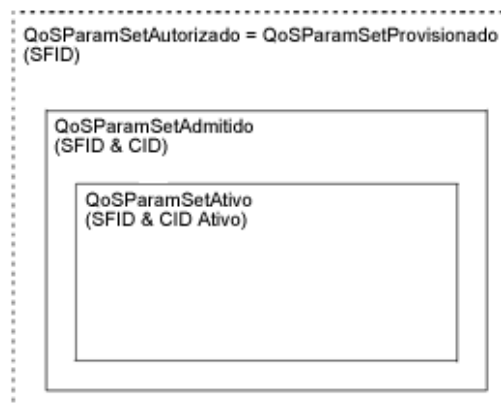


Figura 4.12 – Modelo de Ativação em duas fases [4]

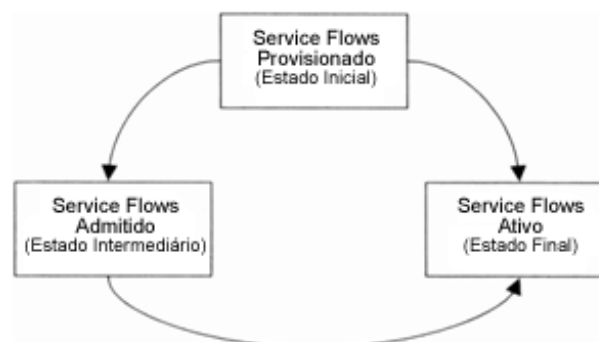


Figura 4.13 – Estrutura dos tipos de *service flow* [4]

Após provisionado ele poderá passar para o estado admitido e em seguida para o ativo ou diretamente para o ativo, como pode ser visto no fluxograma da Figura 4.13.

#### **4.7.2 - Identificador de conexão**

Conexões são estabelecidas entre a estação base e a estação móvel, unidirecionalmente, de forma a transportar o tráfego de um *service flow*. Cada conexão é utilizada por um único tipo de serviço (voz ou dados por exemplo) e é identificada por um identificador de conexão (CID), que é composto por 16 bits. Existe diversos CID no padrão, cada um tendo um uso específico. [21]

Cada SFID ao passar para o estado admitido ou ativo recebe um CID correspondente [21]. Esse mapeamento entre CID e SFID é que vai definir os parâmetros de QoS de cada conexão.

#### **4.7.3 - Camada MAC**

A camada MAC, em sua atribuição de qualidade de serviço, é responsável pela classificação e mapeamento do tráfego oriundo das camadas superiores. Esta camada é dividida em 3 subcamadas. A subcamada de convergência de serviço específico (CS), subcamada MAC de parte comum (CPS) e subcamada de segurança [21].

Ao receber uma MSDU (*MAC Service Data Unit*), a CS aplica uma série de critérios a este pacote (IP de destino por exemplo) de forma a classificá-lo e mapeá-lo em uma conexão que possui um SFID associado. O SFID que é responsável pelo provimento de QoS a este pacote. Após esta classificação o pacote é enviado para a CPS para que este seja entregue à conexão definida. Este procedimento é ilustrado pela Figura 4.14 [21].

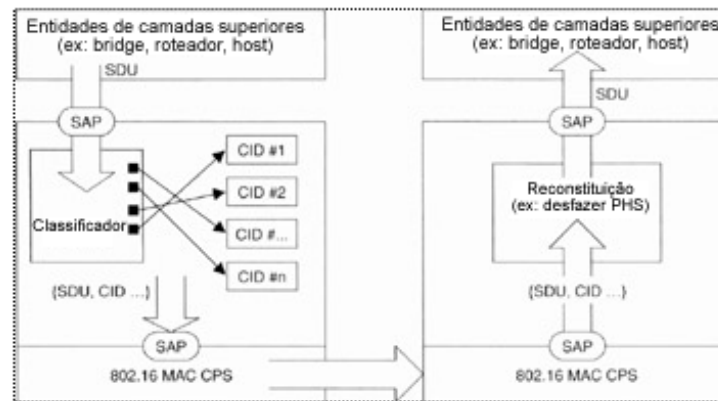


Figura 4.14 – Classificação e Mapeamento de Pacotes [4]

A classificação e o mapeamento são feitos tanto na estação base como na estação móvel, correspondendo ao tráfego de *downlink* e *uplink*, respectivamente.

#### 4.7.4 - Métodos de requisição e concessão de banda [21]

No *downlink*, a estação base aloca banda para cada estação móvel de acordo com os parâmetros de QoS e a quantidade de tráfego requisitados. As estações móveis dispõem de 4 métodos para acessar o meio e requisitar os parâmetros de QoS necessários para suas aplicações no *uplink*, e receberem a alocação necessária. Cada um deles será explicado abaixo.

##### 1. *Unsolicited bandwidth grants*

Neste método slots fixos de transmissão são reservados para cada estação móvel. Esse método é utilizado pela classe de QoS UGS, explicada posteriormente.

##### 2. *Piggyback bandwidth request*

Este mecanismo permite que a requisição de qualidade de serviço seja feita em um quadro MAC geral, juntamente com a transmissão de dados. Dessa maneira, não é necessária a transmissão de um quadro exclusivo para a requisição de banda, economizando o envio de um cabeçalho. Isto pode ser feito pela inserção de um subcabeçalho na parte destinada a dados.

### 3. *Unicast polling*

Também chamado de *polling*, este método faz *pollings* individuais em cada SS. No entanto, nenhuma mensagem é enviada explicitamente para as SS. Ao invés disso, é reservada banda para a transmissão da SS no UL-MAP MAC *Management Message* (mensagem contendo o mapeamento de transmissão *uplink* das SS), isto é, oportunidades de transmissão. Esta banda pode ser utilizada tanto para a transmissão de dados, quanto para a transmissão de requisições ou, ainda, para a transmissão de uma requisição juntamente com os dados. A reserva de banda é associada ao CID Básico da SS.

### 4. *Contention-based*

Também conhecido como *multicast polling*, este método faz *pollings* em grupos de SS. Da mesma forma que no *unicast polling*, nenhuma mensagem é enviada explicitamente. Banda suficiente é reservada para que o grupo de estações possa disputar o meio através do UL-MAP. Neste intervalo de banda reservada cada estação pertencente a este grupo pode fazer uma requisição de banda. No entanto, de forma a evitar que várias estações façam a requisição simultaneamente e colidam é estipulado um tempo de *backoff* aleatório para cada estação de modo que a estação aguarde por este tempo antes de efetuar a requisição. Feita a requisição, a estação base verificará os requisitos desejados e poderá conceder ou não os requisitos e banda desejados.

Ao contrário do método anterior a banda reservada para requisição não pode ser utilizada para a transmissão de dados.

Este método garante uma boa economia de banda, já que ao invés de reservar a banda apenas para uma SS, reserva para um grupo. Estações que estejam inativas por muito tempo podem deixar de receberem *polling* individual e passarem a receber um *polling* em grupo para reduzir o consumo de banda.

A banda alocada para disputa entre os membros do grupo é identificada pelo CID de *multicast* do grupo.

Além da utilização de um grupo de *multicast*, esta reserva poderia ser feita em *broadcast*, para todos disputarem.



Existe um outro método de requisitar banda conhecido como *Bandwidth Stealing*. Após uma SS solicitar banda e recebê-la, ele faz outra requisição de banda em vez de transmitir dados [4].

As requisições feitas por estes métodos podem requerer tanto um incremento da banda já disponível, como requererem um valor de banda especificado. Sendo o último método necessário periodicamente devido a natureza de auto correção dos protocolos de requisição e concessão.

#### 4.7.5 - Classes de Serviço [21]

Existem 5 classes de serviço atualmente definidas que são utilizadas para a classificação pela camada MAC. Estas classes, juntamente com sua descrição estão listadas abaixo.

##### a) *Unsolicited Grant Service* (UGS)

Utilizada para aplicações em tempo real que possuam tráfego com pacotes de tamanho fixo.

Nesta classe, concessões para transmissão de dados de tamanho fixo são concedidas periodicamente, de forma que a latência e a sobrecarga causada pelo pedido de requisição sejam eliminados. O tamanho da concessão é determinada pelo tráfego máximo suportado pelo *service flow*. Um exemplo de aplicação que necessita desta classe de serviço é o VoIP sem supressão de silêncio. O funcionamento está exemplificado abaixo.

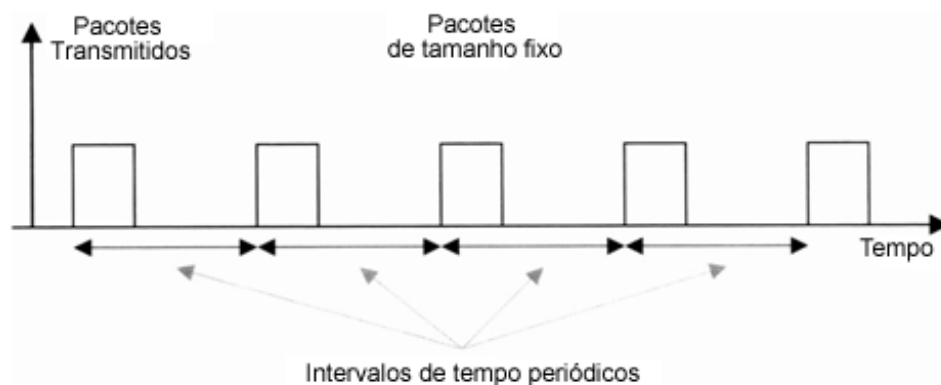


Figura 4.15 – *Unsolicited Grant Service*

b) *Real-time Polling Service (rtPS)*

Classe de serviço utilizada para a transmissão de pacotes de tamanho variável em tempo real. Em vez de concessões de transmissão de dados, são emitidas concessões periódicas de oportunidades de transmissão (*unicast polling*). O tamanho da janela de transmissão necessária será definido pela SS. Um exemplo é a transmissão de vídeo MPEG. A figura 4.16 ilustra o seu funcionamento.

