

**Universidade Federal do Rio de Janeiro**

**Instituto Tércio Pacitti de Aplicações e  
Pesquisas Computacionais**

**Alexandre Becker Caxero**

Estudo sobre a viabilidade de uso de redes sem fio na rede  
metropolitana da Aeronáutica na área do Galeão

**Rio de Janeiro**

**2013**

**Alexandre Becker Caxero**

**Estudo sobre a viabilidade de uso de redes  
sem fio na rede metropolitana da Aeronáutica  
na área do Galeão**

Monografia apresentada para obtenção do título de Especialista em Gerência de Redes de Computadores no Curso de Pós-Graduação Lato Sensu em Gerência de Redes de Computadores e Tecnologia Internet do Instituto Tércio Pacitti de Aplicações e Pesquisas Computacionais da Universidade Federal do Rio de Janeiro – NCE/UFRJ.

Orientador:

Claudio Miceli de Farias, M.Sc., UFRJ, Brasil

Rio de Janeiro

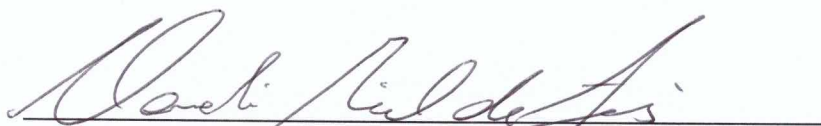
2013

**Alexandre Becker Caxero**

**Estudo sobre a viabilidade de uso de redes sem  
fio na rede metropolitana da Aeronáutica na  
área do Galeão**

Monografia apresentada para obtenção do título de Especialista em Gerência de Redes de Computadores no Curso de Pós-Graduação Lato Sensu em Gerência de Redes de Computadores e Tecnologia Internet do Instituto Tércio Pacitti de Aplicações e Pesquisas Computacionais da Universidade Federal do Rio de Janeiro – NCE/UFRJ.

Aprovada em março de 2013.



Claudio Miceli de Farias, M.Sc., UFRJ, Brasil

Dedico este trabalho primeiramente aos meus queridos e estimados pais, Paulo (*in memorium*) e Hildete, por todos os ensinamentos e incentivos ao longo de minha vida, sem os quais eu certamente não teria feito esse trabalho.

Ao meu querido filho Vitor, o meu maior patrimônio.

A minha amada Simone, pela paciência, incentivo e apoio incondicionais.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus, pois sem Ele nada é possível.

À minha família, pelo carinho, dedicação e apoio inestimável em todos os momentos.

Ao ex-chefe do Centro de Computação da Aeronáutica do Rio de Janeiro, Cel Av João Pedro Martins, que me possibilitou a realização desta especialização.

Ao Comando da Aeronáutica, em especial o Centro de Medicina Aeroespacial e o Centro de Computação da Aeronáutica do Rio de Janeiro, por me darem todo o conhecimento e experiências necessárias para a realização deste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. M. Sc. Claudio Miceli de Farias, pelas palavras de incentivo e elogio, e por acreditar na finalização deste trabalho.

Ao coordenador do programa MOT-CN, Prof. Moacyr Henrique Cruz de Azevedo, pelas cobranças, sempre necessárias, e pela dedicação em conseguir os meios possíveis para o sucesso do curso.

Aos demais professores do Programa MOT-CN, pelos ensinamentos e experiências transmitidas.

Aos companheiros de turma, pelas novas amizades, trabalhos realizados em grupo e pelos momentos de descontração inesquecíveis.

Finalmente, gostaria de expressar minha gratidão a todos que direta ou indiretamente participaram da concretização desta vitória.

## RESUMO

CAXERO, Alexandre Becker. **Estudo sobre a viabilidade de uso de redes sem fio na rede metropolitana da Aeronáutica na área do Galeão**. Monografia (Especialização em Gerência de Redes e Tecnologia Internet). Núcleo de Computação Eletrônica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2013.

A implantação de uma Rede Metropolitana cabeada requer uma grande infraestrutura para a passagem de quilômetros de cabo de fibra ótica que farão a interligação de toda a rede. Como consequência, teremos custos de implantação e manutenção bastante altos, muitas vezes proibitivos. Visando simplificar a instalação, manutenção e diminuir os custos de uma estrutura de rede, surgiram as tecnologias de transmissão de dados sem fios, sendo uma das pioneiras a transmissão por microondas, utilizada para longas distâncias, porém com velocidades bem inferiores à transmissão via cabo. Para as redes locais, temos a tecnologia *wireless*, que permite a conexão sem fios de equipamentos distantes até 100 metros do ponto de distribuição. Várias empresas já estão utilizando esta tecnologia em suas redes locais.

As tecnologias de rede sem fio para longas distâncias vêm sendo constantemente aperfeiçoadas, com o intuito de oferecerem altas taxas de transferências, confiabilidade, disponibilidade, de modo a garantir ao usuário uma Qualidade de Experiência satisfatória no uso dessas tecnologias. Os dois principais padrões nessa área são o WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) e o LTE (*Long Term Evolution*). Ambos prometem oferecer taxas de transmissão próximas a 100 Mbps, segurança, qualidade de serviço e confiabilidade, oferecendo custos de implementação e manutenção mais baixos do que uma rede cabeada.

No âmbito do Comando da Aeronáutica (COMAER) temos a Rede Metropolitana do Galeão, que foi implantada em 2001 utilizando fibra ótica, e realiza comunicação das organizações da Aeronáutica localizadas na área do Galeão com a rede interna corporativa do COMAER, a Intraer. Como o passar dos anos, aconteceram vários problemas em sua infraestrutura cabeada, tais como rompimentos da fibra acidentalmente ou por ação de roedores, obrigando a diversos reparos na estrutura para manter a disponibilidade da rede. Devido a esses fatores, podemos pensar numa solução sem fios para atender essa rede de comunicação.

Nesse trabalho vamos aprofundar no estudo dos padrões WiMAX e LTE, de modo a verificar a viabilidade do uso destas tecnologias na Rede Metropolitana do Galeão.

Palavras chave: WIMAX, LTE, WI-FI, Rede Metropolitana, Intraer.

## ABSTRACT

CAXERO, Alexandre Becker. **Estudo sobre a viabilidade de uso de redes sem fio na rede metropolitana da Aeronáutica na área do Galeão**. Monografia (Especialização em Gerência de Redes e Tecnologia Internet). Núcleo de Computação Eletrônica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2013.

The deployment of a wired metropolitan network requires a large infrastructure for passing miles of fiber optic cable that will interconnect the entire network. As a consequence, we will have costs of deploying and maintaining very high, often prohibitive. Aiming to simplify installation, maintenance and reduce costs and a network structure, emerged technologies transmit data wirelessly, and a pioneer is microwave transmission, used for long distances, but with much lower speeds the transmission by cable. For local networks, we have wireless technology, which allows wireless connection to devices up to 100 meters away from the point of distribution. Several companies are already using this technology in their local networks.

The wireless network technologies for long distances are being constantly improved, with the aim of offering high transfer rates, reliability, availability, to ensure the user a satisfactory Quality of Experience in the use of these technologies. The two main standards in this area are the WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) and LTE (Long Term Evolution). Both promise to offer transmission rates around 100 Mbps, security, quality of service and reliability, providing implementation and maintenance costs lower than a wired network.

Under the Comando da Aeronáutica (COMAER) we have a Galeão Metropolitan Network, which was established in 2001 using optical fiber, and performs communication of Aeronautics organizations located in the area of Galeão with the internal corporate network, the Intraer. As the years passed, there were several problems with your wired infrastructure such as fiber breaks accidentally or by action of rodents, forcing many repairs in structure to maintain network availability. Due to these factors, we can think in a wireless solution for this communication network.

In this paper we deepen the study of WiMAX and LTE standards, so check the viability of using these technologies in the Galeão Metropolitan Network.

Keywords: WIMAX, LTE, WI-FI, Metropolitan Network, Intraer.

## LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1 – Localização das OM da Aeronáutica divididas por áreas	15
Figura 2 – Padrões de Rede Sem Fio	17
Figura 3 – Exemplo de uso de WiMAX fixo	29
Figura 4 – Exemplo de uso de WiMAX móvel	30
Figura 5 – Arquitetura de QoS no padrão 802.16	33
Figura 6 – Frequências utilizadas pelo WiMAX no mundo.	36
Figura 7 – Exemplo de topologia de rede WiMAX	38
Figura 8 – Arquitetura de protocolos da tecnologia WiMAX nas camadas física e de enlace de dados.	39
Figura 9 – Pilha de protocolos do IEEE 802.16	40
Figura 10 – Modulação adaptativa	42
Figura 11 – Evolução das redes digitais	49
Figura 12 – Comparação da arquitetura das redes 3G X LTE	54
Figura 13 – Arquitetura global da rede LTE	54
Figura 14 – Arquitetura básica da rede LTE	56
Figura 15 – Transmissão utilizando OFDMA x SC-FDMA	61
Figura 16 – Utilização da tecnologia MIMO	63
Figura 17 – Pilha de protocolos <i>control plane</i>	64
Figura 18 – Pilha de protocolos <i>user plane</i>	64
Figura 19 – Estrutura da camada 2 para <i>downlink</i>	66
Figura 20 – Estrutura da camada 2 para <i>uplink</i>	66
Figura 21 – Arquitetura de protocolos LTE	70
Figura 22 – Possibilidades de configurações de largura de banda	72
Figura 23 – tráfego de <i>bearers</i> através de diferentes interfaces	74
Figura 24 – Projeção inicial da rede metropolitana	80
Figura 25 – Topologia com 6 antenas utilizando LOS e NLOS	82
Figura 26 – Topologia com 3 antenas clientes	82



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de serviços de QoS	Página 35
Tabela 2 – Comparação das características dos padrões WiMAX e LTE	75

## LISTA DE QUADROS

	Página
Quadro 1 – Especificações técnicas para o padrão 802.16.	25
Quadro 2 – Faixas de frequências do WiMAX e suas características.	37
Quadro 3 – Frequências definidas pelo 3GPP para o LTE	71

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3DES	Triple Data Encryption Standard
3GPP	3 <sup>rd</sup> Generation Partnership Project
ADSL	Asymmetrical Digital Subscriber Line
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
AES	Advanced Encryption Standard
AM	Acknowledged Mode
AMC	Adaptative Modulation and Coding
AMC	Adaptative Modulation Coding
ARP	Allocation and Retention Priority
ARQ	Automatic Repeat Request
ATM	Asynchronous Transfer Mode
BCCH	Broadcast Control Channel
BCH	Broadcast Channel
BE	Best-Effort Service
BS	Base Station
BSPK	Binary Phase Shift Keying
BWA	Broadband Wide Area
CCCH	Common Control Channel
CDMA	Code Division Multiple Access
CID	Connection IDentifier
COMAER	Comando da Aeronáutica
CPE	Customer Premises Equipment
CPS	Common Part Sublayer
CQI	Channel Quality Information
CS	Circuit Switched
CS	Service-Specific Convergence Sublayer
DCCH	Dedicated Control Channel
DFS	Dynamic Frequency Selection
DL-SCH	Downlink Shared Channel
DTCEATM-RJ	Destacamento de Controle do Espaço Aéreo e Telemática do Rio de Janeiro
DTCH	Dedicated Traffic Channel
DVB-H	Digital Video Broadcasting - Handheld
eNodeB/eNB	Enhanced NodeB
EPC	Evolved Packet Core
EPS	Evolved Packet System
ERB	Estações Rádio Base
ERT-VR	Extended Real-Time Variable Rate Service
E-UTRAN	Evolved-Universal Terrestrial Radio Access Network
EVDO	Evolution-Data Optimized
FDD	Frequency Division Duplexing
FDM	Frequency Division Multiplexing
FFT	Fast Fourier Transform
Gbps	Gigabit por segundo
GBR	Guaranteed Bit Rate
GGSN	Gateway GPRS Support Node

GSM	Global System for Mobile
HARQ	Hybrid, Automatic Repeat request
HLR	Home Location Register
HSS	Home Subscriber Server
HUMAN	High-speed Unlicensed Metropolitan Area
IEEE	Institute of Eletrical and Eletronical Engineers
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
IMS	IP Multimedia Subsystem
IMT Advanced	International Mobile Telecommunications-Advanced
IP	Internet Protocol
ITU	International Telecommunications Union
LMDS	Local Multipoint Distribution Service
LOS	Line of Sight
LTE	Long Term Evolution
MAC	Media Access Control
MAN-GL	Rede Metropolitana do Galeão
Mbps	Megabit por segundo
MBR	Maximum Bite Rate
MBSFN	Multicast-Broadcast over a Single Frequency Network
MCCH	Multicast Control Channel
MCH	Multicast Channel
MHz	Mega Hertz
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
MMDS	Multichannel Multipoint Distribution Service
MME	Mobility Management Entity
MPDUs	MAC protocol data unit
MSDUs	MAC Service Data Units
MTCH	Multicast Traffic Channel
NAS	Non Access Stratum
NLOS	Non-Line-of-Sight
nrtPS	Non-Real-Time Polling Services
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OM	Organizações Militares
PAN	Personal Area Networks
PAPR	Peak-to-Average Power Ratio
PBCH	Physical Broadcast Channel
PCCH	Paging Control Channel
PCFICH	Physical Control Format Indicator Channel
PCH	Paging Channel
PDCCH	Physical Downlink Control Channel
PDCP	Packet Data Convergence Protocol
PDN-GW	Packet Data Network Gateway
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel
PDU	Protocol Data Unit
PHICH	Physical Hybrid ARQ Indicator Channel
PHY	Physical Layer
PKMv2	Privacy And Key Management Protocol version 2
PMCH	Physical Multicast Channel
PRACH	Physical Random Access Channel

PS	Packet Switched
PUCCH	Physical Uplink Control Channel
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QCI	QoS Class Identifier
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RACH	Random Access Channel
RLC	Radio Link Control
RNC	Radio Network Controller
ROHC	Robust Header Compression
rtPS	Real-Time Polling Services
SAE	Service Architecture Evolution
SC-FDMA	Single-Carrier Frequency Division Multiplexing Access
SCM	Single Carrier Modulation
SDUs	Service Data Unit
SGSN	Serving GPRS Support Node
S-GW	Serving Gateway
SOFDMA	Scalable Orthogonal Frequency Division Multiple Access
SS	Subscriber Station
TDD	Time Division Duplexing
TDM	Time Division Multiplexing
TDMA	Time Division Multiple Access
TM	Transparent Mode
UE	User Equipment
UGS	Unsolicited Grant Services
UL-SCH	Uplink Shared Channel
UM	Unacknowledged Mode
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
VLAN	Virtual Area Local Network
WAN	Wide Area Network
Wi-Fi	Wireless Fidelity .
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Networks
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network
WRAN	Wireless Regional Area Network

## SUMÁRIO

	Página
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	15
1.1 OBJETIVOS	19
1.2. DETALHAMENTO	19
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	20
<b>2 TECNOLOGIA WI-MAX</b>	22
2.1 INTRODUÇÃO	22
2.2 FAMÍLIA DE PADRÕES IEEE 802.16	24
2.2.1 <b>Padrão IEEE 802.16d</b>	27
2.2.2 <b>Padrão IEEE 802.16e</b>	29
2.3 QUALIDADE DE SERVIÇO (QoS)	30
2.3.1 <b>Requisitos para QoS</b>	32
2.3.2 <b>Tipos de Serviços para QoS</b>	34
2.4 CARACTERÍSTICAS DA TECNOLOGIA WIMAX	36
2.4.1 <b>Faixas de Frequências</b>	36
2.4.2 <b>Topologia da Rede</b>	38
2.4.3 <b>Arquitetura do Protocolo</b>	39
2.4.3.1 Características da Camada Física	41
2.4.3.2 Características da Camada de Acesso ao Meio (MAC)	44
2.4.3.2.1 Subcamada de Convergência	45
2.4.3.2.2 Subcamada da Parte Comum	45
2.4.3.2.3 Subcamada de Segurança	46
2.5 MODULAÇÃO OFDM	47
2.6 MODULAÇÃO OFDMA	47
<b>3 TECNOLOGIA LTE</b>	49
3.1 INTRODUÇÃO	49
3.2 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	52
3.2.1 <b>Arquitetura da Rede</b>	52
3.2.2 <b>Esquemas de Multiplexação</b>	59
3.2.3 <b>Arquitetura de Protocolos</b>	63
3.3 FAIXAS DE FREQUÊNCIAS	70
3.4 QUALIDADE DE SERVIÇO	72
<b>4 ANÁLISE COMPARATIVA</b>	75
<b>5 CONCLUSÃO E ESTUDOS FUTUROS</b>	79
5.1 CONCLUSÃO	79
5.2 ESTUDOS FUTUROS	83
<b>REFERÊNCIAS</b>	84

## 1 INTRODUÇÃO

As redes sem fio surgiram como uma solução a mobilidade e ao acesso remoto, onde é difícil ou muito dispendioso implantar a tradicional infraestrutura de rede. A tecnologia sem fio está sendo cada vez mais utilizada atualmente, o que permite uma troca de informações mais ágil, uma vez que não é mais necessário esperar chegar ao escritório para enviar um email importante ou agendar uma reunião. Estas tarefas podem ser feitas atualmente por celular ou tablet com acesso à internet. Essas funcionalidades garantem mobilidade a custos razoavelmente baixos.

Os padrões atuais de tecnologia de redes sem fio são mostrados na figura 1

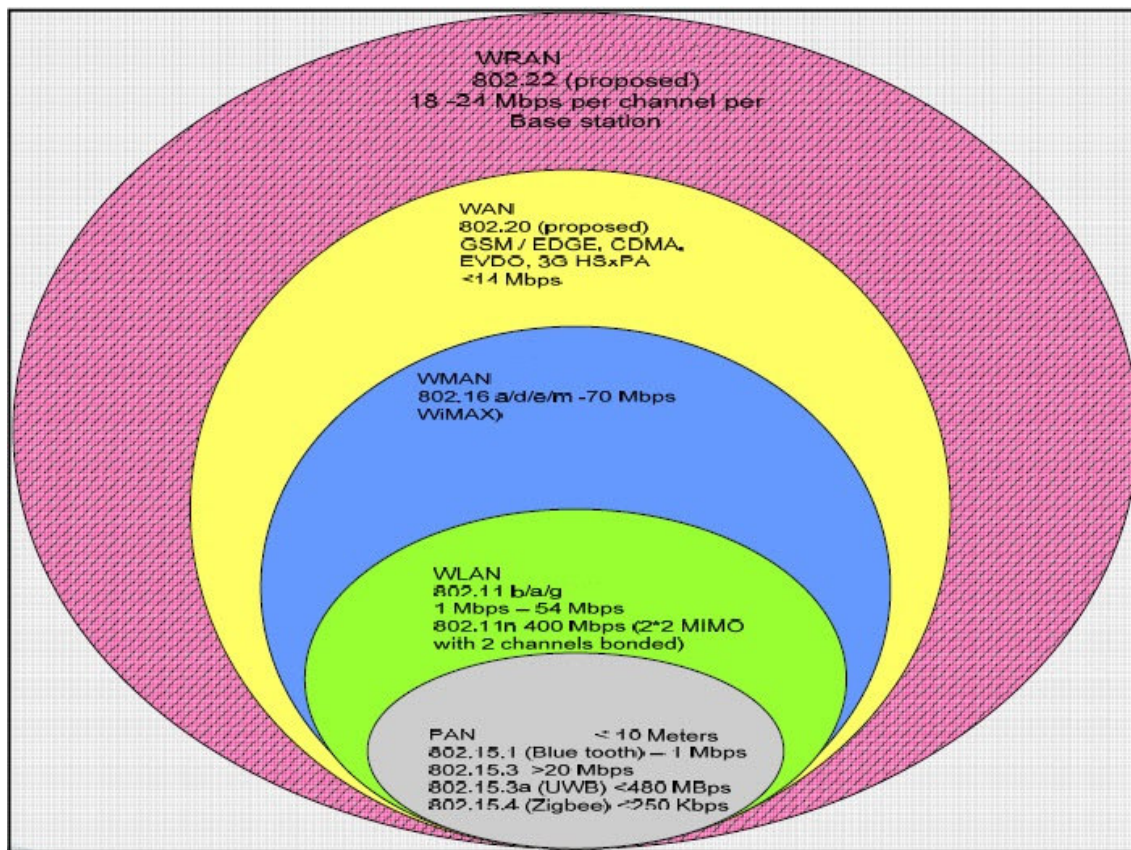


Figura 1. Padrões de Rede Sem Fio

Fonte: <http://www.telecom-cloud.net/category/broadband/>

- PAN (*Personal Area Networks*) – rede sem fio pessoal com alcance de poucos metros e velocidade máxima de 1 Mbps. O *bluetooth* é um exemplo de rede PAN
- WLAN (*Wireless Local Area Networks*) – rede sem fio local com alcance de até 150 metros à velocidades de até 54 Mbps, mais conhecida como rede *Wi-Fi* (*Wireless Fidelity*).
- WMAN (*Wireless Metropolitan Area Network*) – rede sem fio metropolitana, que pode alcançar até 70 Km com velocidades de até 70 Mbps. O padrão WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) é o mais utilizado para rede WMAN.
- WAN (*Wide Area Network*) – rede sem fio projetada para cobrir toda uma cidade. Pode-se dizer que uma rede WAN é constituída por várias redes WMAN.
- WRAN (*Wireless Regional Area Network*) – é um padrão para rede sem fio regional, utilizando espaços do espectro de frequências de televisão não utilizados. Seu principal objetivo é levar o acesso a banda larga em locais distantes com baixa densidade populacional.

A rede sem fio mais conhecida é o Wi-Fi, que já está consolidada no mercado e sua utilização é cada vez mais comum, tanto para uso em residências quanto para uso comercial. Atualmente muitas empresas já usam a tecnologia sem fio para suas redes locais. Porém ainda é amplamente utilizada a infraestrutura cabeada para a interligação de prédios da mesma empresa localizados num mesmo terreno. Sob esta égide as redes que atendem ao padrão WMAN surgem como uma solução para a interligação sem fio para essa situação, e também para tornar o acesso a banda larga sem fio em redes metropolitanas mais amplo e a custos reduzidos.



Nesse cenário, temos a Rede Metropolitana do Galeão (MAN-GL), denominação dada pelo Comando da Aeronáutica (COMAER) para a estrutura de cabeamento em fibra ótica usada para interligar as organizações do COMAER localizadas na Ilha do Governador.

Esta estrutura atende a quatorze Organizações Militares (OM) da Aeronáutica sediadas na área do Galeão, na Ilha do Governador. Para cada organização existe um cabo de fibra ótica monomodo com quatro pares ligando-as até o ponto central, localizado no Destacamento de Controle do Espaço Aéreo e Telemática do Rio de Janeiro (DTCEATM-RJ), no subsolo da torre de controle do Aeroporto Internacional Tom Jobim. A partir do DTCEATM-RJ, as OM são ligadas à Intraer, rede interna do COMAER, que interliga todas as OM da Aeronáutica em todo o Brasil. Dos quatro pares da fibra, apenas um é utilizado para realizar a ligação entre as OM, os outros são reserva.

Podemos dividir em três áreas distintas as organizações atendidas pela MAN-GL, conforme mostra a figura 2:



Figura 2: Localização das OM da Aeronáutica divididas por áreas  
Fonte: Elaboração própria

No total existem aproximadamente 50.000 metros de fibra ótica lançados para atender toda a MAN-GL, passando por diversos lugares passíveis de sofrer ação externa que possam vir a comprometer a integridade da fibra. Para exemplificar, por diversas vezes desde o início de operação da MAN-GL, em meados de 2002, até o ano de 2012, as OM que ficam na área 3, mais distantes do ponto central localizado na área 1, ficaram sem comunicação com a Intraer devido a ações de roedores, obras que romperam fibras mesmo sinalizadas, e até mesmo o corte de um cabo de fibra que passa quase que superficialmente por um jardim, durante serviços de jardinagem. Com o uso cada mais acentuado pelo COMAER de sistemas corporativos de pessoal e pagamento através da Intraer, a falta de comunicação com a rede pode acarretar sérios problemas para os servidores, inclusive a falta de pagamento.

Por esses motivos, diversos reparos já foram feitos nas fibras que atendem essas organizações, tais como fusões, troca de pedaços de cabos, remanejamento de caixas de passagens, entre outras. Como consequência, alguns cabos estão somente com um par, ou no máximo dois, em condições de uso.

Com o constante aperfeiçoamento e aumento da confiabilidade das tecnologias de redes sem fio para regiões metropolitanas, fez-se necessário pensar em utilizar essas tecnologias para atender à Rede Metropolitana do Galeão, de forma a minimizar os custos de manutenção e aumentar a disponibilidade da rede Intraer.

Nesse trabalho vamos conhecer mais sobre as tecnologias que atendem às necessidades de redes metropolitanas sem fio, analisando os fatores mais

importantes para o uso de uma rede sem fio que ofereça aos usuários rapidez, confiabilidade e eficiência a custos menores do que as redes cabeadas.

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo deste estudo é verificar a viabilidade do uso de redes sem fio na Rede Metropolitana do Galeão para atender a 6 organizações localizadas na área 3, tendo em vista o alto custo de manutenção para manter a disponibilidade da infraestrutura atualmente instalada, constantemente atingida por fatores externos. Em consequência, pretende-se ajudar definir a tecnologia que melhor poderá atender ao problema apresentado, observando os requisitos mínimos de velocidade, alcance, confiabilidade, interoperabilidade e taxa de erros para seu funcionamento

## 1.2. DETALHAMENTO

Uma tecnologia que foi projetada para atender as necessidades de uma rede metropolitana sem fio é o WiMAX. Outra tecnologia que poderia também atender a uma WMAN é o LTE (*Long Term Evolution*), mas que foi projetado inicialmente para ser um padrão para a tecnologia 4G de telefonia celular. [ARRUDA, 2011].

O WiMAX é uma tecnologia de banda larga sem fio com abrangência metropolitana, que foi desenvolvida com a finalidade de superar os obstáculos apresentados pelas redes cabeadas. [GOIS, 2008]. O IEEE (*Institute of Electrical and Electronical Engineers*) definiu o padrão 802.16 para especificar as bases da tecnologia WiMAX. Além disso, foi criado um consórcio mundial, o WiMAX Fórum, que tem por objetivo promover globalmente a tecnologia e garantir a interoperabilidade entre os equipamentos.

Em teoria, espera-se que os equipamentos WiMAX tenham alcance de até 50 km e capacidade de banda passante de até 70 Mbps. Na prática, alcance e banda dependerão do equipamento e da frequência usados, bem como da existência ou não de visada, que significa dizer: se a antena de um ponto consegue "ver" a antena de outro, se não há obstáculos no caminho, construções, montanhas, etc. [BOAS, 2007].

O LTE é uma evolução dos padrões de redes móveis como GSM/UMTS e CDMA/EVDO e funciona como uma combinação deles. O LTE estabelecido pela ITU<sup>1</sup> (*International Telecommunications Union*), e definido pela release 8 do 3GPP<sup>2</sup> (*3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project*) é apresentado como um novo padrão para redes de telecomunicações, capaz de transmitir informações a velocidades acima de 150 Mbps. [OLIVEIRA, VILLELA E MIYASHITA, 2012].

Nesse trabalho pretende-se aprofundar no estudo dessas duas tecnologias e realizar comparações de forma a ajudar a definir qual delas poderá atender com mais eficiência e eficácia a MAN-GL.

### 1.3. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

O texto está organizado em capítulos da seguinte maneira:

- No capítulo 2 é feito um estudo sobre a tecnologia WiMAX, suas características, funcionalidades e aplicações;

---

<sup>1</sup> ITU - é uma agência especializada das Nações Unidas, responsável pelas questões de interesse global nas áreas de comunicações e tecnologia da informação.

<sup>2</sup> 3GPP – É um organismo internacional de colaboração entre grupos de telecomunicação conhecidos como parceiros organizacionais. Atualmente são responsáveis pela padronização das tecnologias GSM, GPRS, EDGE e LTE.

- No capítulo 3 é apresentada a tecnologia LTE, verificando se esta tecnologia pode ser utilizada em uma rede metropolitana;
- Será feita uma comparação entre as duas tecnologias no capítulo 4;
- No capítulo 5, são apresentadas a conclusão do trabalho e as sugestões para estudos futuros.

## 2 TECNOLOGIA WI-MAX

### 2.1 INTRODUÇÃO

O WiMAX é uma tecnologia de banda larga sem fio com abrangência metropolitana, que foi desenvolvida com a finalidade de superar os obstáculos apresentados pelas redes de comunicações via cabo, como também pelo padrão Wi-Fi. Além de ser definida pelo padrão IEEE 802.16, é suportada por um consórcio mundial da indústria, cujo objetivo é promover globalmente a tecnologia e garantir a interoperabilidade dos equipamentos, denominado WiMAX Forum.

Em linhas gerais, o padrão WiMAX consiste em estações base que se comunicam com estações clientes, fornecendo conectividade a centenas de assinantes, abrangendo uma área de até 50 km de raio, fornecendo uma velocidade máxima entre 75 e 134 Mbps (*Megabits* por segundo).

O WiMAX é uma solução completa para voz, dados e vídeo com qualidade de serviço (QoS) e segurança, no entanto alguns padrões ainda não estão muito bem definidos. Mesmo assim pode-se prever um grande crescimento desta tecnologia nos próximos anos.

As principais vantagens apresentadas pelo WiMAX são: [GOIS, 2008]

1. Arquitetura flexível: suporta tanto arquiteturas ponto-multiponto como também arquitetura ponto a ponto entre estações rádio-base (ERB) e CPE (*customer premises equipment*);
2. QoS (*quality of service*): conforme acordos entre o provedor de serviço e cada usuário final, os protocolos de QoS são gerenciados e fornecidos pela rede;

3. Serviços de banda larga fixa: a versão 802.16-2004 suporta banda larga fixa equivalente às tecnologias via cabo, porém com a vantagem adicional da mobilidade em baixa velocidade;
4. Banda larga pessoal: a versão 802.16e suporta banda larga portátil e móvel, com múltiplas aplicações de voz sobre IP, dados e vídeos;
5. Mobilidade: a versão 802.16e suporta *handoffs*<sup>3</sup> entre células para usuários deslocando-se a velocidades de até 160 km/h;
6. Interoperabilidade: por ser baseado em padrões IEEE e ser certificado quanto à interoperação por laboratórios selecionados pelo WiMAX Forum, o padrão WiMAX possibilita que um provedor de serviços possa escolher equipamentos de diferentes fabricantes para sua rede;
7. Área de cobertura: o padrão WiMAX tem cobertura teórica de 50 km em níveis inferiores de modulação, com BSPK e QPSK, porém na prática atinge a áreas menores, de aproximadamente 30 Km;
8. Operação NLOS: por ser baseado em tecnologia OFDM, o padrão WiMAX permite operação em condição de ausência de visada direta (as tecnologias wireless MMDS e LMDS não obtiveram sucesso nos Estados Unidos por operarem apenas em condição de visada direta);
9. Grande capacidade: é capaz de propiciar banda de acesso de até 70 Mbps para canais com largura de banda de 20 MHz;
10. Segurança: suporta os protocolos AES (*advanced encryption standard*) e 3DES (*triple data encryption standard*) na interface aérea<sup>4</sup> entre ERB e

---

<sup>3</sup> Handoff: Procedimento empregado em redes sem fio para tratar a transição de uma unidade móvel de uma célula para outra de forma transparente ao utilizador.

<sup>4</sup> Interface aérea: denominação utilizada para definir que o meio de transmissão utilizado é pelo ar. O mesmo que interface ar.

CPE, como também suporte a VLAN (*Virtual Area Local Network*) para proteger os dados de diferentes usuários;

11. Baixo custo: por não utilizar uma estrutura de instalação de cabos apresenta menor custo que as redes cabeadas e existe também a possibilidade de que, com o aumento da demanda, o preço dos equipamentos se torne inferior aos de outras tecnologias celulares;
12. Rapidez de implementação: quando comparada à implementação de infraestruturas cabeadas, o WiMAX oferece rapidez e simplicidade; e
13. Independência de protocolo: pode transportar IP (*Internet Protocol – Protocolo de Internet*), *Ethernet*, ATM (*Asynchronous Transfer Mode – Modo de Transferência Assíncrona*), dentre outros.

## 2.2 FAMÍLIA DE PADRÕES IEEE 802.16

Em dezembro de 2001, dois anos após o início de seu desenvolvimento, foi publicada a primeira versão do padrão 802.16, operando na faixa de frequência de 10 a 66 GHz, em linha de visada (*LOS – Line of Sight*). Entretanto, a necessidade de operar em linha de visada representaria um fator limitante para a adoção da tecnologia, pois dificultaria sua implementação, principalmente em áreas urbanas. [FIGUEIREDO, 2006].

Em 2003, foi aprovada a extensão 802.16a na qual não requereria transmissão com visada, ou seja, utilizando o modo NLOS (*Non-Line-of-Sight*), permitindo o uso de frequências mais baixas entre 2 - 11 GHz, incluindo bandas licenciadas e não licenciadas.



Desde então, novos padrões foram publicados a partir de modificações dos padrões anteriores. No quadro abaixo segue uma breve descrição dos padrões 802.16:

Quadro 1: Especificações técnicas para o padrão 802.16  
 Fonte: <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialwimaxiee802/default.asp>

PADRÃO	CARACTERÍSTICAS
IEEE 802.16	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aprovada em dezembro de 2001.</li> <li>- Faixa de frequência de (10 a 66 GHz).</li> <li>- Operação somente em LOS.</li> <li>- Corresponde à especificação original, projetado para padronizar implementações LMDS.</li> <li>- Especificação de práticas para operação de múltiplos sistemas BWA<sup>5</sup> (<i>Broadband Wide Area</i>).</li> </ul>
IEEE 802.16a	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aprovada em outubro de 2003.</li> <li>- Faixa de frequência licenciada e não - licenciada - 2 a 11 GHz.</li> <li>- Operação em NLOS alcançando 50 km.</li> </ul>
IEEE 802.16b	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Uso de aplicações que permitem acesso à faixa de frequências (5 a 6 GHz) não licenciadas.</li> <li>- Trata aspectos relativos à qualidade de serviço.</li> </ul>
IEEE 802.16c	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aprovada em dezembro de 2002.</li> <li>- Interoperabilidade das frequências até 66 GHz em LOS</li> <li>- Especificação de perfis visando interoperabilidade entre equipamentos de vários fabricantes.</li> </ul>

<sup>5</sup> BWA: denominação dada às tecnologias sem fio que oferecem alta velocidade de acesso à internet ou à uma rede de computadores em uma área ampla.

PADRÃO	CARACTERÍSTICAS
IEEE 802.16d  ou  IEEE 802.16 – 2004	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Publicado em outubro de 2004.</li> <li>- Também chamada de 802.16-2004 ou WiMAX Fixo.</li> <li>- Especificação de regras para interoperabilidade nas frequências até 66 GHz.</li> <li>- Definição de uso de subcanalização.</li> <li>- Suporta arranjos de antenas inteligentes.</li> <li>- Atualização do padrão 802.16 que consolida as revisões dos padrões 802.16a e 802.16c em um único padrão, substituindo o 802.16a como padrão base.</li> <li>- Entre as alterações pode-se destacar a provisão de suporte de antenas MIMO, o que aumenta a confiabilidade do alcance com multipercurso.</li> <li>- Facilita instalações com o uso de antenas indoor.</li> </ul>
IEEE 802.16e	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ratificada em dezembro de 2005.</li> <li>- Também chamada de 802.16-2005 ou WiMAX Móvel.</li> <li>- Incompatível com o WiMAX Fixo.</li> <li>- Faixa de frequência licenciada e não licenciada - 2 a 6 GHz.</li> <li>- Mobilidade até 60 km e controle de potência.</li> <li>- Usa a modulação S-OFDMA.</li> </ul>
IEEE 802.16f	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Publicado em agosto de 2004.</li> <li>- Introduziu conceito de redes em malha.</li> </ul>

PADRÃO	CARACTERÍSTICAS
IEEE 802.16g	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Publicado em agosto de 2004.</li> <li>- Evolução para suporte a mobilidade.</li> </ul>
IEEE 802.16m	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reconhecido em 2010 pela ITU como um das tecnologias de quarta geração de telecomunicações (4G)</li> <li>- Frequência de 20 MHz, utilizando antenas MIMO.</li> <li>- Oferece taxas de até 1 Gbps.</li> </ul>

Atualmente, o WiMAX trabalha com os padrões 802.16d e 802.16e. O primeiro é o padrão de acesso sem fio de banda larga fixa, enquanto o 802.16e, é o padrão de acesso sem fio de banda larga móvel, assegurando conectividade a velocidades acima de 100 Km/h.

### 2.2.1 Padrão IEEE 802.16d

Como informado no quadro 1, este padrão consolidou os padrões 802.16a e 802.16c, tornando-se o padrão base para a tecnologia WiMAX. Este padrão passou a suportar antenas MIMO, aumentando a confiabilidade do alcance de sinais e possibilitando acessos fixos e nômades (comunicação móvel em baixa velocidade). Devido a estas características, alguns autores chamam este padrão de WiMAX fixo e outros de WiMAX *nomádico*<sup>6</sup>.

---

<sup>6</sup> Nomádico: Termo usado para comunicação móvel em baixa velocidade. Também pode ser utilizado o termo Nômade.