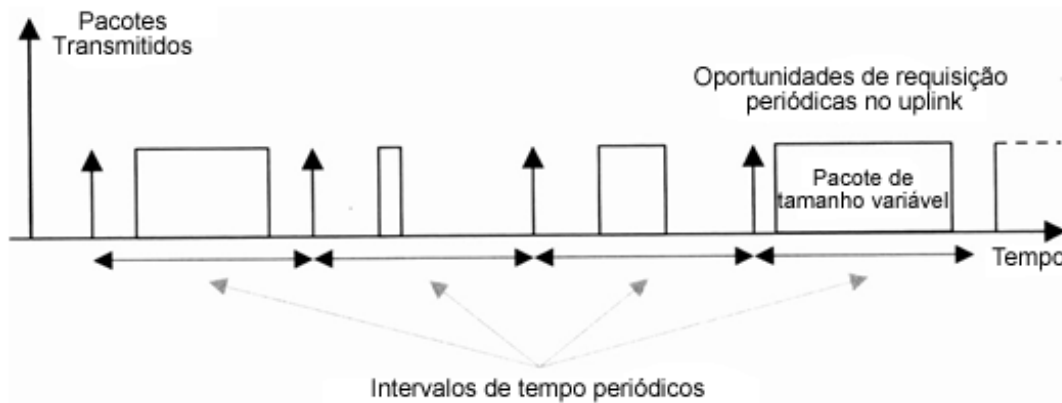


Figura 4.16 – *Real time polling service*

c) *Extended Real-time Polling Service (ertPS)*

Esta classe foi adicionada no padrão 802.16e-2005, e é considerada um híbrido do UGS e do rtPS. Utilizada para aplicações em tempo real com pacotes de tamanho variável e necessidades de latência e transmissão.

Da mesma forma que no UGS, ele recebe concessões periódicas de transmissão, no entanto, os tamanhos das janelas são negociados através de reservas de banda para serem utilizadas com o método *piggyback*. Um exemplo seria o VOIP com supressão de silêncio.

d) *Non-real-time Polling Service (nrtPS)*

Suporte a transmissão de pacotes de tamanho variável e tolerantes ao atraso. São concedidas regularmente oportunidades de transmissão (*unicast polling*) e também é utilizado o método de contenção (*multicast polling*), figura 4.17. Um exemplo é a transmissão FTP.

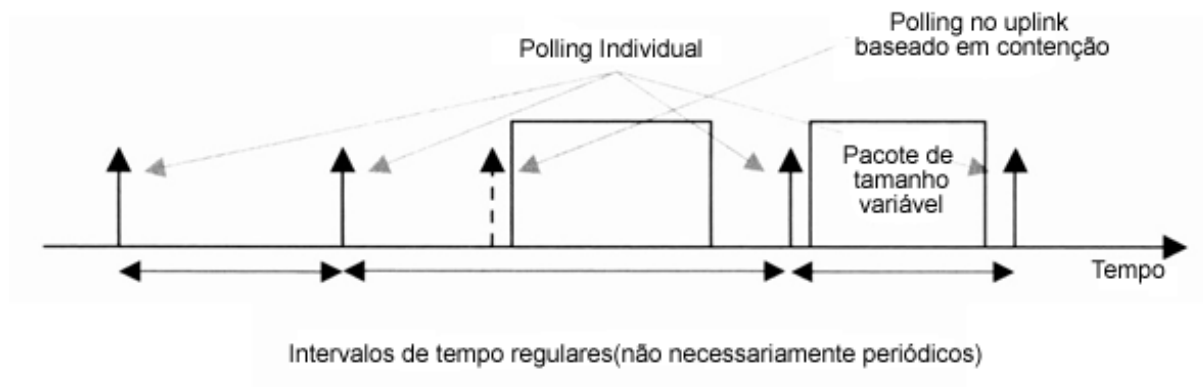


Figura 4.17 – *Non-real time polling service*

e) *Best Effort*

Sem garantia alguma de serviço, utilizado em transmissões que não requerem nenhuma garantia. É utilizado o método baseado em contenção para acessar o meio, e esporadicamente são concedidos oportunidades de transmissão, figura 4.18. Um exemplo é o email.

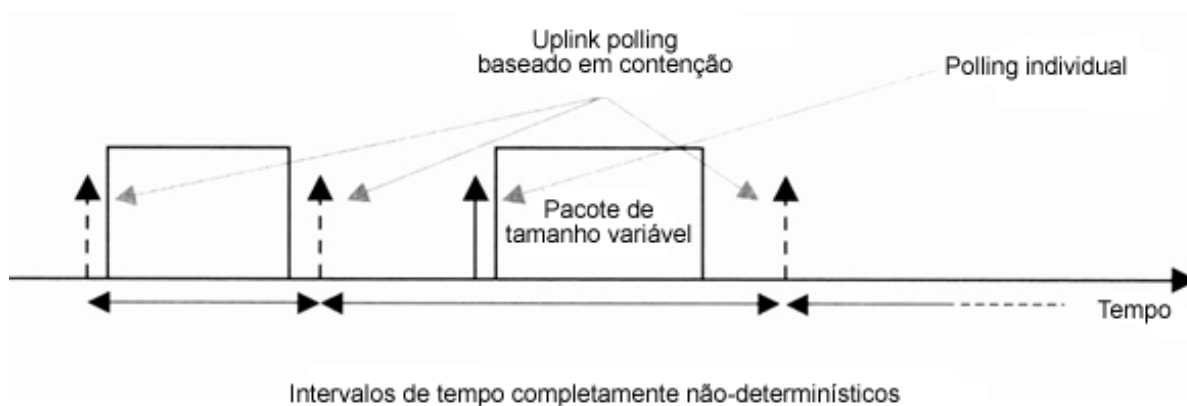


Figura 4.18 – *Best Effort*

A tabela 4.3 indica quais são parâmetros obrigatórios que devem ser especificados para cada *service flow* para cada classe.

Tabela 4.3 – Parâmetros obrigatórios para cada classe

Scheduling Service	Maximum Sustained Traffic Rate	Minimum Reserved Traffic Rate	Request/Transmission Policy	Tolerated Jitter	Maximum Latency	Traffic Priority
UGS	*	(Can be present)	*	*	*	
rtPS	*	*	*		*	
ertPS	*	*	*		*	
nrtPS	*	*	*			*
BE	*		*			*

Na tabela 4.4 segue o resumo de que método de requisição de banda cada classe pode utilizar.

Tabela 4.4 – Mecanismos de requisição de banda para cada classe de QoS

Serviço de agendamento	Método de requisição Piggyback	Bandwidth stealing	Polling Individual	Polling baseado em contenção
UGS	Permitido	Permitido	PM (Poll-Me) bit can be used	Não permitido
ertPS	Extended piggyback	Permitido	Permitido	Permitido
rtPS	Não permitido	Não permitido	Permitido	Não permitido
nrtPS	Não permitido	Não permitido	Permitido	Permitido
BE	Não permitido	Não permitido	Permitido	Permitido

#### 4.7.6 - Funcionamento do QoS

Agora, com o conhecimento obtido previamente podemos entender o funcionamento do QoS no WiMAX.

Primeiramente devemos saber que na BS existe um agendador responsável por controlar todos os parâmetros do sistema, inclusive a alocação de banda, tanto para o *downlink* como para o *uplink*.

Outro fato importante que deve ser observado, é que a alocação de banda no *downlink* e no *uplink* são feitas de formas completamente diferentes. No *downlink*, a estação base, a partir de diferentes parâmetros como a classe de serviço e a quantidade de tráfego requerida determina como será o tráfego de *downlink*. Já no *uplink* existem 4 métodos de acesso ao meio, os quais foram apresentados acima, que devem ser seguidos de acordo com o tipo de tráfego, de forma a requisitar a banda, latência entre outros requisitos necessários.

Quando uma estação móvel é iniciada, ela faz um registro na BS, momento em que negocia com a BS os *service flows* que serão utilizados. Após essa negociação, os *service flows* podem ser modificados ou novos *service flows* criados através das seguintes mensagens:

- DSA (*Dynamic Service Addition*): cria novos *service flows*;
- DSC (*Dynamic Service Change*): modifica um *service flow* existente;
- DSD (*Dynamic Service Delete*): deleta um *service flow*.

Ao fim dessas negociações o tráfego começa a ser transmitido, baseado nas requisições que foram feitas, e passa a ser classificado e mapeado em uma classe de serviço como ilustrado na figura 4.19.

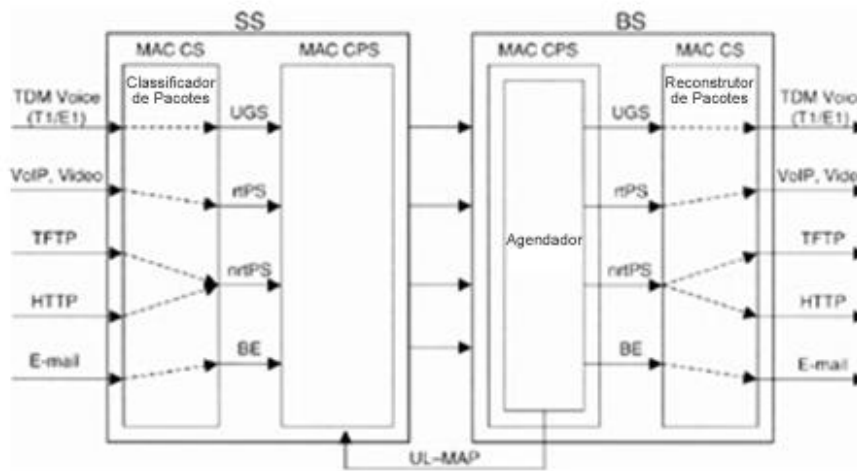


Figura 4.19 – Classificação do Tráfego *Uplink*

Na Figura 4.19 também pode ser visto o envio da mensagem UL-MAP MAC *Management message*. Esta mensagem de controle que é enviada à todas SS (*broadcast*) aloca o acesso de cada SS ao canal de *uplink*, isto é, apresenta os intervalos de transmissão que foram definidos para cada SS.