O acesso a banda larga sem fio para este padrão suporta topologias ponto-multiponto e malha, e também disponibiliza cobertura de 30 a 40 km em linha de visada e de 8 a 12 km sem linha de visada, podendo operar faixas de frequências com licenciamento (2,5 GHz e 3,5 GHz) e sem licenciamento (5,8 Mhz), podendo atingir uma velocidade de até 70 Mbps.

Outra funcionalidade do WiMAX fixo é a solução de *backhaul* sem fio para pontos de acesso WiFi ou também para redes celulares. [GOIS, 2008]. O *backhaul* sem fio ainda não é muito utilizado, mas a tendência é que esse quadro mude, uma vez que quando utilizado com esta finalidade, o WiMAX apresenta vantagens como capacidade de suportar vários sites, capacidade de futura expansão para possíveis novos serviços e menor custo de implementação. [GOIS, 2008].

As técnicas de modulação suportadas por esse padrão são OFDM (*orthogonal frequency division multiplexing*), com 256 portadoras e OFDMA (*orthogonal frequency division multiple Access*) com até 2048 portadoras, possibilitando modulação adaptativa das subportadoras (QPSK, 16-QAM ou 64-QAM), de acordo com o ruído ou com a distância do transmissor. (RIBEIRO, 2013). A figura 3 mostra o uso do WiMAX fixo.

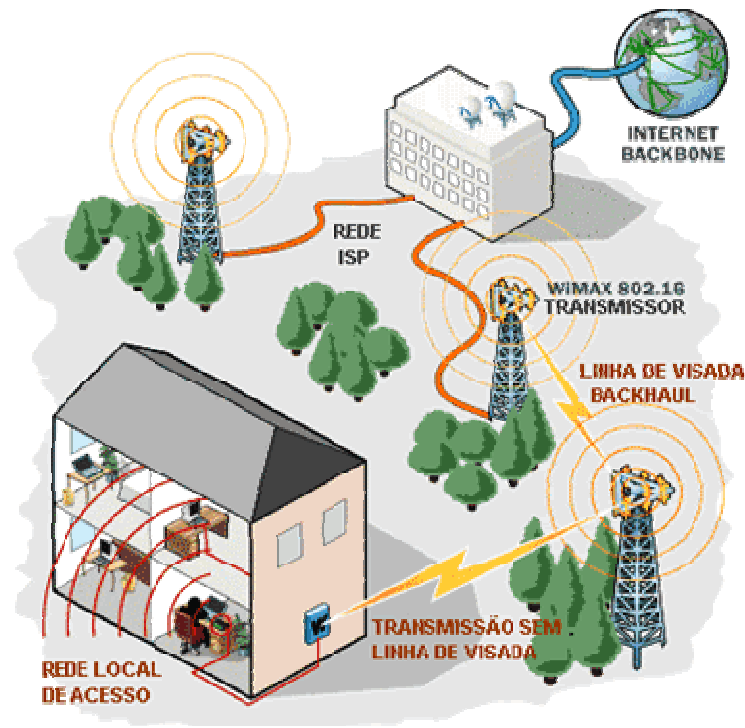


Figura 3: Exemplo de uso de WiMAX fixo  
 Fonte: <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialww2/default.asp>

### 2.2.2 Padrão IEEE 802.16e

Segundo GOIS [2008], o padrão 802.16e foi desenvolvido para suportar acessos portáteis e móveis, permitindo ao usuário total mobilidade, uma vez que permite *handoff* entre as estações durante sessões ativas suportando velocidades de veículos automotores. Devido a esta característica, o 802.16e é chamado de WiMAX móvel.

O padrão suporta a modulação SOFDMA (*scalable orthogonal frequency division multiple Access*), e pode operar utilizando 128, 512, 1024 ou 2048 portadoras, operando na faixa de frequência de 2,5 GHz. A figura 4 exemplifica o uso do WiMAX móvel.



Figura 4: Exemplo de uso de WiMAX móvel  
 Fonte: [http://www.osyon.com/en/hardware/edge-core\\_wireless.php](http://www.osyon.com/en/hardware/edge-core_wireless.php)

### 2.3 QUALIDADE DE SERVIÇO (QoS)

O termo de engenharia de tráfego chamado Qualidade de Serviço (QoS) refere-se a probabilidade da rede de telecomunicação satisfazer a um determinado contrato de tráfego, ou em muitos casos também é utilizado informalmente para referenciar-se a probabilidade de um pacote ser transmitido com sucesso entre dois pontos quaisquer de uma determinada rede.

QoS é o que determina se uma tecnologia sem fio pode conseguir entregar serviços de alto valor, tais como voz e vídeo. Dentre os fatores que mais influenciam para diminuir o QoS, os mais relevantes são *jitter*<sup>7</sup>, latência e perda de pacotes.

Uma característica desejável em uma arquitetura de QoS para redes sem fio é a capacidade de prover aos seus usuários as mesmas garantias de QoS oferecidas atualmente aos usuários de ambientes cabeados. Nessa arquitetura, a Internet, que é uma rede comutada por pacote, terá suas funcionalidades enriquecidas através de ferramentas que viabilizem o tratamento diferenciado dos pacotes. [ENDLER, LIMA E SOARES, 2004]

Um bom exemplo é verificado com o tráfego de tempo real, a transmissão de seus pacotes teria prioridade sobre a das demais categorias de serviço, permitindo que eles chegassem ao seu destino dentro dos limites de retardo requisitados [HAWA, 2003].

A manutenção da qualidade de serviço em redes comutadas por pacote requer mecanismos sofisticados de controle e supervisão (conhecidos como funções de gerenciamento de QoS) para assegurar que os parâmetros de QoS solicitados possam não apenas ser obtidos mas ter a garantia da sua manutenção.

Por ser um meio de natureza inerentemente compartilhada, os ambientes sem fio exigem a adição de um nível extra de complexidade à pilha de protocolos. Quando se fala em redes sem fio, esse novo nível de complexidade é geralmente representado pelo protocolo de controle de acesso ao meio (MAC). A camada MAC sem fio é um dos principais componentes na implementação de mecanismos de

---

<sup>7</sup> Jitter: variação de atraso onde pacotes de uma mesma fonte atingirão o destino com atrasos diferentes.

provisão de QoS. Ela define como a interface aérea deve ser compartilhada entre os usuários em um canal sem fio, tendo dessa forma um impacto significativo no desempenho percebido pelo usuário, na capacidade do sistema e na complexidade no terminal remoto. [ENDLER, LIMA E SOARES, 2004].

A camada MAC do 802.16 tem condições de fornecer um alto volume de serviços em um padrão equivalente aos hoje oferecidos pelos serviços de ADSL (*Asymmetrical Digital Subscriber Line* – Linha Digital Assimétrica de Assinante), *cable modem* e outros, tudo dentro da mesma estação base. De modo a permitir um gerenciamento mais eficiente, o mecanismo de QoS do WiMAX trabalha tanto no sentido de *uplink* como no de *downlink*. [BARCELAR, 2006]

### 2.3.1 Requisitos para QoS

Segundo o padrão IEEE 802.16-2001, as requisições de QoS incluem:

- Função de configuração e registro para pré-configuração da estação do assinante com base nos fluxos de serviço de QoS e parâmetros de tráfego.
- Função de sinalização para o estabelecimento dinâmico de fluxos de serviço com QoS e parâmetros de tráfego.
- Utilização de escalonamento MAC e parâmetros de tráfego de QoS para os fluxos de serviço do *uplink*.
- Utilização de parâmetros de tráfego de QoS para os fluxos de serviço do *downlink*.
- Agrupamento das propriedades de um fluxo de serviço em Classes de Serviço, de modo que as entidades das camadas superiores e as



aplicações externas requisitem os fluxos de serviço de acordo com os parâmetros de QoS desejados, garantindo uma consistência global.

A transferência de pacotes da interface MAC através de um fluxo de serviço especificado por identificadores de conexão (*CID – Connection Identifier*) é o mecanismo mais importante na provisão de QoS. Um fluxo de serviço é um fluxo unidirecional de pacotes ao qual está associado um nível de QoS específico. A estação do assinante (*SS - Subscriber Station*) e a estação base (*BS – Base Station*) garantem a qualidade de serviço de acordo com o conjunto de parâmetros de QoS definidos para o fluxo. A figura 5 mostra a estrutura de QoS no padrão 802.16:

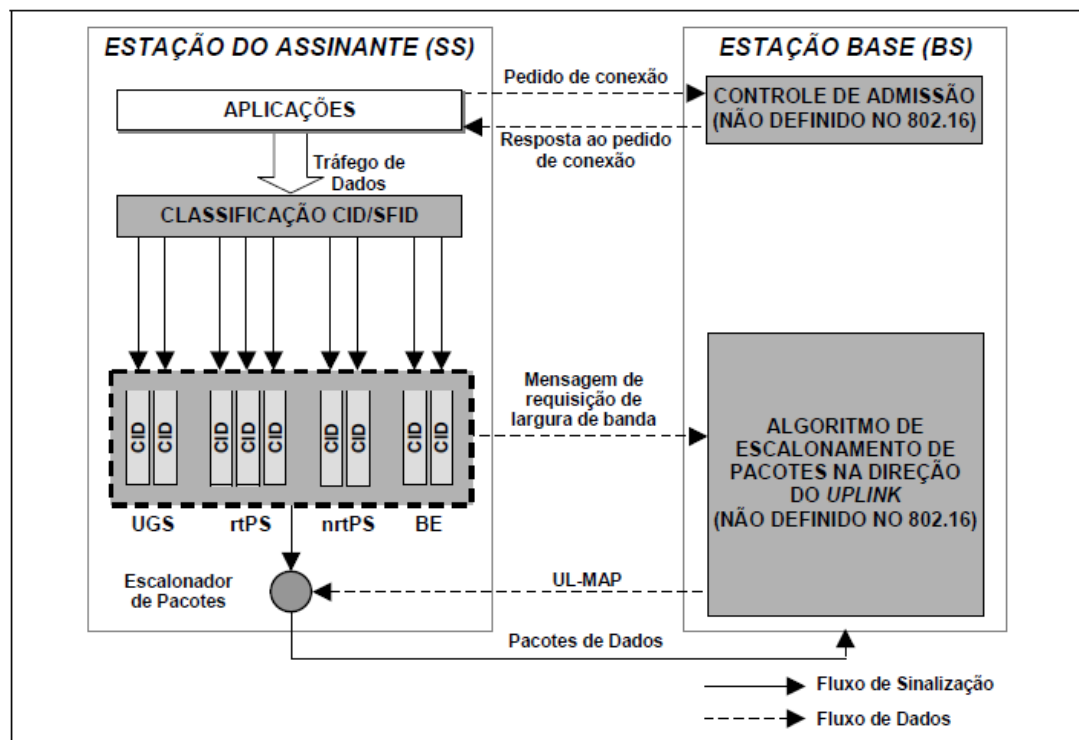


Figura 5: Arquitetura de QoS no padrão 802.16  
Fonte: Endler, Lima e Soares, 2004

O objetivo de se definir parâmetros de QoS é especificar a ordem de transmissão e o escalonamento dos fluxos de serviço na interface aérea. Entretanto, esses parâmetros devem ser identificados e tratados por outros mecanismos na rede (externos a interface aérea) de modo que se possa oferecer QoS fim-a-fim, bem como garantir o policiamento do comportamento das SSs. . [ENDLER, LIMA E SOARES, 2004].

O Wimax implementa o estabelecimento dinâmico de serviços, oferecendo adaptabilidade ao sistema que permite a transmissão dos dados ao utilizar um tipo de serviço mais rápido ou robusto que se adapta a qualidade do link. Esse modelo não permite que recursos da rede sejam usados desnecessariamente, pois ao iniciar um serviço, este somente será ativado quando for utilizado de fato. [BARCELAR, 2006]

### **2.3.2 Tipos de Serviços para QoS**

Os padrões 802.16d e 802.16e foram definidos para suportar 5 tipos de serviços de QoS diferentes, especificados na tabela 1, devendo ser escolhidos e fornecidos de acordo com as necessidades da conexão, uma vez que eles são definidos considerando a prioridade de tráfego, atraso, variação do *jitter*, taxa de dados e taxa de erro. [GOIS, 2008]

Tabela 1: Tipos de serviços de QoS  
 Fonte: Elaboração própria baseado em GOIS, 2008

Serviço	Funcionalidades	Parâmetros
UGS ( <i>Unsolicited Grant Services</i> )	Suporta pacotes de dados com tamanho fixo. Ex.: tráfego CBR ( <i>Constant bit rate</i> ) e transmissões T1/E1 e VoIP.	- máxima taxa de transmissão sustentável; - <i>jitter</i> tolerável; e - política de transmissão.
rtPS ( <i>Real-Time Polling Services</i> )	Suporta fluxo de dados em tempo real que geram pacotes de dados de tamanho variável em intervalos periódicos. Ex.: vídeo MPEG.	- mínima largura de banda reservada; - máxima taxa de transmissão sustentável; e - política de transmissão.
nrtPS ( <i>Non-Real-Time Polling Services</i> )	Suporta fluxos de dados que tem certa tolerância a atrasos, ou seja, serviços que não necessitam ser em tempo real e que geram pacotes de dados de tamanho variável em intervalos periódicos. Ex.: Transferência de arquivos grandes, email, SMS.	- máxima taxa de transmissão sustentável; - prioridade de tráfego; e - política de transmissão.
BE ( <i>Best-Effort Service</i> )	Designado para aplicações que não requerem garantia de integridade dos dados, ou seja, não requerem condições especiais para recuperar dados perdidos ou corrompidos. Ex.: navegação Web.	- máxima taxa de transmissão sustentável; - prioridade de tráfego; e - política de transmissão.
ERT-VR ( <i>Extended Real-Time Variable Rate Service</i> )	Suporta aplicações em tempo real que possuem pacotes de dados com tamanho variável. Ex.: Ex. VoIP com supressão de silêncio <sup>8</sup> .	- mínima largura de banda reservada; - máxima taxa de transmissão sustentável; - <i>jitter</i> tolerável; e - prioridade de tráfego.

<sup>8</sup> Supressão de silêncio: ao invés do transmissor enviar N vezes o dado X, que se repete de modo consecutivo, ele envia a informação N\*X. O receptor interpreta a informação e reproduz N vezes o dado X.

## 2.4 CARACTERÍSTICAS DA TECNOLOGIA WIMAX

### 2.4.1 Faixas de Frequências

Vimos anteriormente que o padrão 802.16 foi originalmente desenvolvido para utilizar faixas de frequências de 10 a 66 GHz em linha de visada. Entretanto, com a necessidade de aperfeiçoamento da tecnologia, outros padrões foram publicados, e novas faixas de frequências entre 2 e 11 GHz passaram a ser utilizadas. Nessa faixa de frequência as estações fixas e móveis podem operar sem a necessidade de linha de visada direta, passando a dar suporte a aplicações ponto-multiponto, o que torna a transmissão mais viável em ambientes urbanos.

Além disso, os padrões 802.16d e 802.16e foram mundialmente regulamentados para operarem em faixas de frequência entre 2 e 11 GHz. [GOIS, 2008]

A figura 6 demonstra as faixas de frequências utilizadas pelo WiMAX no mundo.

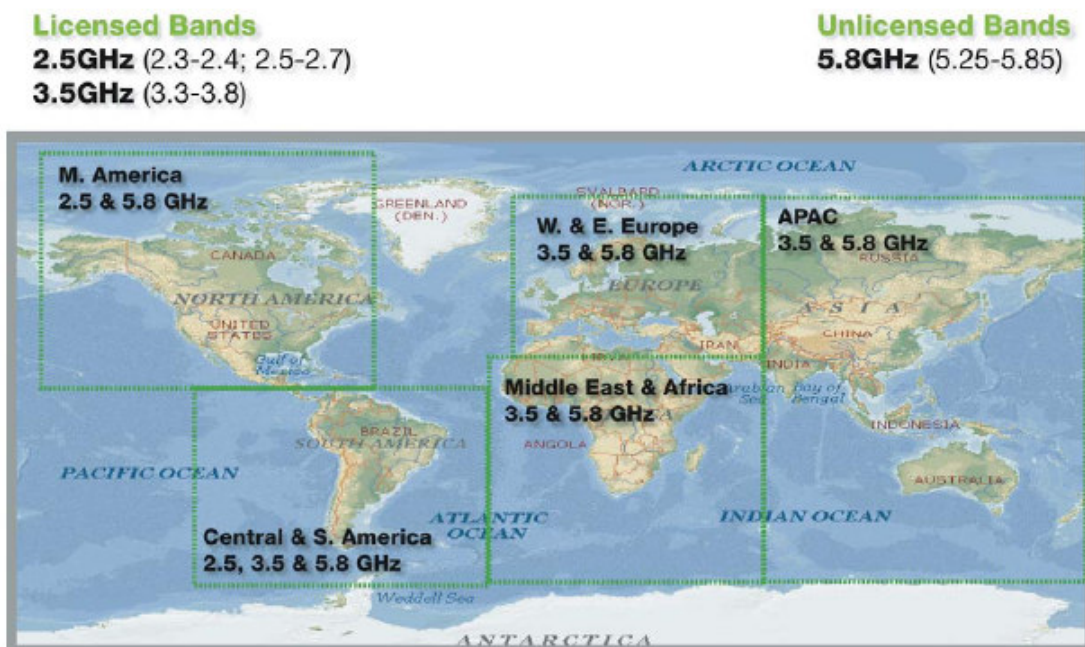


Figura 6: Frequências utilizadas pelo WiMAX no mundo.

Fonte: <http://paginas.fe.up.pt/~ee99207/Tecnologias/WMAN/WIMAX.html>

No quadro 2 apresenta um resumo sintético das faixas de frequências, suas características e recomendações de uso no Brasil.