Baseado nisto, a CPS, no momento apropriado, encaminhará o tráfego por suas respectivas conexões.

Da mesma forma que no *uplink*, as decisões de alocação tomadas no *downlink* são enviadas em broadcast através da mensagem DL-MAP MAC *Management message*. Isto pode ser visto na figura 4.20.

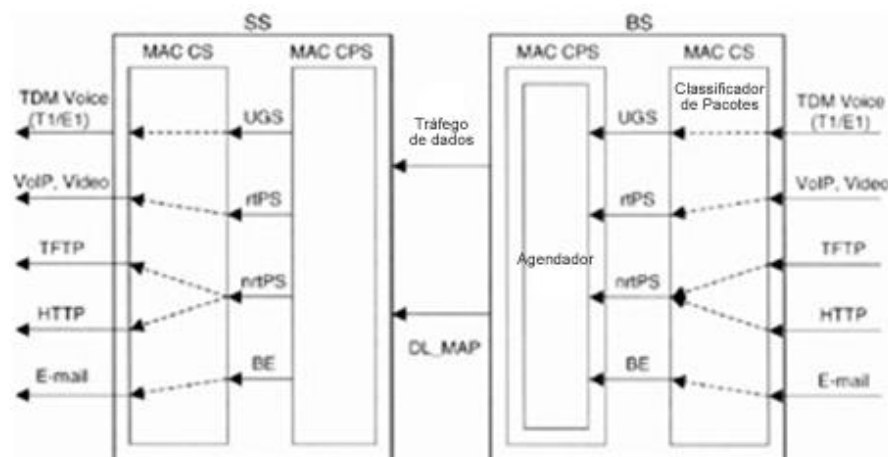


Figura 4.20 - Classificação do Tráfego *Downlink*

Nas seções 4.1 – 4.7 foram apresentados o funcionamento da tecnologia WiMAX e os mecanismos de QoS desta. Esses mecanismos são de fundamental importância para que aplicações críticas possam trafegar através desta tecnologia. Nas seções subsequentes será apresentada a simulação realizada da rede WiMAX no NS2.

## 4.8 - SIMULAÇÃO DE WIMAX NO NETWORK SIMULATOR 2

Neste capítulo utilizou-se a ferramenta NS2 (*Network Simulator 2*) [22], juntamente com o módulo WiMAX do NDSL (*Networks & Distributed Systems Laboratory*) [23], de forma a analisar o funcionamento do mecanismo de QoS estabelecido pelo padrão IEEE 802.16e [5]. Primeiramente apresentamos o processo de instalação seguido da análise das 5 classes de QoS apresentadas no padrão IEEE 802.16e [5], partindo de topologias básicas até topologias mais complexas, objetivando o desenvolvimento e pesquisa tecnológica, além de sugerir melhoras para o módulo.

Os dados da simulação foram obtidos a partir do arquivo de extensão tr (arquivo trace do NS2) e tratados com os *softwares* Mathworks MatLab R2007a, Microsoft Access e Excel.

### 4.8.1 - Instalação

A instalação do NS2 foi feita na distribuição Linux Fedora 8, seguindo os passos do tutorial NS2 [24], no entanto, o procedimento para configurar as variáveis de ambiente não é explicado. Esse procedimento é feito executando-se os comandos abaixo em um terminal, onde /home/ deve ser substituído pelo caminho de instalação do NS2.

```
export PATH=$PATH:"/home/ns-allinone-2.29/bin:/home/ns-allinone-2.29/tcl8.4.11/unix:/home/ns-allinone-2.29/tk8.4.11/unix"
export LD_LIBRARY_PATH="/home/ns-allinone-2.29/otcl-1.11, /home/ns-allinone-2.29/lib"
export TCL_LIBRARY="/home/ns-allinone-2.29/tcl8.4.11/library"
```

Este processo pode ser automatizado através da criação de um arquivo com extensão “sh” com esses comandos inclusos e adicionando-o à pasta /etc/profile.d/, de forma a evitar que os comandos tenham que ser executados a cada nova inicialização do sistema.

Após o término da instalação do NS2, o módulo de WiMAX foi instalado de acordo com o tutorial Módulo WiMAX [23]. Vale ressaltar que a versão do NS2 utilizada foi a 2.29.3.

Os cenários descritos nas próximas seções apresentam as seguintes particularidades:

- Os terminais não estão se movendo;
- A modulação é 64QAM.

Outras características, peculiares a cada cenário, serão descritas nas seções destes.

#### 4.8.2 - Classes Isoladas

A fim de verificarmos o funcionamento de cada uma das classes de QoS implementadas pelo módulo, utilizamos uma topologia onde um único nó transmitia apenas uma classe isoladamente por simulação, de forma que não houvesse interferência causada por outros tipos de tráfego.

##### 4.8.2.1 - UGS

A primeira classe a ser testada foi o UGS, na qual obtemos o gráfico apresentado na figura 4.21.

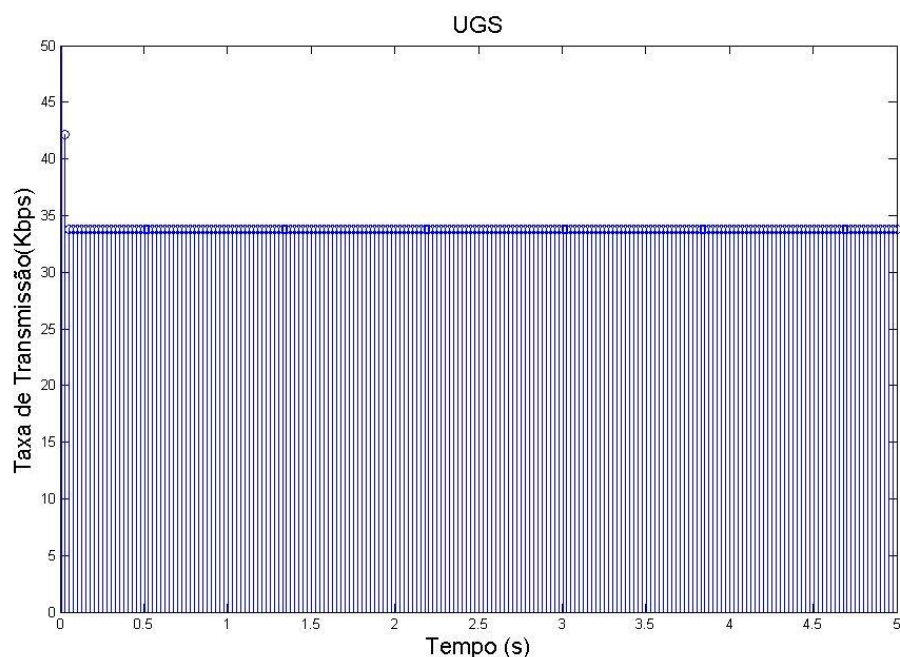


Figura 4.21 – Taxa de transmissão da classe UGS

Nesta figura podemos observar que a taxa de transmissão é constante, em 33,75 Kbps ao longo do tempo e que existe uma periodicidade entre duas transmissões subsequentes, com espaçamento de 0,025s entre elas. Isto mostra um comportamento de acordo com o padrão IEEE 802.16e [5]. Outra evidência de um bom funcionamento é a ausência de mensagens que façam o requerimento de banda antes de cada transmissão, que é uma das características desta classe, e pode ser visto através da análise do arquivo com extensão “tr” gerado pela simulação. Essa característica é responsável por uma baixa latência entre concessões de transmissão subsequentes. No entanto, na simulação, todos os atrasos – obtidos pela diferença entre o tempo de recebimento e envio dos pacotes – foram iguais, resultando em um *jitter* igual a zero, que não representa adequadamente o que acontece na prática.

O UGS da forma como está implementado, seria ideal para uma aplicação como VoIP, que tem como característica uma taxa de transmissão constante que pode variar com a codificação utilizada, com espaçamento periódico entre as transmissões, no entanto, a principal interferência neste tipo de comunicação, o jitter, não foi implementado.

#### 4.8.2.2 - ertPS

A segunda classe testada foi o ertPS, onde foi obtido o gráfico da figura 4.22.

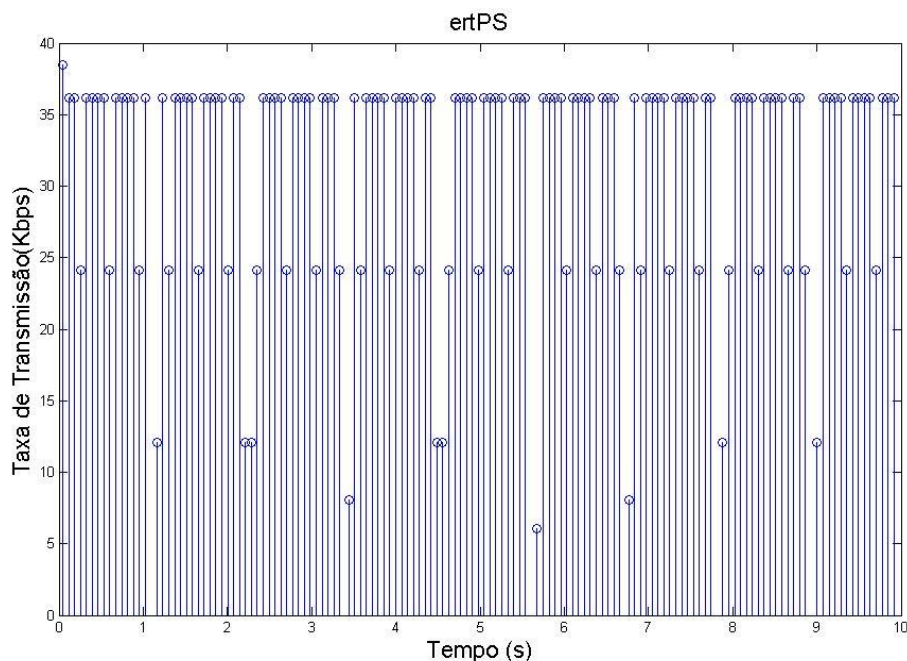


Figura 4.22 – Taxa de transmissão da classe ertPS



Nesta figura podemos observar uma taxa de transmissão variável e periódica, com um espaçamento de 0,07s entre transmissões subsequentes, que esta de acordo com o padrão. Da mesma forma que no UGS, obtivemos um atraso constante entre as transmissões, resultando em um *jitter* igual a zero. A principal diferença em relação ao UGS é o suporte a taxas de transmissão variáveis. Outra diferença encontrada foi a presença de requisições de banda antes de cada transmissão – identificadas pela presença da mensagem BWREQ (*Bandwidth Request*) no arquivo de saída da simulação – que não deveriam ocorrer, e estão em desacordo com o padrão, já que o intuito desta classe é suportar aplicações que necessitem de uma baixa latência e taxas de transmissão variáveis. Apesar destas requisições não terem ocasionado um impacto na latência da simulação, na prática, a transmissão seria afetada, ocasionando maior latência e provável *jitter*, o que seria extremamente prejudicial para as aplicações a que esta classe se propõe, como por exemplo, VOIP com supressão de silêncio, além de ocasionar diversos descartes de pacote em uma rede congestionada, como será melhor abordado a frente.

#### 4.8.2.3 - rtPS

A terceira classe a ser analisada foi o rtPS, a qual foi simulada e seu respectivo gráfico da taxa de transmissão está apresentado na figura 4.23.

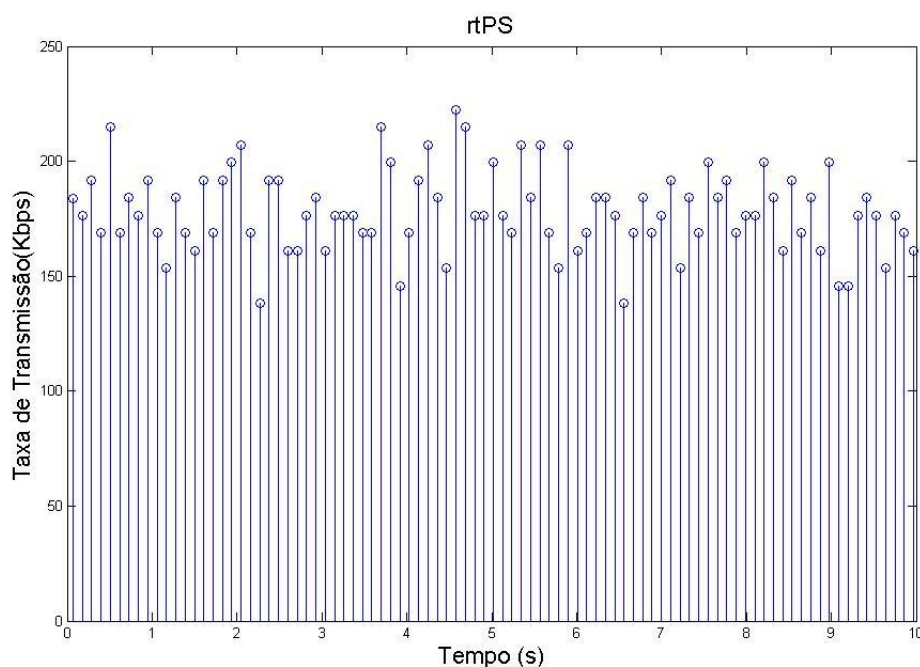


Figura 4.233 – Taxa de transmissão da classe rtPS

Como podemos observar neste gráfico, as taxas de transmissão variam desde 138 até 223 Kbps, e o intervalo entre transmissões é periódico de 0,11s. No entanto, da mesma forma como nas duas simulações anteriores, o atraso é constante e, conseqüentemente, o jitter é zero. Nesta simulação podemos observar o requerimento de banda antes de cada transmissão, que são feitas nos unicast poolings recebidos e onde será definida a quantidade de banda necessária para a transmissão de forma a permitir taxas variáveis ao custo de uma maior latência. Essas requisições estão previstas no padrão IEEE 802.16e [5] e são verificadas através das mensagens BWREQ no arquivo de saída da simulação. Essa classe representa fielmente o padrão, excetuando-se o fato de apresentar um atraso constante e *jitter* zero, sendo, portanto, adequado para a transmissão de um *streaming* de vídeo.

#### 4.8.2.4 - nrtPS

A quarta classe a ser testada foi o nrtPS, a qual o gráfico da taxa de transmissão está apresentado abaixo na figura 4.24.

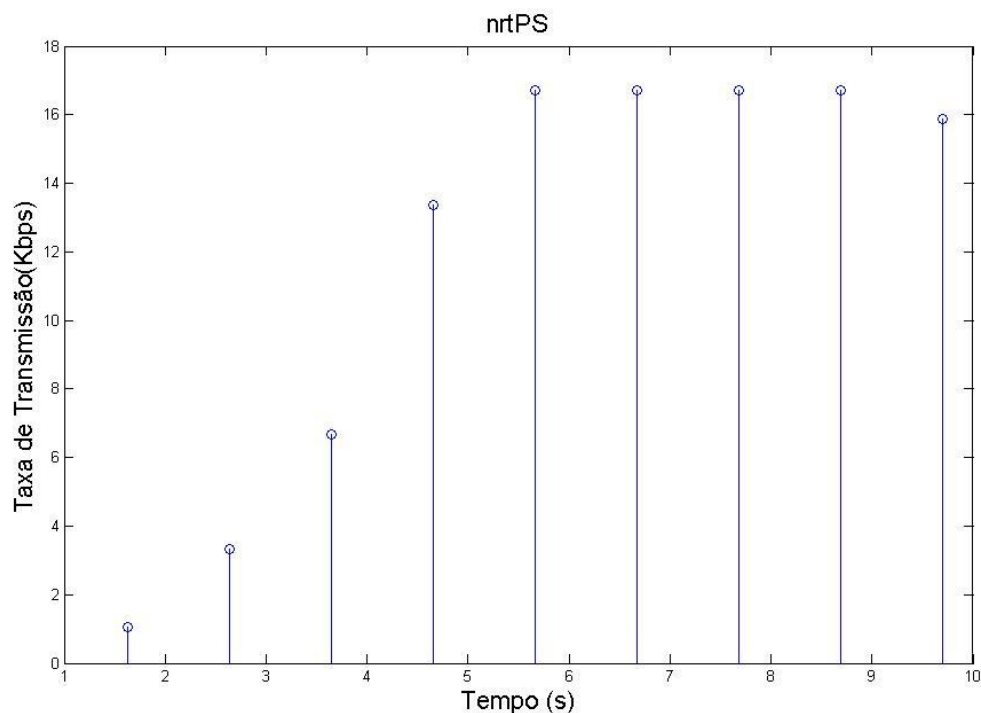


Figura 4.24 – Taxa de transmissão da classe nrtPS

Podemos observar neste gráfico que a taxa de transmissão é variável e que existe uma periodicidade nas transmissões, no entanto, essa periodicidade no recebimento de *pollings* individuais não é definida no padrão. Este apenas afirma que tipicamente os *pollings* são feitos em um segundo ou menos, o que implica em uma regularidade e não periodicidade. As taxas de transmissão também foram muito pequenas, o que provavelmente foi feito de forma a modelar tráfegos de abertura de uma página web, por exemplo, mas não adequadas para um tráfego FTP. Ao analisarmos o arquivo de saída da simulação também podemos observar a presença das mensagens BWREQ antes de cada transmissão, que são feitas durante os *pollings* individuais recebidos. Nesta classe também foi observado um atraso constante e *jitter* zero.

#### 4.8.2.5 - BE

A última classe a ser analisada isoladamente foi o BE, que possui seu gráfico de taxa de transmissão ao longo do tempo apresentado na figura 4.25.