Quadro 2: Faixas de frequências do WiMAX e suas características.  
Fonte: [http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialredeswimax/pagina\\_3.asp](http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialredeswimax/pagina_3.asp)

Faixa de Frequência	Características
2,5 GHz	<p>Frequência licenciada. Esta é a melhor frequência disponível para WiMAX no Brasil. É a mais baixa, então teremos os melhores alcances, exigindo uma menor quantidade de estações rádio-base para cobrir uma determinada área. Hoje em poder das empresas de MMDS.</p> <p>Alcance com Linha de Visada (LOS) = 18 – 20 km Alcance sem Linha de Visada (NLOS) = 9 – 10 km</p>
3,5 GHz	<p>Frequência licenciada. Esta é a frequência disponível para WiMAX no Brasil, utilizada pelas operadoras e prestadoras de serviço de telecomunicações.</p> <p>Alcance com Linha de Visada (LOS) = 12 – 14 km Alcance sem Linha de Visada (NLOS) = 6 – 7 km</p>
5,8 GHz	<p>Frequência NÃO-licenciada. Esta é a frequência LIVRE disponível para WiMAX no Brasil, podendo ser utilizada por qualquer empresa prestadora de serviços. Por ser não licenciada, existe a possibilidade de interferências e congestionamento de frequências em áreas de grande densidade. É importante, pois não exige gastos com a aquisição de licenças, o que pode viabilizar o plano de negócio de muitas áreas no Brasil.</p> <p>Alcance com Linha de Visada (LOS) = 7 – 8 km Alcance sem Linha de Visada (NLOS) = 3 – 4 km</p>
10,5 GHz	<p>Frequência licenciada. <b>Não existem ainda equipamentos de WiMAX para cobertura desta Frequência.</b> O principal motivo é a necessidade de microcélulas, pois o poder de cobertura em grandes distâncias nesta frequência é baixo.</p> <p>Futuramente poderá se tornar uma alternativa, quando houver um esgotamento de banda em frequências mais baixas e uma proliferação do conceito de WiMAX.</p>

## 2.4.2 Topologia da Rede

A topologia da rede esperada pela utilização da tecnologia WiMAX está ilustrada na figura 7. São definidas as estações base (BS) e as estações dos usuários ou clientes (SS). A BS realiza tanto a interligação entre a rede sem fio e uma rede núcleo (*core network*), como também uma comunicação sem fio entre duas BS (*backhaul*), podendo suportar interfaces IP, ATM, Ethernet ou E1/T1. Os usuários acessam a rede através do estabelecimento de enlaces entre a SS e a BS, formando uma topologia ponto-multiponto. Também ser utilizado a topologia *Mesh* para realizar a comunicação entre uma ou mais SSs, até atingir a BS. Nesse caso, teremos uma rede *multihop*, que representa uma estratégia interessante para expandir a área de cobertura total da rede sem a necessidade de um aumento proporcional do número de BSs, gerando uma economia significativa nos custos de implantação, já que as SSs tem um custo inferior ao das BSs. O WiMAX também pode ser utilizado em conjunto com uma rede *WiFi*, realizando a interligação de *Hot-Spots WiFi*, fornecendo assim acesso aos clientes finais.

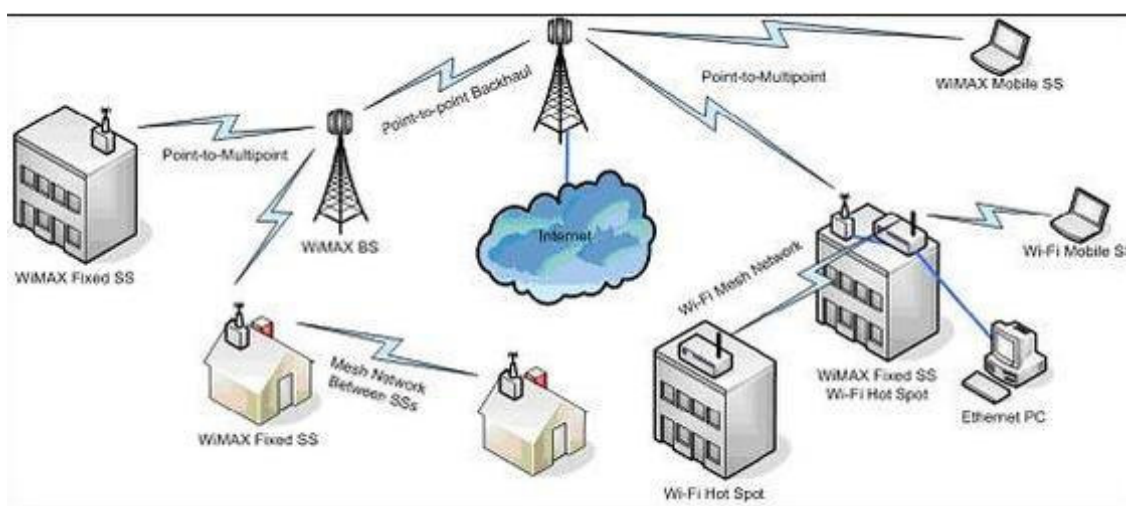


Figura 7: Exemplo de topologia de rede WiMAX  
 Fonte: <http://wiki.sj.ifsc.edu.br/wiki/index.php/Wimax>

### 2.4.3 Arquitetura do Protocolo

Na definição do padrão 802.16 foram especificadas as camadas de enlace de dados e física para as frequências até 66 GHz, conforme a arquitetura de protocolos demonstrada na figura 8.

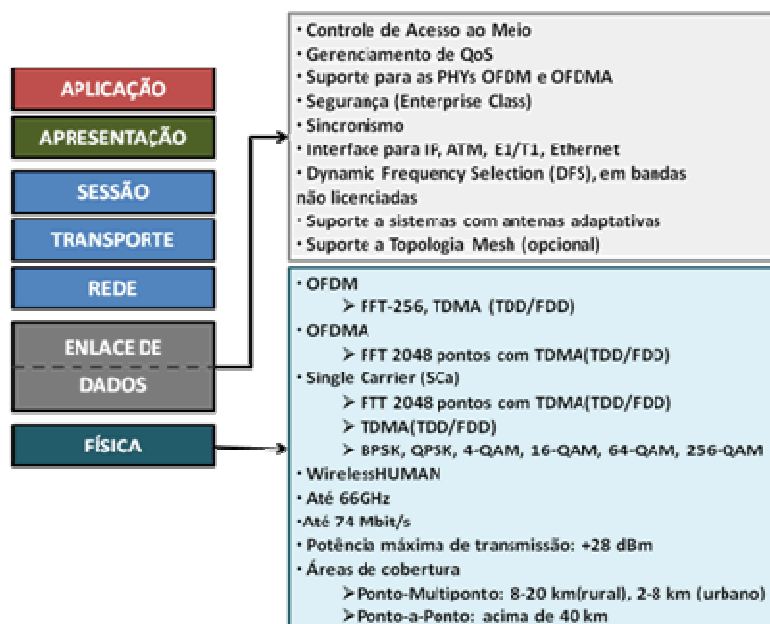


Figura 8: Arquitetura de protocolos da tecnologia WiMAX nas camadas física e de enlace de dados.

Fonte: Figueiredo, 2006

Os protocolos apresentados no padrão IEEE 802.16 podem ser classificados, no modelo OSI, nos níveis Usuário, Controle e Gerencia. Observando a figura 9 é possível notar que existem 2 camadas, MAC (*Medium Access Control* – Controle de Acesso ao Meio) e PHY (*Physical Layer* – Camada Física), onde a camada MAC possui três subcamadas, CS (*Service-Specific Convergence Sublayer* – Subcamada de Convergência Específica), CPS (*Common Part Sublayer* – Subcamada de Convergência Comum) e Subcamada de Segurança (*Security Sublayer*). [SILVA E SOARES, 2009].

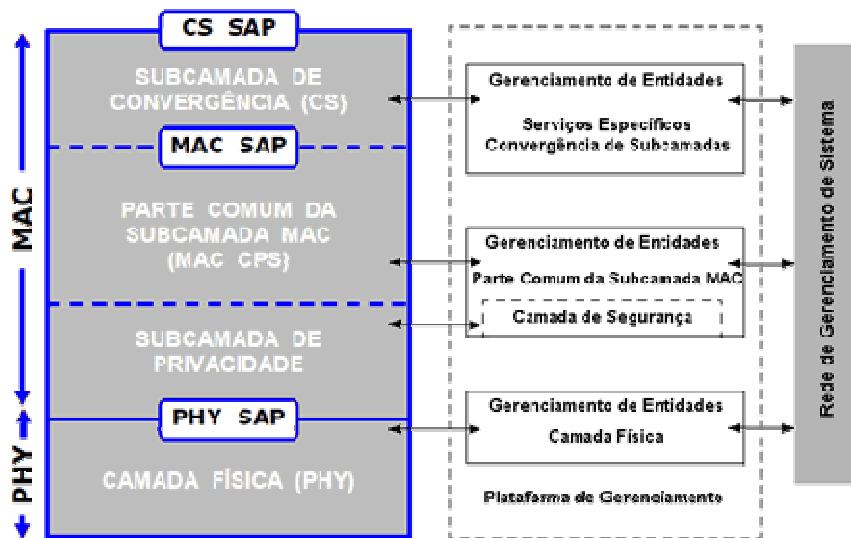


Figura 9: Pilha de protocolos do IEEE 802.16  
 Fonte: IEEE Std 802.16-2001

As subcamadas da camada MAC têm as seguintes funções: [SILVA E SOARES, 2009].

- Subcamada de convergência: Transformação ou mapeamento de dados da rede externa em SDUs (*Service Data Unit*) MAC. (Oferece suporte a ATM – *Asynchronous Transfer Mode* e protocolos baseados em pacotes);
- Parte Comum da Subcamada MAC: Funcionalidade do núcleo MAC do sistema de acesso, alocação de largura de banda, estabelecimento e manutenção de conexão;
- Subcamada de Privacidade: Troca de chaves seguras, criptografia e autenticação;

Nas próximas subseções serão apresentadas as especificações da camada física e da camada MAC definidas no padrão 802.16.



### 2.4.3.1 Características da Camada Física

Como já vimos anteriormente, a versão original do padrão 802.16 foi projetada para operar na faixa de frequência compreendida entre 10 e 66 GHz, o que não permite trabalhar com a propagação NLOS. Devido a esta restrição, foi utilizada a técnica de modulação de portadora única, denominada SCM (*Single Carrier Modulation*), o que deu origem a especificação da interface aérea *WirelessMAN-SC*, que foi projetada para operar em LOS, visando flexibilidade, planejamento, custo, funcionalidade, serviços e capacidade.

O padrão IEEE 802.16 utiliza um sistema de modulação adaptativa utilizando três esquemas de modulação diferentes, de acordo com a distância entre a estação base e o assinante (figura 10). Para assinantes próximos, é usado o 64 QAM<sup>9</sup> (*Quadrature Amplitude Modulation*), com 6 bits/ baud. No caso de assinantes situados a uma distância média, é usado o 16 QAM, com 4 bits/ baud. Para assinantes distantes, é usado o QPSK<sup>10</sup> (*Quadrature Phase Shift Keying*), com 2 bits/ baud. Por exemplo, para um valor típico de 25 Mhz de espectro, o 64 QAM oferece 150 Mbps, o 16 QAM oferece 100 Mbps, e o QPSK oferece 50 Mbps, ou seja, quanto mais distante o assinante estiver em relação à estação base, mais baixa será a taxa de transmissão de dados. [ENDLER, LIMA E SOARES, 2004]

---

<sup>9</sup> QAM: Tipo de modulação que combina técnicas de modulação de amplitude e de fase para aumentar a taxa de transmissão.

<sup>10</sup> QPSK: Tipo de modulação de fase na qual 4 diferentes ângulos (45°, 135°, 225° e 315°), de fase ortogonais são utilizados.

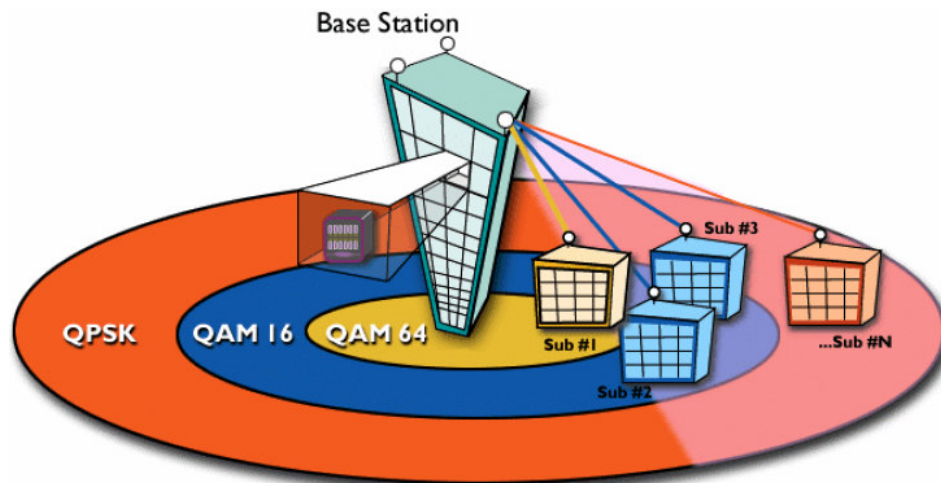


Figura 10: Modulação adaptativa  
Fonte: Marks (2003)

A modulação do sinal também pode ser adequada de acordo com o link. Se o link for de boa qualidade é usado o 64 QAM. Ocorrendo atenuação do sinal a modulação é alterada para 16 QAM, e dependendo do caso, para QPSK, isso com a finalidade de manter a qualidade e estabilidade da conexão. [BARCELAR, 2006].

A multiplexação dos sinais emitidos da estação base para o assinante é realizada por TDM (*Time Division Multiplexing*) e o acesso dos assinantes à estação base é por TDMA (*Time Division Multiple Access*). Para que seja aceitável colocar a banda de modo flexível, são usados dois tipos de multiplexação: a FDD (*Frequency Division Duplexing*) e a TDD (*Time Division Duplexing*). Na FDD, o *uplink* e o *downlink* estão em canais separados, podendo operar simultaneamente, enquanto que na TDD, o canal é dividido, não permitindo a transmissão simultânea. [LIMA, 2006].

Enquanto o TDD utiliza somente um canal de radiofrequência, o FDD utiliza dois canais, sendo utilizado o mesmo na multiplexação do sistema WiMAX. Na TDD, a estação base transmite quadros periodicamente. Os quadros são formados por

slots de tempo, sendo que os primeiros destinam-se ao tráfego *downstream*. Antes dos slots para tráfego *upstream*, existe um tempo de proteção, durante o qual as estações comutam o sentido. Assim sendo, permite estações clientes operando no modo *full-duplex* ou *half-duplex*. Ambas as alternativas, TDD e FDD, oferecem suporte a perfis adaptativos de tráfego em rajada nos quais as opções de modulação e codificação podem ser associadas dinamicamente (*burst by burst*) [EKLUND, 2002].

A necessidade de operação em modo NLOS influenciou fortemente o projeto da camada física do padrão IEEE 802.16a, que opera na faixa de frequência de 2 a 11 GHz. Devido a esta necessidade foi utilizada a modulação OFDM, possibilitando a transmissão de altas taxas de dados mesmo em condições de ausência de visada direta. A partir do padrão IEEE 802.16a foram definidas mais quatro especificações para a interface aérea, além da *WirelessMAN-SC*, para garantir interoperabilidade, as quais são mencionadas a seguir [FIGUEIREDO, 2006] e [GOIS, 2008]:

- *WirelessMAN-SCa*: Foi definida na versão 802.16a, e assim como a interface *WirelessMAN-SC*, utiliza a modulação SCM, porém com o acréscimo de novas funcionalidades para suportar operação sem linhas de visada, incluindo uma estrutura de quadros robusta a multipercurso, estimação e equalização de canal, modulação adaptativa, múltiplos esquemas de codificação, antenas adaptativas, diversidade de transmissão, controle de potência e repetição automática de requisição (ARQ – *Automatic Repeat Request*).
- *WirelessMAN-OFDM*: Sua definição foi finalizada na versão 802.16d e utiliza modulação OFDM com 256 subportadoras, sendo projetada para operações LOS e NLOS. Além das funcionalidades especificadas na *WirelessMAN-SCa*,

suporta topologia *mesh* e subcanalização no enlace reverso, que representam importantes ferramentas para a otimização da cobertura do sistema.

- *WirelessMAN-OFDMA*: Foi definida na especificação da versão 802.16e para ser utilizada em acessos portáteis e móveis, para condições LOS e NLOS em operações ponto-multiponto. A definição inicial desta interface aérea era suportada pela modulação OFDMA com 2048 portadoras, porém foi modificada baseada na técnica de modulação SOFDMA e hoje, dependendo das condições de transmissão, pode possuir 128, 512, 1024 ou 2048 portadoras. Além das funcionalidades especificadas na *WirelessMAN-SCa*, suporta subcanalização nos enlaces direto e reverso.
- *WirelessHUMAN*: Compreende funcionalidades específicas para operação em bandas não licenciadas, sendo por isto denominada HUMAN (*High-speed Unlicensed Metropolitan Area*). Especifica a operação na faixa entre 5 e 6 GHz com base em um esquema flexível de canalização, que inclui canais de 10 e 20 MHz de largura, com espaçamento de 5 MHz. Utiliza seleção de frequência dinâmica (DFS – *Dynamic Frequency Selection*) para detectar e evitar interferências. Nos outros aspectos é similar a interface aérea *WirelessMAN-OFDM*.

#### 2.4.3.2 Características da Camada de Acesso ao Meio (MAC)

O protocolo MAC IEEE 802.16 foi projetado para suportar aplicações de acesso a banda larga sem fio ponto-multiponto. Ele atende à necessidade de altas taxas de transmissão, tanto para *uplink* quanto para *downlink*. Algoritmos para alocação de largura de banda e controle de acesso devem acomodar centenas de

terminais por canal, onde os terminais podem ser compartilhados por vários usuários. Para oferecer suporte a uma variedade de serviços, o MAC 802.16 deve suportar tráfego contínuo e de rajada. Adicionalmente, esses serviços irão associar níveis de QoS de acordo com o tipo de tráfego. Além disso, oferece suporte às várias especificações da camada física, personalizadas para a faixa de frequência em uso, e às regulamentações associadas a mesma [EKLUND, 2002].

Como já mencionado, a camada MAC é dividida em três subcamadas, detalhadas nos próximos subitens:

#### 2.4.3.2.1 Subcamada de Convergência

É a subcamada responsável por transformar e mapear dados externos da rede MSDUs (*MAC Service Data Units*) em pacotes de transmissão no ar MPDUs (*MAC protocol data unit*), e também por fazer o processo contrário, ou seja, transformar MPDUs em MSDUs para sinais recebidos.

Conforme Eklund [2002], esta subcamada permite a alocação de banda, bem como preserva ou ativa o QoS e realiza funções como supressão e reconstrução de cabeçalhos de carga útil, melhorando a eficiência do link aéreo.

#### 2.4.3.2.2 Subcamada da Parte Comum

É responsável por proporcionar a alocação de largura de banda, estabelecimento e manutenção de conexão. Ela recebe os dados das subcamadas de convergência e os classifica em uma conexão particular. Assim, associa parâmetros de QoS e de tráfego, transportando e roteando os dados para uma subcamada de convergência apropriada. [BARCELAR, 2006].

De acordo com Eklund [2002], a fim de facilitar a diferenciação entre parâmetros de tráfego e QoS no *uplink* e *downlink*, as conexões são unidirecionais.