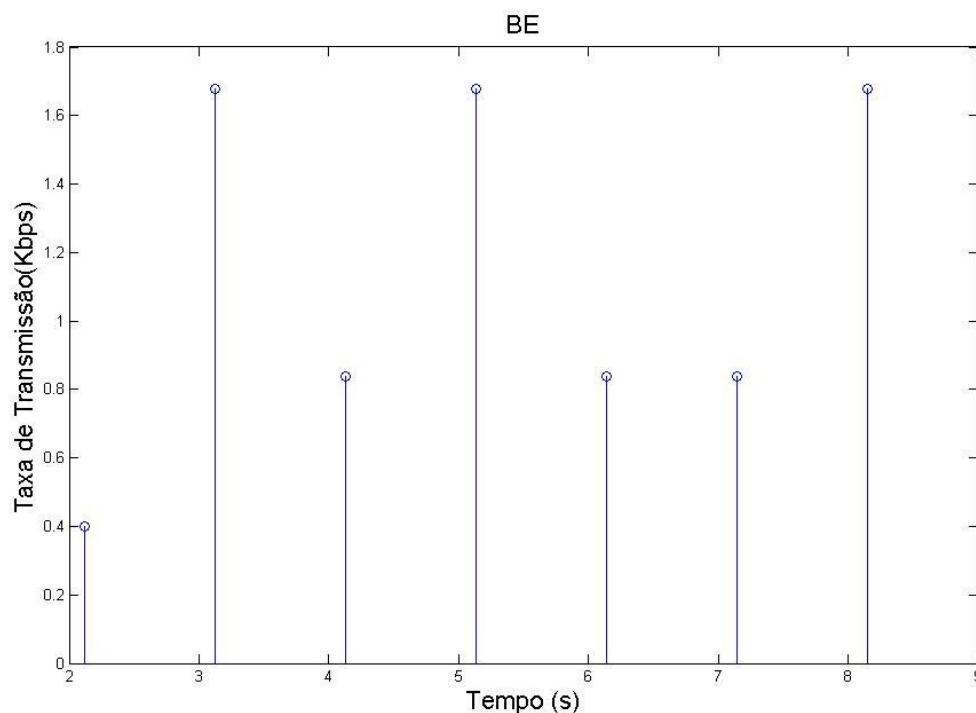


Figura 4.25 – Taxa de transmissão da classe BE

Neste gráfico observamos uma taxa de transmissão também periódica e variável. Como esta classe não possui nenhuma garantia de serviço e suas requisições para transmissão são

feitas por contenção, tipicamente as transmissões não serão periódicas, além do que as taxas de transmissão utilizadas são extremamente pequenas, 0,4 a 1,7kbps, de forma a produzir um modelamento ruim desta classe. No arquivo de saída não foram observadas requisições de banda pela mensagem BWREQ, o que é um erro, e provavelmente ocorreu pela implementação do módulo não utilizar mensagens BWREQ no método de acesso ao meio por contenção. Como em todas as outras classes o atraso foi constante e o jitter zero.

A seguir são apresentadas duas topologias para o cálculo da largura de banda do meio.

### 4.8.3 - Vazão (throughput)

#### 4.8.3.1 - 1º Cenário: 1(um) terminal e 1(uma) Estação Base(BS)

O tráfego do terminal foi definido de forma a congestionar a rede, para que assim fosse encontrada a taxa de transmissão do canal, como pode ser visto na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Variáveis - Cenário 1.

No	Nd	Tt	T0 (s)	Tf (s)	Pkt (B)	Int (s)	Tx(Kbps)
(1)	BS (0)	CBR	0,0	10,0	500	0,0001	39062,50

No – Nó de Origem

Nd – Nó de Destino

Tt – Tipo de Tráfego

T0 – Tempo Inicial

Tf – Tempo Final

Pkt (B) – Pacotes (bytes)

Int (s) – Intervalo de tempo de transmissão dos pacotes em segundos

Tx – Taxa de Envio em Kbps

BS – Estação Base

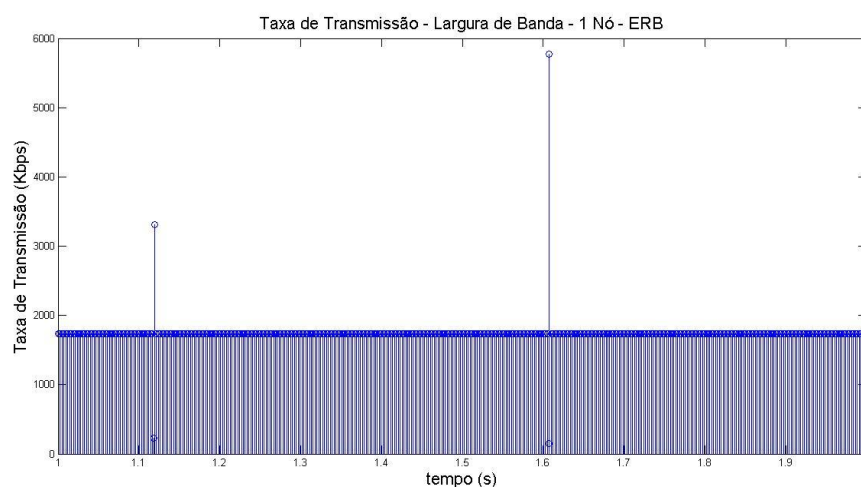


Figura 4.26 – Largura de Banda – 1 Nó – BS

#### 4.8.3.2 - 2º cenário: 5(cinco) terminais e 1(uma) Estação Base

Da mesma forma do primeiro, definiu-se um tráfego com altas taxas de transmissão, no entanto com vários terminais transmitindo ao mesmo tempo ao invés de apenas um, como segue na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Variáveis - Ambiente 2

No	Nd	Tt	T0 (s)	Tf (s)	Pkt (B)	Int (s)	Te(Kbps)
(1)	BS (0)	CBR	0,0	3,0	500	0,001	3906,25
(2)	BS (0)	CBR	0,0	3,0	500	0,001	3906,25
(3)	BS (0)	CBR	0,0	3,0	500	0,001	3906,25
(4)	BS (0)	CBR	0,0	3,0	500	0,001	3906,25
(5)	BS (0)	CBR	0,0	3,0	500	0,001	3906,25

No – Nó de Origem

Nd – Nó de Destino

Tt – Tipo de Tráfego

T0 – Tempo Inicial

Tf – Tempo Final

Pkt (B) – Pacotes (bytes)

Int (s) – Intervalo de tempo de transmissão dos pacotes em segundos

Tx – Taxa de Envio em Kbps

BS – Estação Base

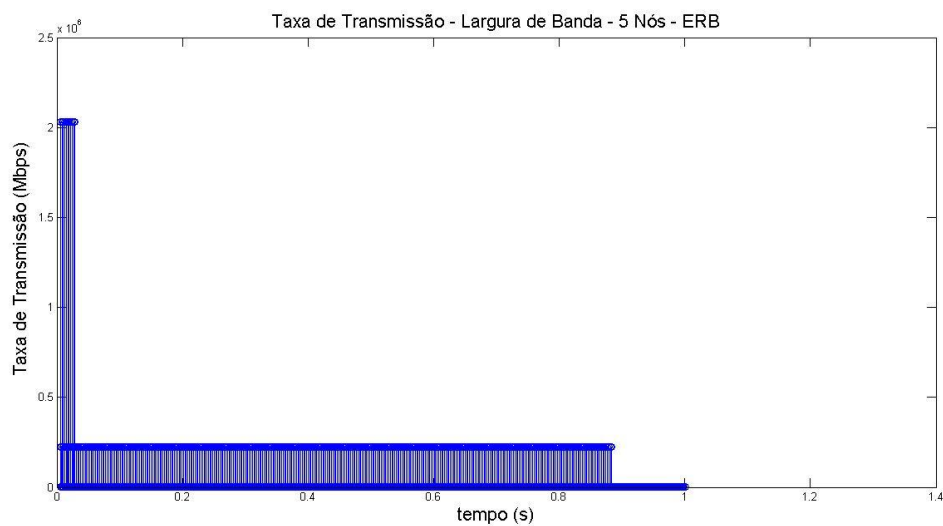


Figura 4.27 – Taxa de Transmissão – 5 Nós – BS

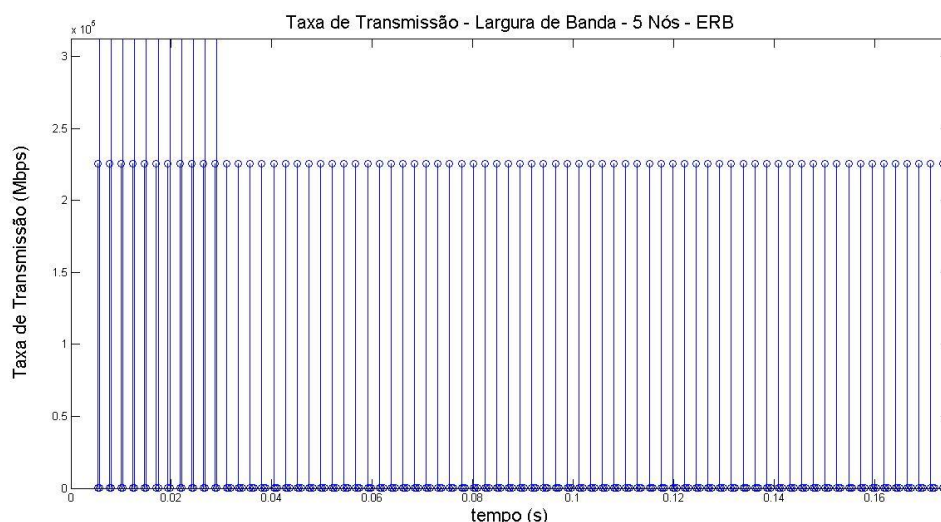


Figura 4.28 – Taxa de Transmissão – 5 Nós – 1 BS – Ampliado

Analisando os resultados gráficos, Figuras 4.28 e 4.29, juntamente com as tabelas, as seguintes análises foram feitas: No primeiro caso, é definido uma taxa de envio de 39,062 Mbps, todavia o nó tem a capacidade de enviar 1,74Mbps, o restante é descartado no processo de envio. Na segunda topologia, cada nó tenta transmitir 3,91Mbps, como já esperado, a transmissão efetiva por terminal é de 1,74Mbps.