### 2.4.3.2.3 Subcamada de Segurança

Esta subcamada é responsável por assegurar ao usuário privacidade através de cifração (criptografia) e decifração dos dados, prevenindo desta forma acessos não autorizados aos dados transmitidos. Os aspectos de segurança definidos pela subcamada de segurança para o padrão WiMAX são: [GOIS, 2008]

- Suporte a privacidade: os dados são criptografados através da utilização dos protocolos AES ou 3DES garantindo a privacidade dos dados enviados;
- Autenticação: o padrão WiMAX permite flexibilidade de autenticação para evitar acessos não autorizados. Ele utiliza métodos como nome do usuário e senha ou *smartcards* para autenticação de usuários e, para dispositivos que suportam o padrão 802.16, certificados digitais contendo a chave de criptografia e o endereço MAC<sup>11</sup> dos componentes autorizados;
- Protocolo de gerenciamento de chaves de criptografia: o protocolo PKMv2 (*privacy and key management protocol version 2*) é utilizado para transmitir a chave de criptografia da estação base para o usuário com segurança e também renová-la periodicamente, dificultando ainda mais o acesso não autorizado aos dados; e
- Suporte para *handoff* rápido: o padrão WiMAX permite ao usuário uma pré-autenticação para facilitar e acelerar a transição de uma célula para outra a fim de evitar ataques durante a transição.

---

<sup>11</sup> MAC: endereço de 48 bits que identifica os equipamentos das estações clientes

## 2.5 MODULAÇÃO OFDM

A tecnologia WiMAX tem como principal diferencial a operação sem linha de visada. Por isso a técnica de modulação OFDM representa um elemento fundamental para o WiMAX, em razão do alto desempenho alcançado.

O OFDM é uma variação da multiplexação FDM (*Frequency Division Multiplexing*) usada nos sistemas de telefonia e nas tecnologias de acesso como o ADSL e redes *wireless*. É baseada na ideia de dividir um fluxo digital de alta taxa de bits em diversos fluxos digitais de baixas taxas de bits, e posteriormente, modular e transmitir esses fluxos em diferentes portadoras, de forma que elas se tornem ortogonais (linearmente independentes) entre si, para que não haja influencia de uma portadora sobre as outras, tornando praticamente nula a interferência entre portadoras. Elas possuem a mesma amplitude e são transmitidas paralelamente, porém, entre os símbolos OFDM são inseridas portadoras pilotos e banda de guarda. As portadoras pilotos são utilizadas para sincronização e as bandas de guarda são utilizadas para eliminar completamente as interferências, uma vez que possuem duração maior que o tempo de atraso da transmissão de cada símbolo OFDM. [GOIS, 2008].

A modulação OFDM suporta 256 portadoras. Destas, 192 são utilizadas para transmissão de dados, 8 são portadoras pilotos e as restantes são utilizadas como banda de guarda.

## 2.6 MODULAÇÃO OFDMA

A técnica de modulação OFDMA é similar ao OFDM pelo fato de que ele divide as portadoras em várias subportadoras, mas vai um passo além ao agrupar

diversas subportadoras em subcanais. O OFDMA suporta 128, 512, 1048 ou 2048 subportadoras.

Para *downlink* cada subcanal pode ser utilizado por apenas um único usuário, porém para *uplink* cada subcanal pode ser utilizado por diversos usuários. A subcanalização para uplink é também chamada de modulação e codificação adaptativa (AMC – *adaptive modulation na coding*), uma vez que permite que diversos usuários transmitam simultaneamente utilizando um único subcanal utilizando diferentes técnicas de modulação e codificação. Outra vantagem da subcanalização é que ela permite que a potência de transmissão seja adequada à necessidade do usuário, alocando maior potência para usuários distantes da estação base ou em condições críticas de NLOS, e menor potência para usuários próximos da estação base.

O OFDMA escalável (SOFDMA - *Scalable OFDMA*) também permite subcanalização, com a vantagem de possuir a largura do subcanal variável, de 1,25 MHz a 20 MHz, definida de acordo com a necessidade do usuário.



### 3 TECNOLOGIA LTE

#### 3.1 INTRODUÇÃO

A tecnologia LTE é um padrão para comunicação sem fio de alta velocidade para telefones celulares e terminais de dados. Ele é desenvolvido pelo 3GPP, sendo especificado no Release 8 de sua documentação, com pequenas melhorias descritas no Release 9. O LTE é baseado nas redes para telefonia celular 2G (GSM/EDGE) e 3G (UMTS/HSPA) existentes, sendo considerado como uma evolução delas (Figura 11). A principal diferença é que o LTE prioriza tráfego de dados ao invés de tráfego de voz, proporcionando uma rede de dados mais rápida e estável. Com isso espera-se que este padrão seja capaz de absorver eficientemente o crescente volume de dados trafegados pelas redes celulares na atualidade.

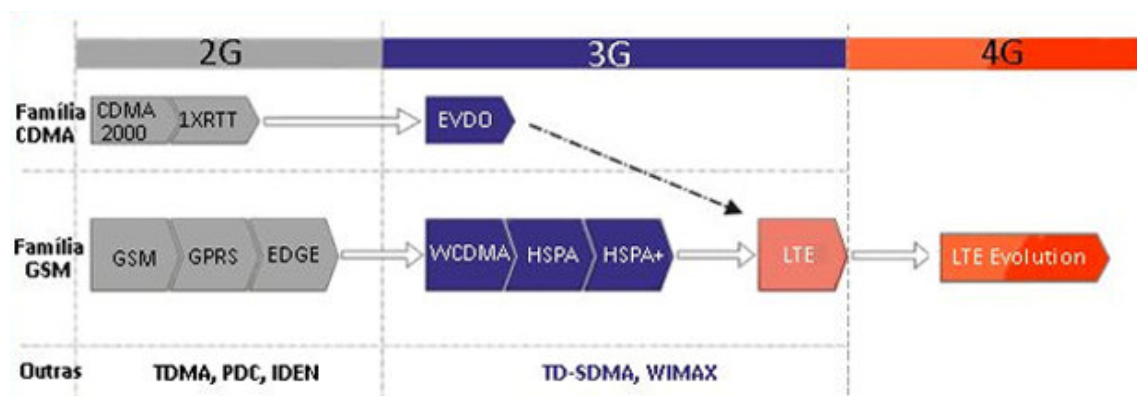


Figura 11: Evolução das redes digitais

Fonte: <http://www.techtudo.com.br/artigos/noticia/2011/06/qual-diferenca-da-rede-3g-para-4g.html>

O LTE traz consigo aspectos relevantes que o tornam o principal sucessor das tecnologias existentes, tais como maior eficiência espectral, redução da latência, taxas de dados elevadas, melhorias de capacidade, de cobertura e redução dos

custos, levando esta tecnologia a uma evolução da interface aérea e de *Core*<sup>12</sup>.

[SANTOS, 2010]

A multiplexação do LTE é baseada na modulação OFDMA para *downlink*, e na SC-FDMA (*Single-Carrier Frequency Division Multiplexing Access*) para *uplink*, com um eficiente suporte a antenas com tecnologia MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*). A arquitetura resultante desta evolução é chamada de EPS (*Evolved Packet System*) e compreende E-UTRAN (*Evolved-Universal Terrestrial Radio Access Network*) para o acesso e EPC (*Evolved Packet Core*) para o *Core* da Rede.

Em testes de laboratório, uma rede experimental utilizando LTE, com 20 MHz de espectro, alcançou velocidades de pico de aproximadamente 300 Mbps para *download* e 75 Mbps de *upload*. Entretanto, a velocidade real de navegação beira aos 100 Mbps de *download* e 50 Mbps de *upload*. O tempo de resposta do LTE é visivelmente mais baixo em relação ao que conhecemos das redes 3G: em condições normais, a latência da rede chega a, no máximo, 30 ms.

O LTE possibilita o tráfego de serviços de comunicações de grandes volumes e altas taxas de dados em conjunto com a facilidade e rapidez de implantação de redes sem fio a baixo custo em comparação com as redes baseadas em cabos.

[SANTOS, 2010]

1. Algumas vantagens da tecnologia LTE são discriminadas abaixo:
2. Altas taxas de transferências: Pode atingir até 100 Mbps de *download* e 50 Mbps de *upload*, utilizando espectro de 20 MHz.

---

<sup>12</sup> Core: Parte central de uma rede de telecomunicações que provê vários serviços aos clientes nela conectados. Também pode ser chamado de núcleo da rede.

3. Latência da rede: a latência da rede, tempo de resposta entre a requisição e o resposta, chega a no máximo 30 ms, podendo atingir até 5 ms para pequenos pacotes IP em condições ideais de transmissão
4. Melhor suporte para mobilidade: Suporta terminais móveis em velocidades de até 350 hm/h, podendo chegar a 500 Km/h dependendo da faixa de frequência.
5. Redução da complexidade do equipamento móvel: Utiliza OFDMA para *downlink* e SC-FDMA no *uplink*, para reduzir o alto PAPR (*Peak-to-Average Power Ratio*) do OFDMA, que encarece os amplificadores e obriga que eles sejam ineficientes, por não poderem apresentar alto ganho.
6. Flexibilidade de espectro: Suporta alocação de espectros de diferentes tamanhos, incluindo 1.25, 1.6, 2.5, 5, 10, 15 e 20 MHz, tanto para *downlink* quanto para *uplink*. Suporta também operações em espectros pareados e não pareados.
7. Melhor alcance: Uma única célula para cobrir uma área de até 100 Km de raio.
8. Utilização de *femtocells*: *Femtocell* é uma célula de pequenas dimensões que pode ser instalada numa casa ou num escritório. Um elevado número destas células serve para aliviar a carga das estações base e permite que todos os dispositivos estejam ligados à rede com máxima eficiência.
9. Alta capacidade: Suporta até 200 acessos simultâneos em 5 MHz de espectro.
10. Arquitetura simplificada: A infraestrutura foi redesenhada visando a desempenho e o aumento do tráfego de dados.

11. Compatibilidade com padrões anteriores: Possui interoperabilidade com os padrões 2G e 3G. Os usuários podem iniciar uma chamada ou transferência de dados em uma área usando um padrão LTE, e caso durante o deslocamento a cobertura não estiver disponível, a operação continuará sem qualquer ação de sua parte, em áreas cobertas por outra tecnologia 2G ou 3G.
12. Suporte para MBSFN<sup>13</sup> (*Multicast-Broadcast over a Single Frequency Network*): Este recurso pode oferecer serviços como TV móvel usando a infraestrutura de LTE, e é um concorrente para a transmissão de TV digital baseada em DVB-H<sup>14</sup> (*Digital Video Broadcasting - Handheld*).

## 3.2 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

### 3.2.1 Arquitetura da Rede

A busca incessante pelo aumento das bandas de transmissão fez com que o 3GPP decidisse que a próxima geração de telefonia móvel seria baseada somente em comutação por pacotes IP, ou PS (*Packet Switched*), ao contrário das redes 2G e 3G atuais, que são baseadas em comutação por circuito, ou CS (*Circuit Switched*). Baseado nessa tendência, inicialmente surgiram duas pesquisas separadas, o programa LTE, com foco no desenho de uma nova arquitetura para a rede de acesso e para a interface aérea, e o programa SAE (*Service Architecture Evolution*), projetada para aumentar o desempenho do *core* da rede, reduzir os custos e facilitar

---

<sup>13</sup> MBSFN: Canal de comunicação definido para o LTE.

a captura de serviços baseados em IP. Posteriormente estes dois programas foram combinados em um único programa, o EPS. A esta altura, a sigla “LTE” já era dominante na literatura e a maioria das publicações se refere ao LTE ao invés do EPS.

Em comparação com as redes 3G, a arquitetura da rede LTE foi simplificada com a eliminação do elemento RNC (*Radio Network Controller*), conforme mostra a figura 12. Além disso, a estação base passou a ser denominada eNodeB (*Enhanced NodeB*) ou *eNB*, para diferenciar da nomenclatura usada na rede 3G (*NodeB*).

Parte das funcionalidades existentes no RNC foram transferidas para o *eNodeB* e parte para o *core* da rede. Com isso, o *eNodeB* assume mais funções, como por exemplo realizar o controle de tráfego na interface aérea, assegurando QoS para os serviços oferecidos, e também trocar informações com outro *eNodeB*, para gerir uma melhor forma de *handover*<sup>15</sup>, entre outras funções.

Esta arquitetura também soluciona o problema de interferência no limite das células, transformando essa interferência em aumento da potência do sinal através da coordenação direta das estações base.

---

<sup>14</sup> DVB-H: Sistema de transmissão de TV digital para dispositivos portáteis.

<sup>15</sup> Handover: O mesmo que handoff. O termo handover é mais utilizado pelo 3GPP, enquanto que o IEEE utiliza o termo handoff.

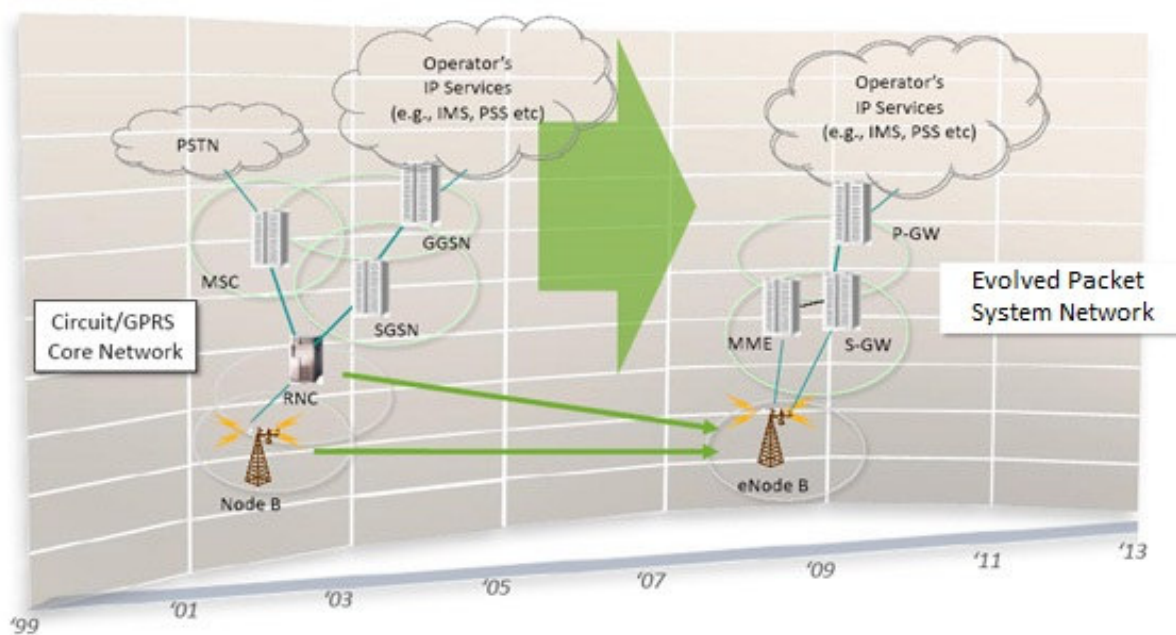


Figura 12: Evolução da arquitetura das redes 3G X LTE  
 Fonte: <http://www.3gpp.org/About-3GPP>

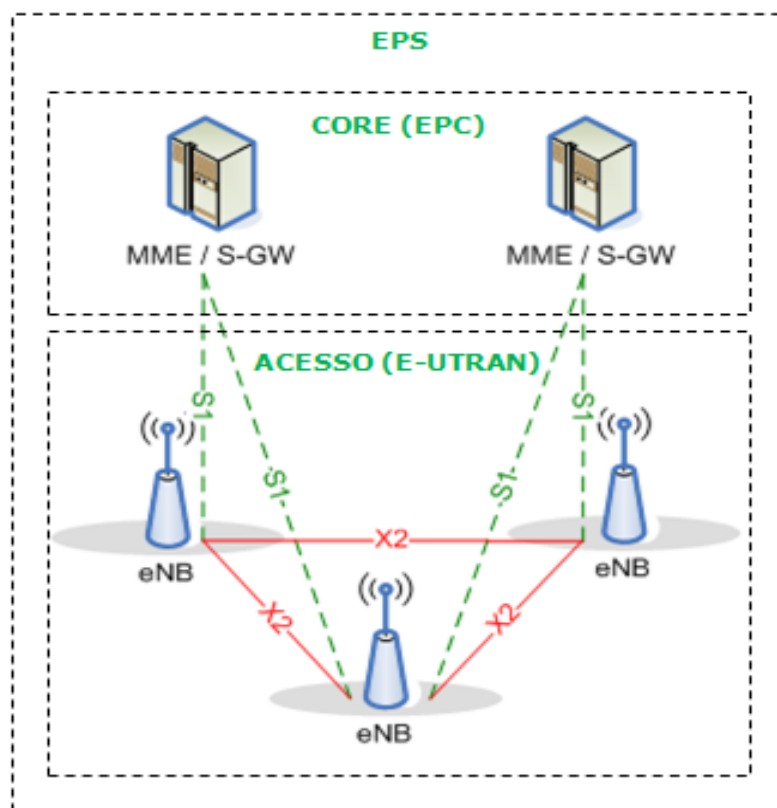


Figura 13: Arquitetura global da rede LTE  
 Fonte: SANTOS,2010

Podemos observar na figura 13 que a arquitetura LTE é composta por dois sistemas:

- EPC: composto pelo MME (Mobility Management Entity) e o pelo S-GW (Serving Gateway), que atuam como o *core* da rede e são responsáveis por tarefas semelhantes às controladas pelo SGSN (*Serving GPRS Support Node*) da rede UMTS;
- E-UTRAN: parte de acesso da rede, composto basicamente pelos *eNodeBs*, sendo as ligações entre eles feitas pela interface X2, enquanto que a interface S1 realiza a ligação entre o EPC e os *eNodeB*.

Antes de falarmos das funções dos componentes da arquitetura, faz-se necessário mostrar o diagrama da estrutura básica de uma rede LTE (figura 14), ressaltando que o MME e o S-GW podem ser implementados no mesmo hardware físico ou podem ser separadas visando uma escalabilidade independente. Quando separadas, a interface S11 realizará a comunicação entre elas.

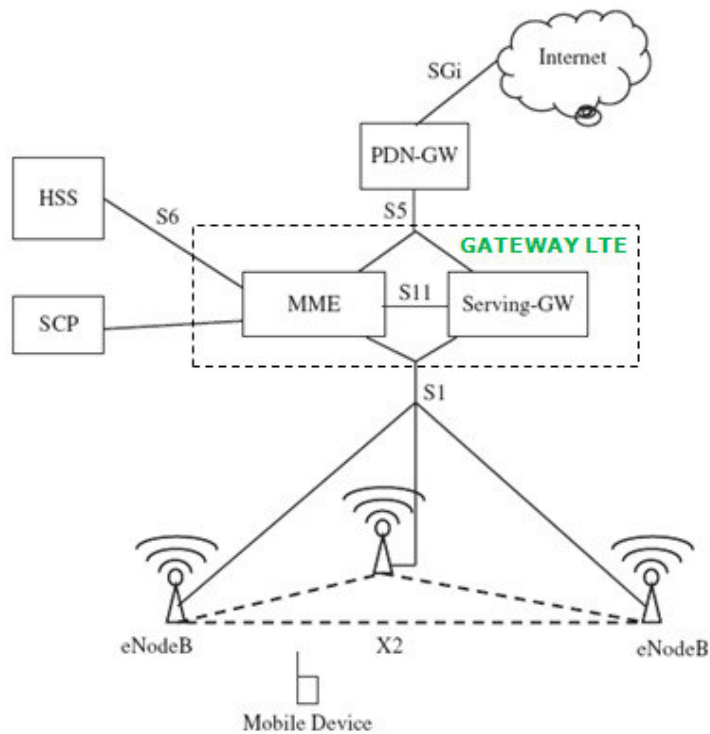


Figura 14: Arquitetura básica da rede LTE.  
Fonte: SANTOS, 2010

MME é a entidade *control plane*<sup>16</sup> responsável pelas seguintes tarefas:

[SAUTER, 2009]

- Mobilidade do usuário e gerenciamento da sinalização, incluindo autenticação, estabelecimento de conexões, suporte a *handover* entre diferentes *eNodeBs* e entre diferentes tecnologias (ex. GSM, UMTS);
- Localização de dispositivos móveis em modo ocioso, ou seja, quando não há troca de pacotes com a rede por um determinado período; e
- Seleção de um gateway de internet quando um dispositivo solicita o estabelecimento de uma sessão, requisitando um endereço IP para a rede.

<sup>16</sup> Control plane: é a parte da arquitetura do roteador utilizado como core da rede que determina o que fazer com os pacotes de entrada, baseado no mapa da rede ou na tabela de roteamento.



O S-GW é o responsável pelo encaminhamento de pacotes IP entre os dispositivos e a internet, funcionando também como âncora entre *handover* entre *eNodeBs* ou entre as tecnologias.

No LTE, o roteador que realiza o acesso com a internet é chamado de PDN-GW (*Packet Data Network*). Ele desempenha as mesmas tarefas que o GGSN (*Gateway GPRS Support Node*) do UMTS. Além de ocultar a mobilidade dos usuários para a internet, ele também gerencia uma faixa de endereços IP, atribuindo endereços para dispositivos e registrando-os com a rede. A quantidade de PDNs em uma rede vai depender do número de usuários, da capacidade de hardware e da quantidade de dados trafegados. A interface que realiza a comunicação entre o PDN-GW é chamada de S5.

Outro elemento essencial da arquitetura LTE, o HSS (*Home Subscriber Server*) é a base de dados que armazena informações de inscrição e fica diretamente ligado ao MME pela interface S6. Essencialmente, o HSS é um HLR (*Home Location Register*) melhorado, que é utilizado pelo UMTS. O HSS é uma base de dados combinada e contém informações de assinatura para GSM, GPRS, UMTS, LTE e IMS<sup>17</sup> (*IP Multimedia Subsystem*).

Uma nova interface X2, foi definida entre *eNodeB*, trabalhando de uma forma entrelaçada (o que significa que todos os *eNodeBs* podem eventualmente estar ligados entre si). O principal objetivo desta interface é minimizar a perda de pacotes devido à mobilidade do usuário (*handover*). Os pacotes não enviados ou não reconhecidos armazenados nas filas *eNodeB* podem ser encaminhados ou “tunelados” para as novas *eNodeB* graças à interface X2.

---

<sup>17</sup> Arquitetura especificada pelo 3GPP para entrega de serviços IP multimídia.

A interface S1 incorporou um conceito denominado S1-flex, que oferece suporte para redundância da rede e compartilhamento de tráfego entre os elementos MME e S-GW, criando *pools* de MMEs e S-GWs, permitindo a cada eNB para ser ligado a múltiplos e MMEs S-GWs em um *pool*. A interface S1, assim como todas as outras interfaces da arquitetura LTE, são totalmente baseadas em IP, visando a comutação por pacotes.

O *eNodeB* hospeda as seguintes funções: [3GPP, 2013]

- Funções para gerenciamento de recursos de rádio: controle de portadora, controle de admissão, controle de mobilidade de conexão, alocação dinâmica de recursos para estações clientes em *uplink* e *downlink* ;
- *Handover* entre os dispositivos móveis utilizando a interface X2;
- Compressão do cabeçalho IP e criptografia de fluxo de dados de usuário;
- Seleção de um MME para associar a uma estação cliente quando o roteamento para um MME não pode ser determinado a partir da informação fornecida pela estação cliente;
- Roteamento de dados ao nível de usuário para o S-GW;
- Programação e transmissão de mensagens de paginação (originado do MME);
- Programação e transmissão de informações de transmissão (originado do MME); e
- Medição e configuração de relatórios de medição para a mobilidade e programação.

### 3.2.2 Esquemas de Multiplexação

Enquanto que a arquitetura da rede LTE é uma evolução das redes 3G, a interface aérea e a rede de rádio foi toda redesenhada. Para a transmissão de dados através da interface aérea, decidiu-se usar um novo esquema de transmissão completamente diferente do utilizado no UMTS.

Em vez de utilizar apenas uma portadora em uma faixa de frequência ampla, decidiu-se usar, para transmissões no sentido *downlink*, o esquema de modulação OFDMA, que como já descrito no capítulo 2.6, divide as portadoras em subportadoras, agrupando-as em subcanais. O número de subportadoras utilizadas pode variar de acordo com a largura de banda disponível no canal. Como muitos bits são transportados em paralelo, a velocidade de transmissão em cada subportadora pode ser muito menor do que a taxa de dados global. Isto é importante em um ambiente de rádio a fim de minimizar o efeito de degradação dos diversos caminhos criados por tempos de chegada ligeiramente diferentes do sinal a partir de direções diferentes.

A segunda razão pelo qual esta abordagem foi escolhida deve-se ao fato de que o efeito de degradação e a propagação de atraso tornam-se independentes da largura de banda utilizada para o canal. Isto acontece porque a largura de banda de cada subportadora permanece o mesmo e apenas o número de subportadoras é alterado. [SAUTER, 2009]

Para a transmissão de dados na direção do *uplink*, o 3GPP escolheu um esquema de modulação um pouco diferente. A transmissão OFDMA possui alto PAPR, o que teria consequências negativas na concepção de um transmissor incorporado em um dispositivo móvel, ou seja, durante a transmissão de dados a

partir de um dispositivo móvel para a rede, um amplificador de potência é necessário para aumentar o sinal de saída a um nível suficientemente elevado para ser capturado pela rede. O amplificador de potência é um dos maiores consumidores de energia de um dispositivo e deve, portanto, ser tão eficiente em termos de energia quanto possível para aumentar a vida útil da bateria do dispositivo. A eficiência de um amplificador de potência depende de dois fatores:

- O amplificador tem de ser capaz de amplificar o mais alto valor de pico da onda, e é esse valor que determina o consumo de energia do amplificador; e
- Os picos de onda, no entanto, não transportam informação maior do que a potência média do sinal ao longo do tempo. A velocidade de transmissão, por conseguinte, não depende da potência necessária para obter os valores de pico da onda, mas sim do nível de potência média.

Como o consumo de energia e velocidade de transmissão são de muita importância para os projetistas de dispositivos móveis, o amplificador de potência deve consumir o mínimo de energia possível. Assim, a menor diferença entre o PAPR mais longo é o tempo de operação de um dispositivo móvel com uma velocidade de transmissão determinada em comparação com os dispositivos que utilizam um esquema de modulação com um maior PAPR.

Um esquema de modulação semelhante ao OFDMA, mas com um PAPR mais baixo, é o SC-FDMA. Devido ao seu melhor PAPR, o 3GPP optou por esse esquema para realizar transmissões no sentido *uplink*. Apesar do que o nome

sugere, o SC-FDMA também utiliza subportadoras para realizar a transmissão de dados através da interface aérea, mas adiciona um passo a mais no processamento. Em vez de colocar 2, 4 ou 6 bits em conjunto para formar o sinal para uma subportadora, como no OFDMA, o bloco de processamento adicional em SC-FDMA espalha a informação de cada bit sobre todas as subportadoras.

Como exemplo, podemos observar a figura 15, onde no OFDMA os quatro símbolos QPSK são transmitidos paralelamente, sendo um em cada subportadora, e no SC-FDMA os quatro símbolos são transmitidos em série em quatro tempos distintos. No OFDMA, cada subportadora carrega somente informações de um símbolo específico enquanto que no SC-FDMA, cada subportadora contém informações de todos os símbolos transmitidos. [SANTOS, 2010]

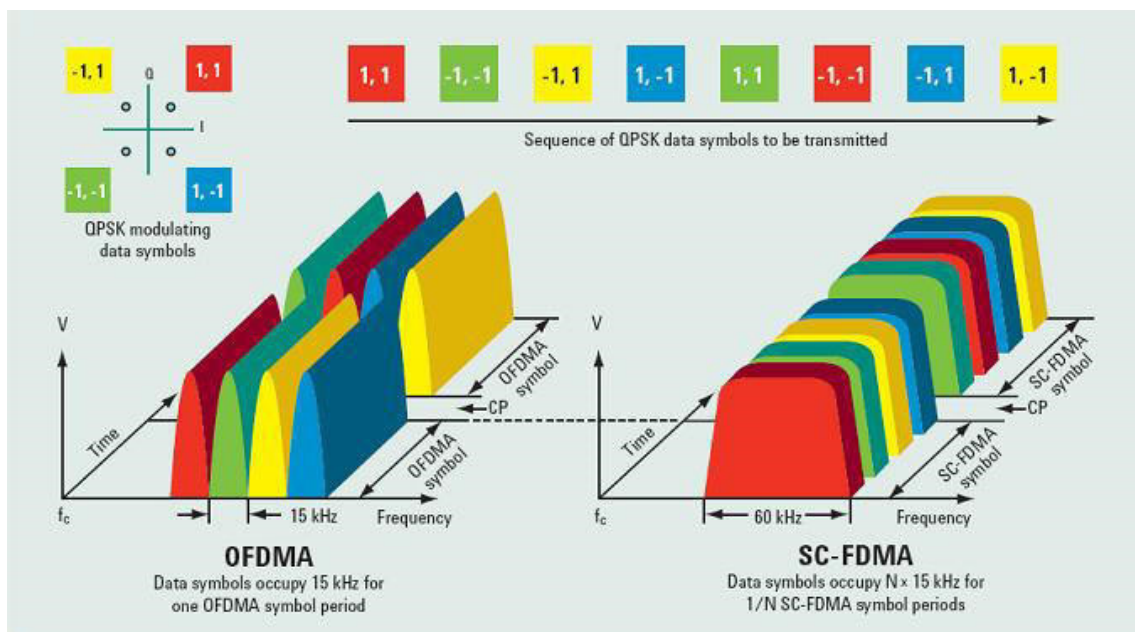


Figura 15 – Transmissão utilizando OFDMA x SC-FDMA.

Fonte: Santos, 2010

As principais diferenças entre OFDMA e SC-FDMA podem ser resumidas da seguinte forma:

No OFDMA são formados grupos de input de bits (0's e 1's) para montar as subportadoras que são processadas com IFFT<sup>18</sup> (*Inverse Fast Fourier Transform*) para se obter um sinal no tempo. No SC-FDMA primeiro se tem uma FFT<sup>19</sup> (*Fast Fourier Transform*) sobre grupos de input para espalhar sobre todas subportadoras, e em seguida usar o resultado no IFFT que cria o sinal no tempo. Este é o motivo que por vezes o SC-FDMA é referido como FFT espalhado OFDM. [SAUTER, 2009]

Para que se alcance toda essa eficiência na transmissão de dados na interface aérea, devem ser utilizadas antenas com a tecnologia MIMO, capazes de oferecer ganhos significativos nas taxas de dados sem a necessidade de utilizar mais banda ou potência adicional para a transmissão dos sinais.

A comunicação sem fio com a utilização desta tecnologia tira proveito da propagação de multipercurso para aumentar a taxa de transmissão e o alcance, ou reduzir as taxas de erro por bit (eficiência espectral), através do envio e recebimento de mais de um sinal no mesmo canal ao mesmo tempo, ao invés de tentar eliminar os efeitos da propagação de multipercurso. [SANTOS, 2009].

---

<sup>18</sup> IFFT: Função matemática usada no emissor que transforma o diagrama de frequência em diagrama de tempo.

<sup>19</sup> FFT: Função que realiza o processo inverso do IFFT no receptor.

A figura 16 ilustra a transmissão e recepção dos dados com MIMO.

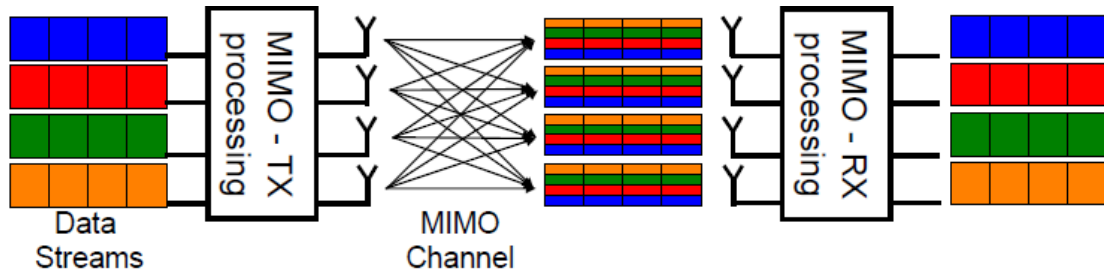


Figura 16: Utilização da tecnologia MIMO  
Fonte: Santos, 2009

### 3.2.3 Arquitetura de Protocolos

O projeto do LTE é completamente baseado em canais compartilhados e de broadcast, não havendo mais nenhum canal dedicado para trafegar dados a usuários específicos. Esta escolha aumenta a eficiência da interface aérea, fazendo com que a rede seja capaz de controlar a utilização dos seus recursos, de acordo com a demanda de cada usuário em tempo real, não existindo mais a necessidade de alocação de recursos fixos para cada usuário, independente dos requisitos necessários. O LTE utiliza pilhas de protocolo distintas para *control plane* e *user plane*<sup>20</sup>, conforme demonstrado nas figuras 17 e 18.

<sup>20</sup> User plane: denominação usada para indicar o tráfego de pacotes ao nível do usuário.

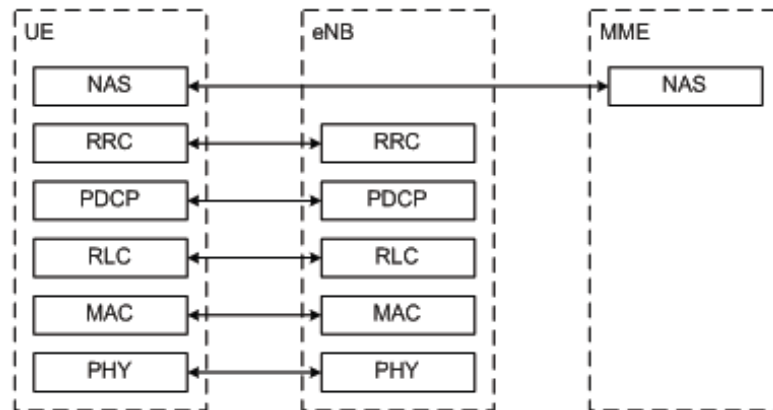


Figura 17: Pilha de protocolos *control plane*  
Fonte: Motorola, 2007

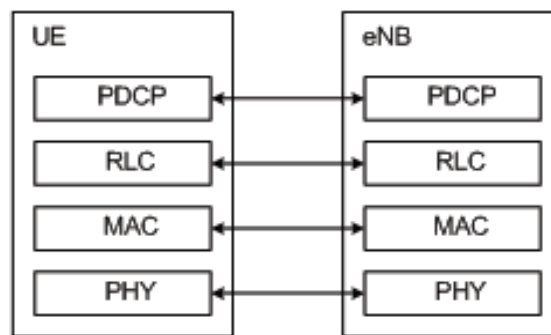


Figura 18: Pilha de protocolos *user plane*  
Fonte: Motorola, 2007

O protocolo NAS (*Non Access Stratum*), que funciona entre o MME e o UE (*User Equipment* – Equipamento do usuário) no *control plane*, é usado para fins de controle, como associação a rede, autenticação, criação de canais e gerenciamento de mobilidade. Todas as mensagens NAS são cifradas e tem sua integridade protegida pela MME e UE.

A camada RRC no *eNodeB* realiza as tarefas de *handover* com base em medições de células vizinhas enviadas pelo UE, controla a paginação para os UEs, as informações do sistema de transmissão, os relatórios de medições do UE, tais como relatórios de periodicidade da CQI (*Channel Quality Information*) e atribui identificadores temporários do nível de célula para UEs ativas. Ele também executa



a transferência do conteúdo da UE do *eNodeB* de origem para o de destino durante o *handover*, e faz a proteção da integridade das mensagens RRC.

No *user plane* a subcamada PDCP (*Packet Data Convergence Protocol*) é responsável pela compressão e descompressão dos cabeçalhos dos pacotes IP dos usuários usando ROHC (*Robust Header Compression*) que possibilita um uso otimizado da largura de banda na interface aérea. O PDCP também realiza a proteção dos dados trafegados tanto no *control plane* quanto no *user plane*. Como as mensagens NAS são transportados no RRC, eles são duplamente protegidos, uma vez no MME e outra no *eNodeB*.

A subcamada RLC (*Radio Link Control*) é utilizada para formatação e transporte do tráfego entre os UEs e os *eNodeB*. Ele fornece três confiáveis tipos de transporte de dados: AM (*Acknowledged Mode*), UM (*Unacknowledged Mode*) ou TM (*Transparent Mode*). O modo UM é adequado para transporte de serviços em tempo real, que não podem esperar por retransmissões. O modo AM, por outro lado, é apropriado para serviços que não necessitam ser transportados em tempo real, como downloads. O modo TM é usado quando o tamanho da PDU (*Protocol Data Unit*) é conhecido, como transmissão de informações do sistema.

A subcamada MAC oferece um conjunto de canais lógicos para a subcamada RLC que é multiplexado para os canais de transporte da camada física. Ele também gerencia a correção de erro no HARQ (*Hybrid, Automatic Repeat reQuest*), lida com a priorização dos canais lógicos para a mesma UE, a programação dinâmica entre UEs, entre outras funções.

As subcamadas PDCP, RLC e MAC juntos formam a camada 2 da arquitetura, conforme podemos observar nas figuras 19 (*downlink*) e 20 (*uplink*).