Como neste caso tem-se transmissões provenientes de 5 (cinco) terminais, e esses tráfegos chegam a BS em tempos aleatórios que dependem da distância Terminal – BS, muitos intervalos de tempo entre os pacotes recebidos pela BS são extremamente pequenos tornando a taxa de transmissão instantânea muito alta, já que a taxa de transmissão é a taxa de dados dividido pelo intervalo tempo. Esta informação foi obtida a partir de consultas no Excel e Access, como demonstra a Tabela 4.7 além dos gráficos das Figuras 4.27 e 4.28.

Tabela 4.7 – Demonstrativo de Cálculo da Largura de Banda

sentido	nos	tempo	trafego	Bytes	Bps	Kbps	Mbps	Gbps
r	_0_	0,00533642	CBR	1040	1.95E+05	1.52E+03	1.52E+00	1.52E-03
r	_0_	0,00533644	CBR	520	2.89E+10	2.26E+08	2.26E+05	2.26E+02
r	_0_	0,00570444	CBR	520	1.41E+06	1.10E+04	1.10E+01	1.10E-02
r	_0_	0,00570444	CBR	520	2.60E+11	2.03E+09	2.03E+06	2.03E+03
r	_0_	0,00767242	CBR	1040	5.28E+05	4.13E+03	4.13E+00	4.13E-03

A Tabela 4.7 mostra os pacotes recebidos pela BS(Nó 0), o instante de tempo em que esses pacotes são recebidos, o tipo de tráfego, a quantidade de bytes por pacote e a taxa de transmissão instantânea do meio.

Outra informação relevante que cabe a nós mencionarmos é que todo tráfego efetivamente enviado é recebido pelo agente receptor e todo descarte de pacotes ocorre no envio, no próprio nó móvel transmissor. A partir da constatação do recebimento indiscriminado de pacotes, pode-se concluir que esse resultado não condiz com a realidade e se deve a possíveis deficiências no Módulo WiMAX do NDSL [23] e/ou a possibilidades de erros ao implementar a simulação.

Em seguida, sugerimos topologias mais complexas para verificar o funcionamento das classes em paralelo.

#### 4.8.4 - Classes em Paralelo

##### 4.8.4.1 - 3º cenário: 10 (dez) terminais e 1 (uma) Estação Base (BS)

Neste ambiente foi feita a adição de tráfegos que utilizam os mecanismos de QoS. De maneira que cada nó ficasse responsável por um tipo de tráfego, como ilustra a tabela 4.8.

As taxas de transmissão de cada classe já foram definidas na seção 4.8.3.1, logo essas informações foram suprimidas das Tabelas 4.7, 4.8 e 4.9.

Tabela 4.8 - Variáveis - Ambiente 2

No	Nd	Tt	T <sub>0</sub> (s)	T <sub>f</sub> (s)	Pkt (B)	Int (s)	Tx(Kbps)
(1)	BS (0)	UGS	0,0	6,0			
(2)	BS (0)	CBR	3,0	6,0	500	0,0001	39062,50
(3)	BS (0)	CBR	3,0	6,0	300	0,001	2343,75
(4)	BS (0)	rtPS	0,0	6,0			
(4)	BS (0)	nrtPS	0,0	6,0			
(5)	BS (0)	ertPS	0,0	6,0			
(6)	BS (0)	CBR	3,0	6,0	200	0,001	1562,50
(7)	BS (0)	CBR	3,0	6,0	400	0,001	3125,00
(8)	BS (0)	CBR	3,0	6,0	400	0,001	3125,00
(9)	BS (0)	CBR	3,0	6,0	400	0,001	3125,00
(10)	BS (0)	CBR	3,0	6,0	400	0,001	3125,00
BS (0)	(1)	UGS	0,0	6,0			
BS (0)	(5)	BE	0,0	6,0			

No – Nó de Origem

Pkt (B) – Pacotes (bytes)