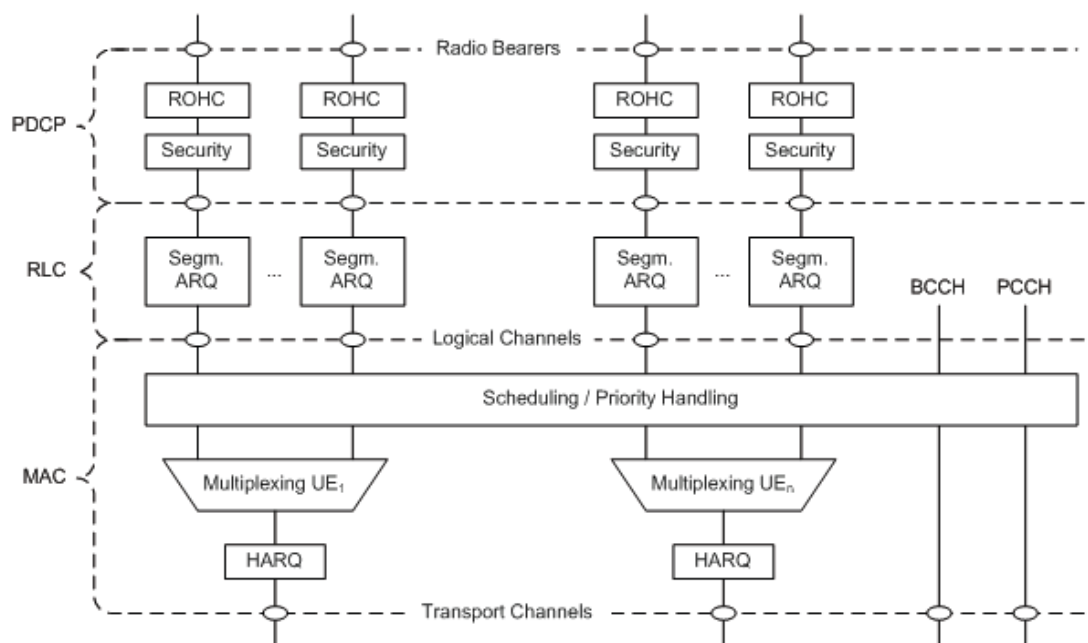


Figura 19: Estrutura da camada 2 para *downlink*  
Fonte: Motorola, 2007

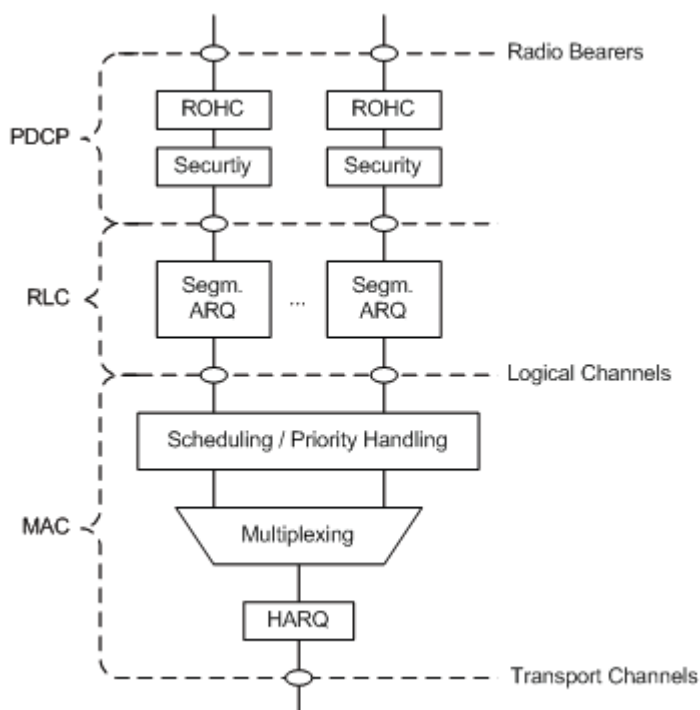


Figura 20: Estrutura da camada 2 para *uplink*  
Fonte: Motorola, 2007

A camada física (PHY) transporta toda a informação dos canais de transporte MAC através da interface aérea. É responsável por proteger os dados contra erros do canal utilizando o esquema AMC (*Adaptative Modulation and Coding*) com base nas condições do canal. Também realiza controle de energia, pesquisa de células (para a sincronização inicial e entrega fins) e outras medidas (dentro do sistema LTE e entre sistemas) para a camada RRC.

Na arquitetura de protocolo LTE foi feito um esforço significativo para simplificar o número e o mapeamento de canais lógicos e transporte. Os canais de transporte são distinguidos pelas características com a qual dos dados são transmitidos através da interface aérea. A camada MAC executa o mapeamento entre os canais lógicos e de transporte, controla a prioridade de transmissão entre os diferentes UEs, tanto para *uplink* quanto para *downlink*, considerando as prioridades, e seleciona o formato de transporte mais adequado. Os canais lógicos caracterizam-se pelas informações transportadas entre eles.

Os canais físicos correspondem a um conjunto de elementos que carregam informações originadas pelas altas camadas (NAS). Os canais físicos, lógicos e de transporte estão relacionados a seguir:

- Canais Físicos de *Downlink*:
  - *Physical Downlink Control Channel* (PDCCH) - Carrega as principais informações de alocação de recursos;
  - *Physical Broadcast Channel* (PBCH) - Carrega informações de acesso dos usuários que solicitam acesso a rede;
  - *Physical Downlink Shared Channel* (PDSCH) – Carrega informações do DL-SCH;

- *Physical Control Format Indicator Channel (PCFICH)* - Informa ao usuário o número de símbolos OFDM utilizados no PDCCHs;
- *Physical Hybrid ARQ Indicator Channel (PHICH)* - Respostas de ACK/NAKs (Acknowledge/Negative Acknowledge) das transmissões de *uplink*;
- *Physical Multicast Channel (PMCH)* - Carrega informações de *multicast*;
- Canais Físicos de *Uplink*:
  - *Physical Random Access Channel (PRACH)* - Canal de *uplink* utilizado para funções de acesso randômico;
  - *Physical Uplink Shared Channel (PUSCH)* - Carrega as informações do UL-SCH;
  - *Physical Uplink Control Channel (PUCCH)* - Respostas de ACK/NAKs das transmissões de *downlink*;
- Canais de transporte de *downlink*:
  - *Paging Channel (PCH)* - Utilizado para transmitir PCCH;
  - *Broadcast Channel (BCH)* - Canal de transporte mapeado pelo BCCH;
  - *Downlink Shared Channel (DL-SCH)* - Principal canal para transferência de dados de *downlink*. Responsável pela alocação dinâmica dos recursos, através de verificações da modulação, codificação e potência de transmissão;
  - *Multicast Channel (MCH)* - Utilizado na transmissão das informações do MCCH;
- Canais de transporte de *uplink*:
  - *Random Access Channel (RACH)* - Utilizado para requerimentos do acesso randômico;

- *Uplink Shared Channel (UL-SCH)* - Principal canal para transferência de dados no *uplink*. Responsável pela alocação dinâmica dos recursos, através de verificações da modulação, codificação e potência de transmissão;

Os canais lógicos podem ser classificados em canais lógicos de controle e canais lógicos de tráfego. Todos são utilizados para *downlink*, enquanto que para o *uplink* apenas o CCCH, DCCH e DTCH são utilizados.

- Canais lógicos de controle:
  - *Paging Control Channel (PCCH)* - Utilizado para informações de paginação (*paging*);
  - *Broadcast Control Channel (BCCH)* - Fornece informações sistêmicas para todos os terminais conectados na *eNodeB*;
  - *Common Control Channel (CCCH)* - Utilizado para informações de acesso randômico;
  - *Dedicated Control Channel (DCCH)* - Carrega informações específicas de controle para cada usuário (controle de potência, handover, etc);
  - *Multicast Control Channel (MCCH)* - Transmissão de informações necessárias para a repetição de *multicast*;
- Canais lógicos de tráfego:
  - *Dedicated Traffic Channel (DTCH)* - Canal Ponto a Ponto (*uplink* e *downlink*)  
- Utilizado para transmitir dados aos usuários;
  - *Multicast Traffic Channel (MTCH)* - Utilizado para transmissão de dados *multicast*;

Na figura 21 podemos observar a arquitetura de protocolo do LTE, com distribuição das subcamadas e canais entre as camadas do protocolo.

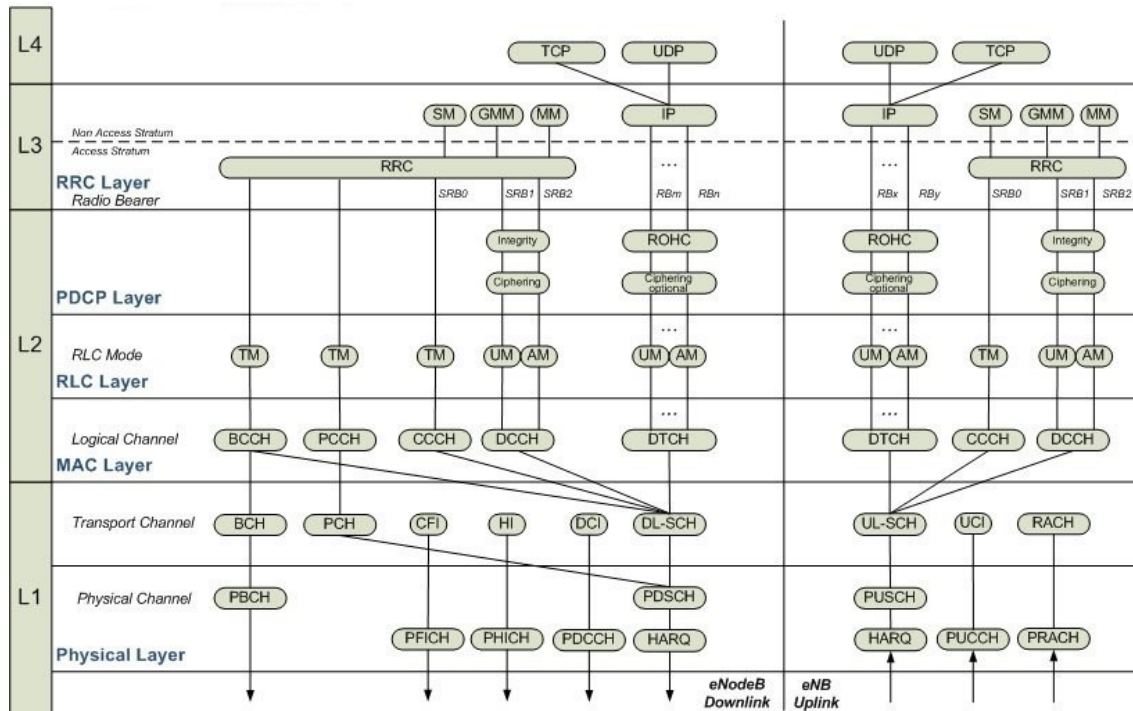


Figura 21: Arquitetura de protocolos LTE

Fonte: [http://ladyssmoking.blogspot.com.br/2009\\_09\\_01\\_archive.html](http://ladyssmoking.blogspot.com.br/2009_09_01_archive.html)

### 3.3 FAIXAS DE FREQUENCIAS

O LTE foi projetado inicialmente para trabalhar com as frequências licenciadas já utilizadas nas redes de telefonia celular, entre 800/900 MHz e 1,9/2,1 GHz. Isso traz uma grande vantagem no que diz respeito à interoperabilidade de aparelhos, uma vez que essas frequências são padronizadas no mundo inteiro.

Porém, com o advento da televisão digital, a faixa de 700 MHz, antes utilizada para transmissões dos sinais analógicos de televisão, está sendo gradativamente liberada em diversos países para utilização na transmissão de dados. Nos Estados Unidos, por exemplo, onde a transição da TV analógica para TV digital já foi

finalizada, essa faixa já está sendo utilizada para este fim. No Brasil a previsão é que essa transição seja concluída em 2016. Para os especialistas essa é a melhor faixa de frequência para a implantação da rede de telefonia 4G.

O 3GPP estabeleceu as faixas de frequência para o LTE de acordo com o método de duplexação utilizado, TDD ou FDD, e as dividiu em dois grupos, conforme mostra quadro 3.

Quadro 3: Frequências definidas pelo 3GPP para o LTE

Fonte: 3GPP, 2013

E-UTRA Band	Uplink (UL) eNode B receive UE transmit		Downlink (DL) eNode B transmit UE receive		UL-DL Band separation	Duplex Mode
	F <sub>UL low</sub>	F <sub>UL high</sub>	F <sub>DL low</sub>	F <sub>DL high</sub>	F <sub>DL low</sub> - F <sub>UL high</sub>	
1	1920 MHz	1980 MHz	2110 MHz	2170 MHz	130 MHz	FDD
2	1850 MHz	1910 MHz	1930 MHz	1990 MHz	20 MHz	FDD
3	1710 MHz	1785 MHz	1805 MHz	1880 MHz	20 MHz	FDD
4	1710 MHz	1755 MHz	2110 MHz	2155 MHz	355 MHz	FDD
5	824 MHz	849 MHz	869 MHz	894 MHz	20 MHz	FDD
6	830 MHz	840 MHz	875 MHz	885 MHz	35 MHz	FDD
7	2500 MHz	2570 MHz	2620 MHz	2690 MHz	50 MHz	FDD
8	880 MHz	915 MHz	925 MHz	960 MHz	10 MHz	FDD
9	1749.9 MHz	1784.9 MHz	1844.9 MHz	1879.9 MHz	60 MHz	FDD
10	1710 MHz	1770 MHz	2110 MHz	2170 MHz	340 MHz	FDD
11	1427.9 MHz	1452.9 MHz	1475.9 MHz	1500.9 MHz	23 MHz	FDD
12	[TBD]	[TBD]	[TBD]	[TBD]	[TBD]	FDD
13	777 MHz	787 MHz	746 MHz	756 MHz	21	FDD
14	788 MHz	798 MHz	758 MHz	768 MHz	20	FDD
17	734 MHz	746 MHz	704 MHz	716 MHz	18	FDD
33	1900 MHz	1920 MHz	1900 MHz	1920 MHz	N/A	TDD
34	2010 MHz	2025 MHz	2010 MHz	2025 MHz	N/A	TDD
35	1850 MHz	1910 MHz	1850 MHz	<b>1910 MHz</b>	N/A	TDD
36	1930 MHz	1990 MHz	1930 MHz	1990 MHz	N/A	TDD
37	1910 MHz	1930 MHz	1910 MHz	1930 MHz	N/A	TDD
38	2570 MHz	2620 MHz	2570 MHz	2620 MHz	N/A	TDD
39	1880 MHz	1920 MHz	1880 MHz	1920 MHz	N/A	TDD
40	2300 MHz	2400 MHz	2300 MHz	2400 MHz	N/A	TDD

As faixas de frequências de 700 MHz foram incluídas pelo 3GPP em 2009. No Brasil acredita-se que as bandas utilizadas para a implantação das redes LTE sejam a 1, 3 e 13.

No LTE existe a possibilidade de escalonamento da banda, variando-se desde 1.4 MHz até 20 MHz, como pode ser observado na figura 17.



Figura 22 – Possibilidades de configurações de largura de banda.  
Fonte: Santos,2009

### 3.4 QUALIDADE DE SERVIÇO

Num caso típico, múltiplas aplicações podem ser executadas em uma UE a qualquer momento, tendo cada uma delas diferentes requisitos de QoS. Por exemplo, uma UE pode estar envolvida numa chamada VoIP, enquanto ao mesmo tempo navega por uma página da Web ou realiza o download de um arquivo FTP. VoIP tem requisitos mais rigorosos para QoS em termos de atraso e *jitter* do que a navegação web e FTP, pois requerem uma taxa de perda de pacotes muito menor. Para suportar vários requisitos de QoS, são criados canais de comunicação denominados *bearers*, no âmbito do sistema EPS, sendo cada um deles associado a um QoS.

Em termos gerais, *bearers* podem ser classificados em duas categorias baseados na natureza do QoS que irão fornecer:

- Mínimo GBR (*Guaranteed Bit Rate*), que garante uma taxa mínima de bits podendo ser usado para aplicações como VoIP. Possuem um valor GBR associado para que os recursos de transmissão dedicados sejam permanentemente alocados no estabelecimento ou na modificação dos *bearers*. Taxas de bits mais elevadas do que a GBR podem ser permitidas para um *bearer* GBR se houver recursos disponíveis. Em tais casos, um



parâmetro MBR (*Maximum Bite Rate*) pode ser associado a um GBR para estabelecer um limite superior para a taxa de bits que pode ser associado a um GBR.

- Non-GBR *bearers*, que não garante qualquer taxa de bits. Podem ser usados para aplicações tais como navegação na web ou transferência FTP. Nenhum recurso de largura de banda é alocado permanentemente para *bearers* non-GBR.

*Bearer* é a estrutura básica para separação de tráfego, pois ele fornece tratamento diferenciado para tráfego com requisitos de QoS distintos. O conceito de *bearer* e os respectivos procedimentos de sinalização adicional permitem ao sistema reservar recursos antes que os fluxos de pacotes mapeados para o *bearer* sejam mapeados para o sistema. [ALCATEL-LUCENT, 2009].

Na rede de acesso é de responsabilidade do *eNodeB* garantir o QoS necessário para o *bearer* através de interface aérea. Cada *bearer* é associado a um QCI (*QoS Class Identifier*) e a um ARP (*Allocation and Retention Priority*).

Cada QCI é caracterizado pela prioridade, previsão de atraso de pacotes e a taxa de perda aceitável do pacote. A marcação QCI para um *bearer* determina como ele é tratado no *eNodeB*.

A marcação ARP é usada para controle de admissão de chamadas - isto é, para decidir se a requisição de *bearer* deve ser estabelecida em caso de congestionamento.

Um *bearer* tem que passar por várias interfaces conforme mostrado na figura 23 – a interface S5/S8 entre o P-GW e o S-GW, a interface S1 entre o S-GW e o

eNodeB, e a interface de rádio (também conhecida como “interface LTE-Uu”) entre o eNodeB e a UE. Em cada interface, o *bearer* é mapeado para um *bearer* de camada inferior, cada um com sua identidade própria. Cada nó deve manter o controle de ligação entre os *bearers* através de suas diferentes interfaces.