T<sub>f</sub> – Tempo Final

Nd– Nó de Destino

Int (s) – Intervalo de tempo de transmissão dos pacotes em segundos

Tt – Tipo de Tráfego

Tx – Taxa de Envio em Kbps

T<sub>0</sub> – Tempo Inicial

BS – Estação Base

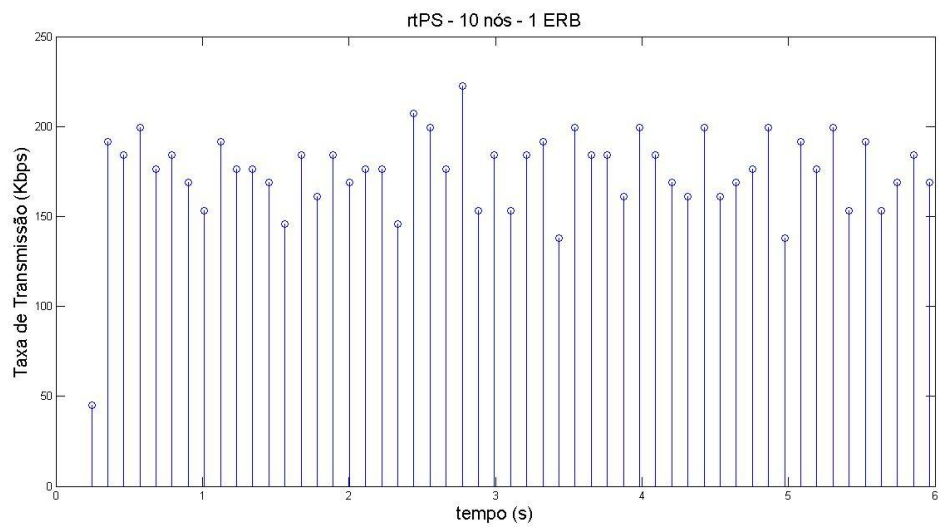


Figura 4.29 – rtPS – 10 Nós – 1 BS

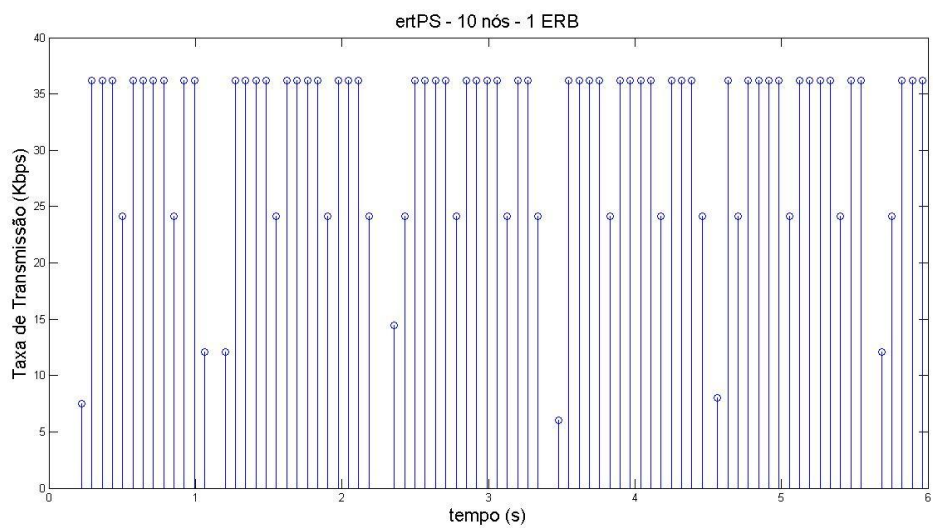


Figura 4.30 – ertPS - 10 Nós - 1 BS

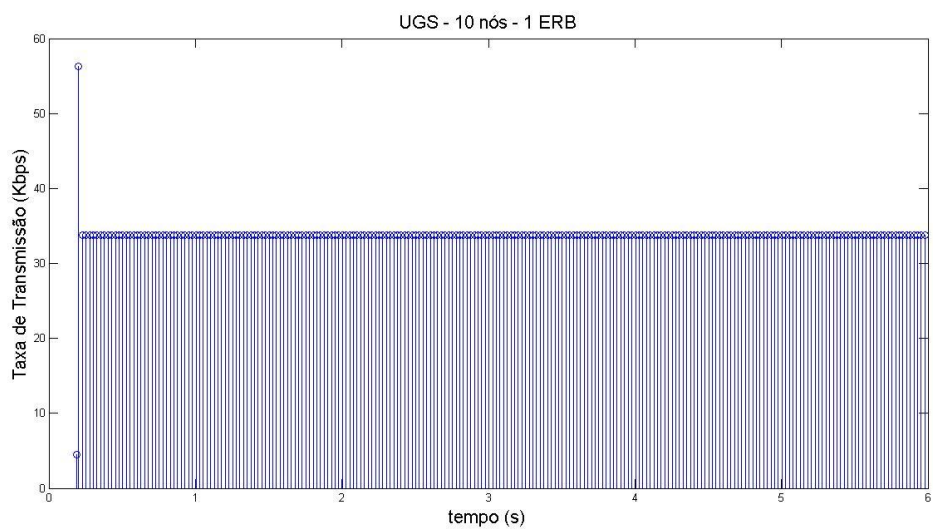


Figura 4.31 – UGS – 10 Nós – 1 BS



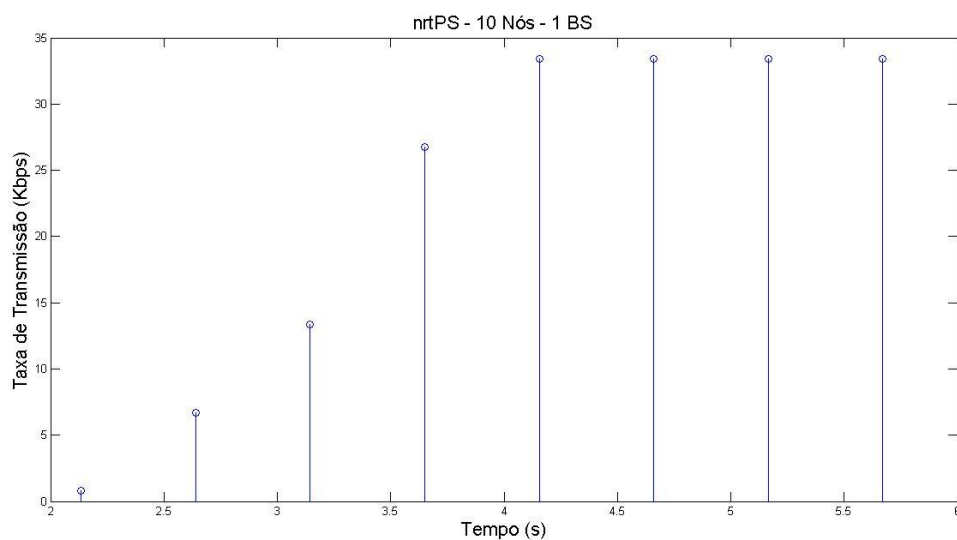


Figura 4.32 – nrtPS – 10 Nós – 1 BS

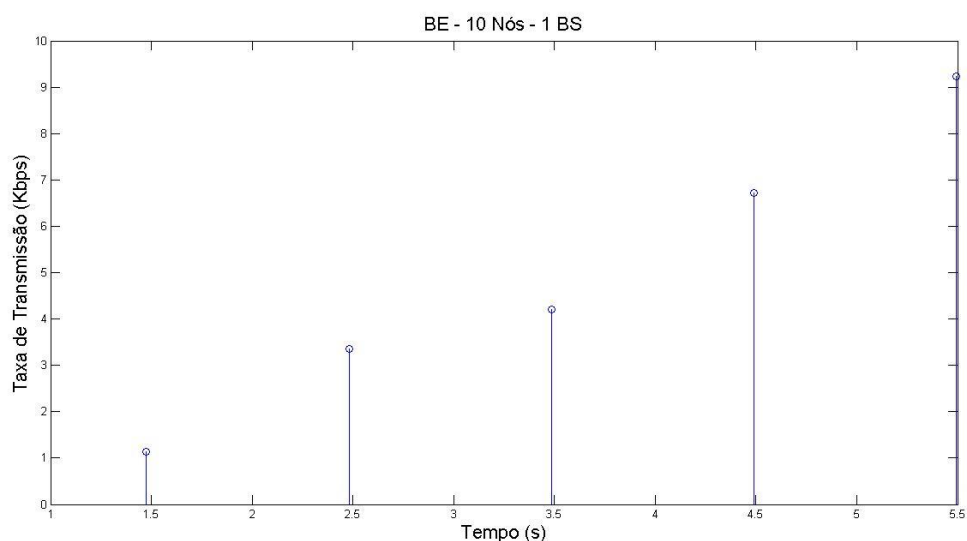


Figura 4.33 – BE – 10 Nós – 1 BS

Como pode ser visto nas Figuras 4.29, 4.30, 4.31, 4.32 e 4.33 os tráfegos UGS, ertPS, rtPS, nrtPS e BE não tiveram seu comportamento alterado significativamente. No caso das classes UGS, ertPS e rtPS, esse era um resultado desejado, no entanto como ficou evidenciado o recebimento indiscriminado de pacotes pela BS, não foi possível corroborar a teoria.

#### 4.8.4.2 - 4º cenário: 1 (um) nó e 1 (uma) Estação Base (BS)

Devido ao problema de largura de banda encontrado, foi proposto um quarto cenário. A Tabela 4.9 ajuda a entender tal topologia.

Tabela 4.9 - Variáveis - Ambiente 2.

No	Nd	Tt	T <sub>0</sub> (s)	T <sub>f</sub> (s)	Pkt (B)	Int (s)	Tx(Kbps)
(1)	BS (0)	rtPS	0,0	6,0			
(1)	BS (0)	UGS	0,0	6,0			
(1)	BS (0)	ertPS	0,0	6,0			
(1)	BS (0)	CBR	3,0	6,0	200	0,001	1562,50
(1)	BS (0)	CBR	3,0	6,0	300	0,001	2343,75
(1)	BS (0)	CBR	3,0	6,0	500	0,001	3906,25

No – Nó de Origem

Nd – Nó de Destino

Tt – Tipo de Tráfego

T<sub>0</sub> – Tempo InicialT<sub>f</sub> – Tempo Final

Pkt (B) – Pacotes (bytes)

Int (s) – Intervalo de tempo de transmissão dos pacotes em segundos

Tx – Taxa de Envio em Kbps

BS – Estação Base

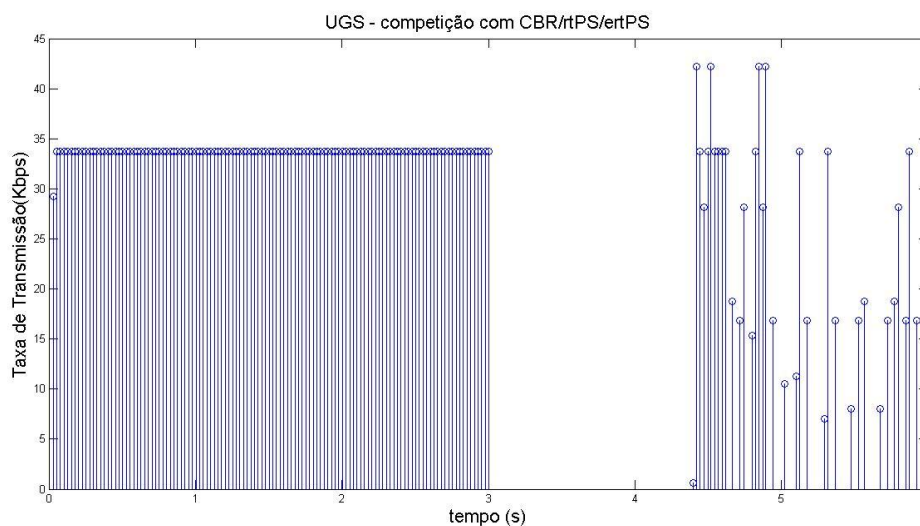


Figura 4.34 – UGS – competição com CBR/rtPS/ertPS

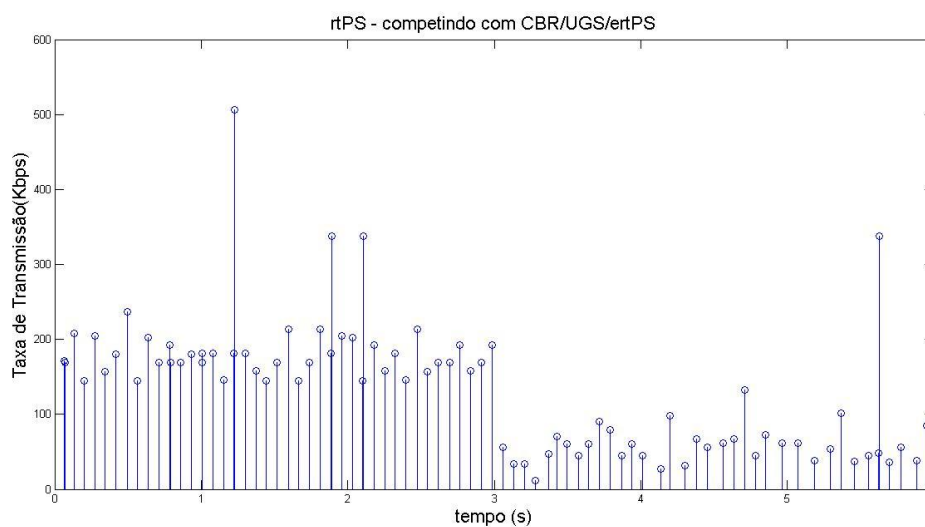


Figura 4.35 – rtPS – competição com CBR/UGS/ertPS

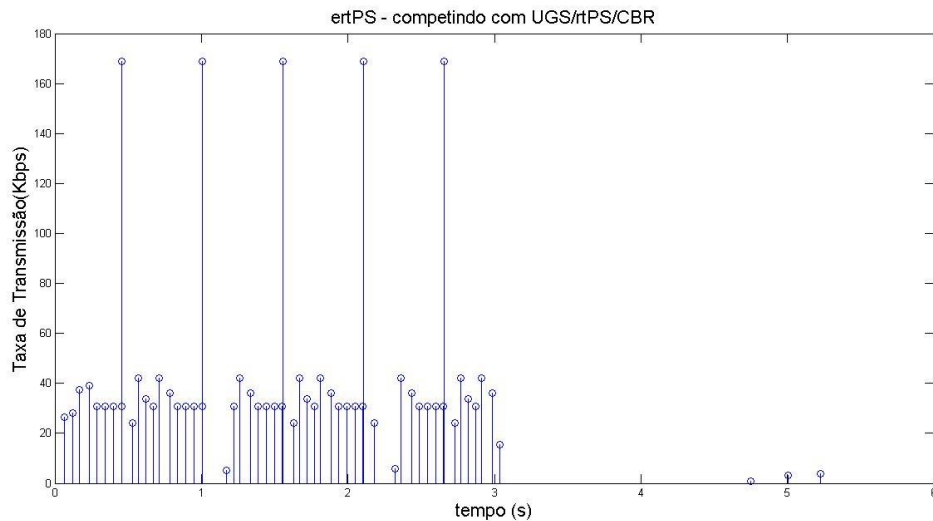


Figura 4.36 – ertPS – competição com CBR/UGS/rtPS

Para a obtenção de um resultado didático, optamos por uma simulação onde os 3 (três) tráfegos críticos (UGS, rtPS e ertPS) começam a ser transmitidos, apenas competindo entre eles e após 3 (três) segundos há a inserção de tráfego CBR, forçando um congestionamento, de modo a verificar o QoS definido pelo padrão IEEE 802.16e [5].

Como pode ser visto nas Figuras 4.34, 4.35 e 4.36, há uma queda drástica em todos os tráfegos críticos. Essa análise está detalhada, a seguir:

**UGS** – Transmite normalmente até o começo do tráfego CBR, logo após a inserção do tráfego fica mais de 1(um) segundo sem conseguir acesso ao meio para transmitir. A partir desta constatação, verificou-se que o UGS não está recebendo um intervalo de tempo periódico para transmissão ao contrário do estipulado pelo padrão IEEE 802.16e [5], ou seja, sendo necessário disputar o acesso ao meio para transmitir.

Quando o tráfego UGS volta a transmitir, inicialmente é obtido um perfil de tráfego parecido com o tráfego anterior a 3(três) segundos, mas a partir do instante de 4,6 segundos, o tráfego começa a variar entre 17 Kbps e 40 Kbps, o que não deveria ocorrer.

**rtPS** – Fica claro a queda no rendimento desta classe, uma vez que ao adicionar o tráfego CBR a sua taxa de transmissão cai pela metade. A causa provável dessa queda é o pedido periódico de requisição de banda (BWREQ). Como não há muita largura de banda

disponível e o nó necessita desta requisição a fim de receber uma concessão, ocorre uma queda na reserva de banda para esta classe.

**ertPS** - É o mais afetado pela adição do novo tráfego. A partir do terceiro segundo, pouquíssimos pacotes são transmitidos por esta classe. Esta drástica queda na banda alocada se deve as requisições de banda que segundo o padrão não deveriam estar sendo feitas, no entanto, sua performance é mais prejudicada do que a do rtPS, o que não deveria estar ocorrendo.

Estes resultados, provavelmente, se devem ao fato do tráfego CBR, utilizado para congestionar a rede, não estar sendo associado a nenhuma das classes de QoS, acarretando em um funcionamento inadequado do módulo, já que esse deve estar definido para trabalhar apenas com suas classes (UGS, rtPS, ertPS, nrtps e BE).

Uma Solução para o problema supracitado seria definir o tráfego BE para transmitir a uma taxa de 1,8 Mbps – de forma a congestionar a rede – e verificar o ocorrido. No entanto, foram encontradas dificuldades na tentativa de mudar a taxa de transmissão da Classe BE.

A obtenção de resultados melhores foi comprometida devido a escassez de documentação sobre o módulo WiMAX do NDSL[23].

## 5 - CONCLUSÃO

As redes sem fio estudadas – Wi-Fi, UMTS e WiMAX – são orientadas a pacotes, sobre o protocolo IP (no caso do UMTS, há também o domínio comutado a circuito). As redes orientadas a pacotes alocam os recursos de rede dinamicamente, baseando-se na necessidade dos nós. Não há garantia que os recursos de rede estarão disponíveis durante toda a sessão, fornecendo uma conexão instável em termos de atraso, largura de banda, entre outras características que tornam essas redes não confiáveis para certas aplicações.

Aplicações estas como serviços de dados críticos, voz e vídeo, que exigem recursos mínimos de rede e não que são garantidos por uma rede do tipo melhor esforço, como é o caso de sistemas orientados a pacotes.

Diante desse cenário, foram apresentados os mecanismos de QoS de cada tecnologia, que surgem para garantir a oferta satisfatória de serviços multimídia.

As três redes sem fio estudadas apresentam características em comum na implementação de QoS. Todas incluem na requisição de acesso ao meio parâmetros capazes de diferenciar os tipos de tráfego de acordo com as necessidades como, por exemplo, taxa mínima de transferência de dados, atraso máximo, *jitter* máximo, etc. Baseado nesses parâmetros, o elemento que provê o acesso ao meio (Ponto de Acesso no Wi-Fi, *Node B*/GGSN no UMTS, Estação Base no WiMAX) é capaz, portanto, de priorizar o acesso de um nó à rede.

Após o estudo teórico de QoS nas redes sem fio, foi realizada a simulação de uma rede WiMAX, utilizando-se do simulador de redes NS2 adicionado do módulo de WiMAX desenvolvido pelo grupo NDSL. Buscava-se validar a teoria, embora os resultados obtidos não corresponderam com os esperados.

Há duas hipóteses para os resultados obtidos não corresponderem com os esperados, que podem ou não estar associadas: possíveis erros na implementação da simulação e/ou deficiências do módulo. A discussão dos problemas ocorreu no Capítulo 5.

Por fim, vale ressaltar que a convergência de serviços sobre IP e a conseqüente demanda por QoS são bastante recentes. QoS em redes sem fio mostra-se como um tema bastante interessante para pesquisas. Diversos elementos da camada de acesso ao meio (MAC) das tecnologias podem ser estudados e melhorados como, por exemplo, os algoritmos do agendador. A simulação de redes (e o simulador de redes livre NS2) mostra-se como uma ferramenta indispensável nessas pesquisas para a melhoria dos mecanismos de QoS.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] “*IEEE 802.11 Official Timelines*”. Acessado em Maio de 2008 no endereço [http://www.ieee802.org/11/Reports/802.11\\_Timelines.htm](http://www.ieee802.org/11/Reports/802.11_Timelines.htm) .
- [2] “*Evolução Anual do Número de Terminais Celulares*”. Acessado em Maio de 2008 no endereço <http://www.teleco.com.br/ncell.asp> .
- [3] “*Portal da Anatel – Notícias*”. Acessado em Junho de 2008 no endereço <http://www.anatel.gov.br/Portal/exibirPortalNoticias.do?acao=carregaNoticia&codigo=16211> .
- [4] Padrão IEEE 802.16d-2004 “*IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems*”.
- [5] Padrão IEEE 802.16e-2005 “*Amendment for Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands*”.
- [6] “*WiMAX in IMT-2000*”. Acessado em Outubro de 2007 no endereço [http://www.wimaxforum.org/technology/WiMAX\\_IMT\\_2000/](http://www.wimaxforum.org/technology/WiMAX_IMT_2000/) .
- [7] Padrão IEEE 802.11e-2005 “*Wireless LAN Medium Access Control (MAC) enhancements for quality of service (QoS)*”.
- [8] Padrão IEEE 802.11 “*Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*”.
- [9] Gast, M. (2005). “*802.11 Wireless Networks The Definitive Guide*”.
- [10] Ramos N., Panigrahi D., Dey S. (2007). “*Dynamic adaptation policies to improve quality of service of real-time multimedia applications in IEEE 802.11e WLAN Networks*”.
- [11] Simsek B., Wolter K. “*Improving the Performance of IEEE 802.11e with an Advanced Scheduling Heuristic*”.
- [12] “*Requirements and objectives of IMT-2000*”. Acessado em Outubro de 2007 no endereço [http://www.wimaxforum.org/technology/WiMAX\\_IMT\\_2000/1079\\_WF\\_Technical\\_rev1\\_Requirements.pdf](http://www.wimaxforum.org/technology/WiMAX_IMT_2000/1079_WF_Technical_rev1_Requirements.pdf) .
- [13] “*Tutoriais Telefonia Celular – UMTS*”. Acessado em Outubro de 2007 no endereço <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialwcdma/Default.asp> .
- [14] Soldani, D., Li, M., Cuny, R (2006). “*QoS and QoE Management in UMTS Cellular Systems*”.

- [15] Gómez, G., Sánchez, R. (2005). “*End-to-End Quality of Service over Cellular Networks*”.
- [16] “WiMAX Technology” – Acessado em Setembro de 2007 no endereço <http://www.wimaxforum.org/technology/>
- [17] “WiMAX Forum White Paper – WiMAX’s technology for LOS and NLOS environments”. Acessado em Outubro de 2007 no endereço <http://www.wimaxforum.org/technology/downloads/WiMAXNLOSgeneral-versionaug04.pdf> .
- [18] “WiMAX Forum” – Acessado em outubro de 2007 em <http://www.wimaxforum.org> .
- [19] “WiMAX Forum White Paper – Second Mobile WiMAX PlugFest White Paper” – Acessado em Outubro de 2007 no endereço [http://www.wimaxforum.org/technology/downloads/2nd\\_Mobile\\_WiMAX\\_PlugFest\\_White\\_Paper.pdf](http://www.wimaxforum.org/technology/downloads/2nd_Mobile_WiMAX_PlugFest_White_Paper.pdf) .
- [20] “WiMAX Forum White Paper – Fixed, nomadic, portable and mobile applications for 802.16-2004 and 802.16e WiMAX networks” Acessado em Outubro de 2007 no endereço [http://www.wimaxforum.org/technology/downloads/Applications\\_for\\_802.16-2004\\_and\\_802.16e\\_WiMAX\\_networks\\_final.pdf](http://www.wimaxforum.org/technology/downloads/Applications_for_802.16-2004_and_802.16e_WiMAX_networks_final.pdf) .
- [21] Nuaymi, L. (2007). “*WiMAX: Technology for Broadband Wireless Access*”
- [22] “*The ns Manual*”. Acessado em Março de 2008 no endereço [http://www.isi.edu/nsnam/ns/doc/ns\\_doc.pdf](http://www.isi.edu/nsnam/ns/doc/ns_doc.pdf) .
- [23] “*WiMAX for NS-2*”. Acessado em Março de 2008 no endereço [http://ndsl.csie.cgu.edu.tw/wimax\\_NS2.php](http://ndsl.csie.cgu.edu.tw/wimax_NS2.php) .
- [24] “*Downloading and installing ns-2*”. Acessado em Março de 2008 no endereço [http://nsnam.isi.edu/nsnam/index.php/Downloading\\_and\\_installing\\_ns-2](http://nsnam.isi.edu/nsnam/index.php/Downloading_and_installing_ns-2) .