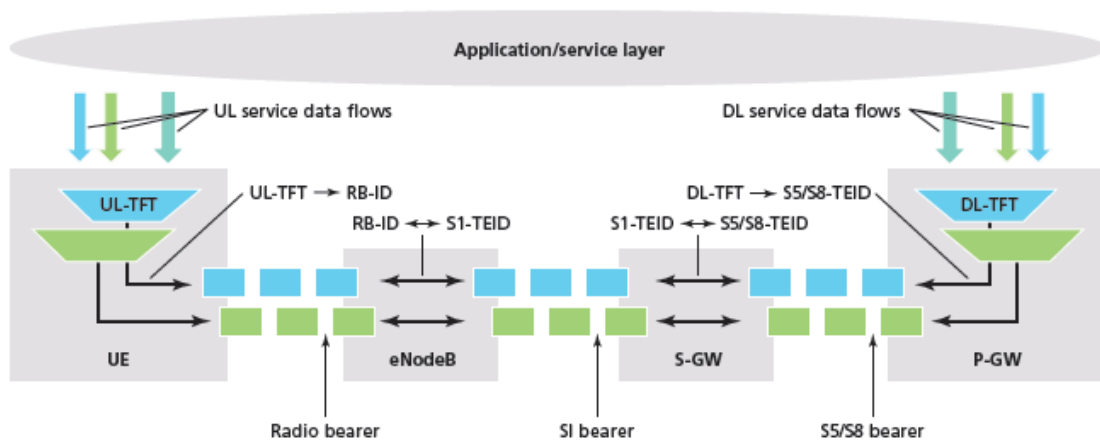


Figura 23: tráfego de *bearers* através de diferentes interfaces.  
Fonte: Alcatel-Lucent, 2009

#### 4 ANÁLISE COMPARATIVA

As tecnologias sem fio que podem ser utilizadas em redes metropolitanas, tais como WiMAX e LTE, devem possuir alguns requisitos básicos para que possam operar satisfatoriamente, atendendo às necessidades dos usuários. Dentre esses requisitos destacam-se:

- Área de alcance – deve-se atender a maior área possível utilizando o menor número de antenas.
- Taxa de transferência – a taxa de transferência deve ser dimensionada de acordo com a quantidade de usuários que serão atendidos. Se possível, deve ser próxima da taxa oferecida pelas redes cabeadas.
- Segurança – por se tratar de tecnologias sem fio, onde dados trafegarão pelo ar, estando mais vulneráveis a interceptações e ataques, as técnicas de criptografia utilizadas são de fundamental importância para a utilização segura de tecnologias sem fios.
- Qualidade de serviço (QoS) – assim como a segurança, QoS também é essencial para que uma rede metropolitana opere com eficiência e qualidade, para que haja garantia de entrega dos serviços solicitados pelo usuário.
- Operação NLOS – Esse é um fator que deve ser analisado de acordo com a localidade onde será instalada uma estrutura de rede metropolitana. Um fator primordial para uma rede sem fio de longo alcance é a operação sem linha de visada, pois nem sempre será possível utilizar a visada direta para o estabelecimento dos enlaces.

Na tabela 2 podemos observar uma comparação entre as principais características dos padrões WiMAX e LTE.

Tabela 2: Comparação das características dos padrões WiMAX e LTE  
Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da pesquisa

Características	WiMAX	LTE
QoS	Sim	Sim
Banda larga fixa	Sim	Sim
Banda larga móvel	Sim	Sim
Mobilidade	Até 160 Km/h	Até 350 Km/h
Interoperabilidade com outras tecnologias	Sim	Sim
Cobertura (por estação base)	Raio de 30 Km	Raio de 50 Km
Operação NLOS	Sim	Sim
Taxa de transferência	70 Mbps	100 Mbps para <i>download</i> 50 Mbps para <i>upload</i>
Segurança (criptografia)	Sim	Sim
Modulação OFDMA	Sim	Sim
Frequências	2 a 11 GHz (NLOS) 10 a 66 GHz (LOS) (Pode operar na faixa de frequência não licenciadas de 5,8 GHz)	700/800 MHz 800/900 MHz 1.9/2.1 GHz (Opera somente com faixas de frequências licenciadas)
Mobilidade	Até 160 Km/h, com taxas de 15 Mbps (Padrão 802.16e)	Até 350 Km/h

Quando perfiladas, os dois padrões revelam semelhanças tecnológicas sugestivas: operam com a mesma técnica de modulação de rádio, baseada em OFDM, tem boa eficiência espectral, custo de operação e número de estações radiobase parecidos, são baseadas em IP e outras similaridades. Isso não significa dizer que WiMAX e LTE são tecnologias concorrentes. Como já vimos neste trabalho, o WiMAX foi desenvolvido para superar os obstáculos apresentados pelas redes de comunicações via cabo, enquanto que LTE é uma evolução natural das redes de telefonia celular 3G.

Sob esse ponto de vista, os padrões atuam em áreas diferentes. O WiMAX pode oferecer banda larga a lugares onde ainda não chegou a telefonia convencional, realizar conexões de última milha e possibilitar o estabelecimento de ligações *backhaul* sem fio, dentre outros. Já o LTE tende a ser mais utilizado para telefonia celular, oferecendo banda larga a dispositivos móveis mesmo em deslocamento com velocidades acima de 200 km/h.

No ponto de vista mercadológico, o WiMAX leva alguma vantagem, pois o padrão vem sendo desenvolvido a mais tempo, e já está em operação em alguns países desde 2009, o que traz uma vantagem em termos de equipamentos disponíveis e problemas ocorridos, que já tiveram tempo de ser sanados. Já o LTE entrou em operação como sistema de telefonia celular pré-4G ou 3,5G em 2012, e ainda está em fase de maturação. Mas não leva uma grande desvantagem por conta disso, pois como vimos o LTE é compatível com tecnologias antecessoras. Isso significa dizer que podemos ter em uma área de cobertura LTE aparelhos 3G e 2G funcionando normalmente, ficando a cargo do usuário a decisão de trocar ou não de aparelho para poder aproveitar todos os serviços disponibilizados pelo LTE.

Se for pensar em uma rede corporativa privada, onde certamente seria utilizada a faixa de frequência não licenciada de 5,8 GHz, para não arcar com custos pela utilização de faixas licenciadas, o WiMAX leva mais uma vantagem. Obviamente que, ao utilizar uma faixa de frequência não licenciada, tem que se levar em conta possíveis interferências e congestionamentos.

O LTE leva vantagem em relação a taxa de transferência, cobertura e mobilidade em velocidades superiores a do WiMAX móvel (padrão 802.16e). Porém, essa mobilidade não é tão importante para uma rede corporativa privada, que basicamente será constituída de estações fixas e dispositivos portáteis, com pouco ou nenhum deslocamento.

Os dois padrões estão sempre em desenvolvimento visando o aperfeiçoamento da tecnologia. O padrão IEEE 802.16m, também chamado de WiMAX release 2, é uma evolução dos padrões da família 802.16, enquanto que o grupo 3GPP publicou o Release 10 de sua documentação, que especifica o LTE Advanced. Esses padrões, WiMAX 2 e LTE Advanced, foram considerados pela ITU em 2010 como tecnologias 4G por atenderem os requisitos do IMT Advanced<sup>21</sup> (*International Mobile Telecommunications-Advanced*), que exige taxas de transferência de 1Gbps a estações fixas ou nômades e 100 Mbps em alta velocidade, além de baixa latência, flexibilidade de espectro, interoperabilidade, QoS, segurança, dentre outras características.

No próximo capítulo vamos associar essas características ao escopo deste trabalho de modo a tentar determinar qual tecnologia melhor atenderia a necessidade aqui apresentada.

## 5 CONCLUSÃO E ESTUDOS FUTUROS

Baseado nas informações contidas nesse trabalho, vamos mostrar na conclusão algumas sugestões para a topologia da rede metropolitana do Galeão, com a possível localização das antenas, a distância entre elas e a estação central e o modo de operação. Em estudos futuros serão apresentadas ideias para estudos mais aprofundados de modo a identificar a melhor solução para atender a MAN-GL

### 5.1 CONCLUSÃO

O dimensionamento de uma rede de acesso deve atender as demandas atuais e futuras utilizando uma determinada tecnologia capaz de oferecer elevada largura de banda aos usuários finais, possibilitando a esses o acesso aos múltiplos novos serviços. Para que a experiência do usuário seja minimamente satisfatória, toda a rede deverá estar dimensionada para suportar o tráfego demandado pelos clientes da rede. [GRACIOSA, 2012].

A rede metropolitana do Galeão possui uma área aproximada de 4.400 m<sup>2</sup> e raio de 3,7 Km. Nas 6 organizações que poderão ser atendidas pela rede, existem aproximadamente 1.000 usuários, que utilizarão sistemas corporativos de pessoal e logístico, correio eletrônico, acesso à intranet e internet. Existem várias barreiras naturais na topologia local que impossibilitam a utilização de visada direta em toda a arquitetura da rede.

Com base nesses dados preliminares, podemos dizer as duas tecnologias aqui apresentadas podem atender as necessidades da rede, com vantagem para o

---

<sup>21</sup> IMT Advanced: são as especificações mínimas exigidas pelo ITU para uma tecnologia ser reconhecida como 4G.

WiMAX por conta da possibilidade de uso da faixa de frequência não licenciada de 5,8 GHz.

Fazendo uma projeção inicial da arquitetura da rede, poderíamos dizer que ela pode ser composta de uma estação base (BS), localizada em uma área próxima ao DTCEATM-RJ, e outras 6 estações clientes, localizadas em cada uma das organizações que farão parte da rede metropolitana, que para exemplificar serão denominadas de SS1 a SS6. Na figura 24 podemos ver um mapa da área a ser atendida e a localização sugerida das antenas utilizando topologia ponto-multiponto e operando em modo NLOS.



Figura 24: Projeção inicial da rede metropolitana  
Fonte: Elaboração própria

As distâncias aproximadas em linha reta são as seguintes:

Entre BS1 e SS1: 3,63 Km

Entre BS1 e SS2: 3,69 Km

Entre BS1 e SS3: 3,50 Km

Entre BS1 e SS4: 3,63 Km

Entre BS1 e SS5: 3,62 Km

Entre BS1 e SS6: 2,50 Km



Vale ressaltar que os links estão marcados apenas para ilustrar a distância entre a estação base e as estações dos assinantes (SS), não significando a utilização de visada direta.

Como a BS estaria localizada próxima à torre de controle do aeroporto, é necessário que se faça um estudo para verificar se poderá haver algum tipo de interferência entre as antenas da rede sem fio e os radares que realizam o controle do tráfego aéreo.

Em uma análise superficial, foi observado que entre a BS e as SS1, SS2, SS3, SS4 e SS5 existem obstáculos, sendo eles um morro com muitas construções e bastante vegetação. Deve ser feita uma análise mais aprofundada para saber se esses obstáculos serão uma potencial fonte de interferências, de modo a apresentar perda ou intermitência do sinal.

Também foi observado que as estações SS1, SS2, SS3, SS4 e SS5 ficam próximas uma das outras, dentro de um raio máximo 1 km, sendo que a SS5 fica num ponto mais alto do que as outras, podendo sofrer menos interferências. Dessa forma podemos imaginar outra topologia da rede, utilizando menos antenas operando em modo NLOS.

Assim teríamos uma BS e duas SS operando em modo NLOS, a SS5 e SS6, e como há a possibilidade de se utilizar visada direta entre a estação SS5 e as estações SS1 a SS4, podemos operar em modo LOS entre elas.

Nessa topologia, representada na figura 25, teríamos os seguintes modos de operação:

Entre BS1, SS5 e SS6 – NLOS

Entre SS5 e SS1, SS2, SSE e SS4 – LOS.

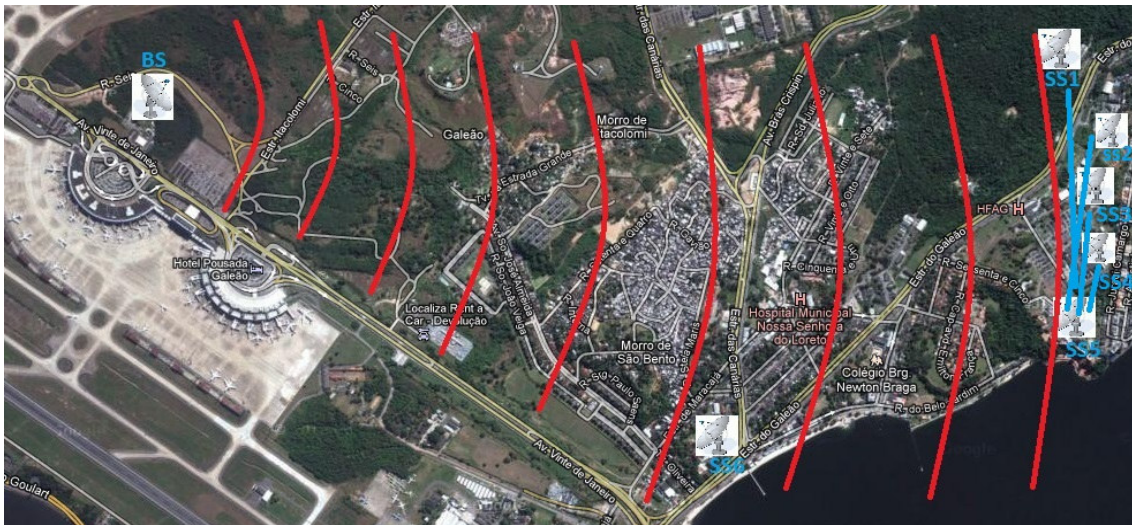


Figura 25: Topologia com 6 antenas utilizando LOS e NLOS.  
Fonte: Elaboração própria.

Também é possível fazer a comunicação entre a estação SS5 e as estações SS2, SS3 e SS4 utilizando a infraestrutura em fibra ótica já existente. Nesse caso, seria necessário trocar as fibras, que se encontram bastante degradadas. Permanecendo com a visada direta entre as estações SS5 e SS1, teríamos a topologia apresentada na figura 26.



Figura 26: Topologia com 3 antenas clientes.  
Fonte: Elaboração própria

De acordo com esses dados superficiais, poderemos ter 3 topologias diferentes como mostrado anteriormente. A ideia inicial é que os enlaces sejam feitos entre as estações base e as estações clientes, podendo suportar dispositivos móveis deslocando-se em baixa velocidade. A comunicação interna entre as SS e as organizações a ela atreladas seria realizada utilizando a infraestrutura já existente de rede local.

## 5.2 ESTUDOS FUTUROS

A partir das informações levantadas nesse estudo, são sugeridos os seguintes trabalhos futuros:

- Estudo detalhado da topografia da área;
- Estudo para determinar se as frequências utilizadas pela rede sem fio podem vir a causar interferência nos radares de aviação que realizam o controle do tráfego aéreo da região;
- Pesquisa na área da rede MAN-GL a fim de localizar interferências e congestionamentos na faixa de frequência escolhida para a operação;
- Análise e simulação do WIMAX e do LTE;
- Avaliação do desempenho das tecnologias;
- Estudo de viabilidade para possíveis enlaces LOS;
- Definir as soluções de segurança que serão adotadas;
- Levantamento detalhado do volume de dados que trafegarão pela rede; e
- Realização de *site survey*<sup>22</sup>.

---

<sup>22</sup> Site Survey: metodologia aplicada na inspeção técnica minuciosa do local que será objeto da instalação de uma nova infraestrutura de rede, na avaliação dos resultados obtidos com as melhorias da infraestrutura existente ou mesmo na identificação e solução dos problemas de um sistema já em funcionamento.

## REFERÊNCIAS

- 3GPP. **Overview of 3GPP Release 8 V0.2.9**. 3GPP Org, 2013. Disponível em [http://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK\\_PLAN/Description\\_Releases](http://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK_PLAN/Description_Releases). Acesso em 13/02/2013.
- 3GPP. **Overview of 3GPP Release 9 V0.2.8**. 3GPP Org, 2013. Disponível em [http://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK\\_PLAN/Description\\_Releases](http://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK_PLAN/Description_Releases). Acesso em 13/02/2013.
- ALCATEL-LUCENT. **The LTE Network Architecture – A comprehensive tutorial**. Strategic White Paper. 2009. Disponível em [http://www.alcatel-lucent.com/wps/DocumentStreamerServlet?LMSG\\_CABINET=Docs\\_and\\_Resource\\_Ctr&LMSG\\_CONTENT\\_FILE=White\\_Papers/CPG0599090904\\_LTE\\_Network\\_Architecture\\_EN\\_StraWhitePaper.pdf](http://www.alcatel-lucent.com/wps/DocumentStreamerServlet?LMSG_CABINET=Docs_and_Resource_Ctr&LMSG_CONTENT_FILE=White_Papers/CPG0599090904_LTE_Network_Architecture_EN_StraWhitePaper.pdf). Acesso em: 18/02/2013.
- ALMEIDA, M. A. F. R. **Introdução ao LTE – Long Term Evolution**. 2012. Disponível em <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialintlte/Default.asp>. Acesso em: 10/02/2013.
- ARRUDA, F. **Conexões 4G LTE e WiMAX: o que podemos esperar delas**. 2011. Disponível via URL em: <http://www.tecmundo.com.br/4g/8722-conexoes-4g-lte-e-wimax-o-que-podemos-esperar-delas.htm>. Acesso em 11/12/2012.
- BARCELAR, R. R. **Padrão IEEE 802.16 – Uma Visão Geral sobre o WiMAX**. Rondonópolis, 2006. União de Escolas Superiores de Rondonópolis MT.
- BOAS, L. A. S. V. **WiMax – a nova tecnologia de rede sem fio**. Jaguariúna, 2007. 48f. Monografia (Bacharelado em Ciência da Computação) – Curso de Ciência da Computação. Faculdade de Jaguariúna. São Paulo, 2007.
- BOTH ET AL. **Uma Análise do Overhead dos Mapas em Redes Metropolitanas Sem Fio Baseadas em OFDMA**. 2011. Disponível em [http://sbrc2011.facom.ufms.br/files/main/ST14\\_2.pdf](http://sbrc2011.facom.ufms.br/files/main/ST14_2.pdf). Acesso em: 15/02/2013.
- DAS, M. **Connect world: a changing wireless paradigm**. 2011 Disponível em <http://www.telecom-cloud.net/connected-world-a-changing-wireless-paradigm/#more-1398>. Acesso em: 06/02/2013.
- DUARTE, M. **LTE Advanced e 4G- o Futuro das Telecomunicações**. 2010. Disponível em <http://miguelduarte.pt/2010/10/02/lte-advanced-4g-futuro-telecomunicacoes/>. Acessado em 07/02/2013.
- EKLUND, C.; MARKS, R. B.; STANWOOD, K. L.; WANG, S.; **IEEE Standard 802.16: A Technical Overview of the WirelessMAN™ Air Interface for Broadband Wireless Access**. IEEE C802.16.02/05. June 04, 2002. Disponível em [http://www.ieee802.org/16/docs/02/C80216-02\\_05.pdf](http://www.ieee802.org/16/docs/02/C80216-02_05.pdf). Acesso em 10/02/2013.

- ENDLER, M.; LIMA L.; SOARES L; **WiMAX: Padrão IEEE 802.16 para Banda Larga Sem Fio**. Rio de Janeiro, 2004. 58 f. Monografia (Curso de Ciência da Computação) – Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2004.
- ERICSSON. **Long Term Evolution (LTE): an introduction**. White Paper. 2007. Disponível em [http://docsfiles.com/pdf\\_long\\_term\\_evolution\\_lte\\_white\\_paper.html](http://docsfiles.com/pdf_long_term_evolution_lte_white_paper.html). Acesso em: 20/02/2013.
- FAGUNDES, E. M. **Wimax**. 2006. Disponível via URL em: <http://www.efagundes.com/artigos/WiMAX.htm>. Acesso em: 12/11/2012.
- FIGUEIREDO F. L. **Fundamentos da Tecnologia WiMAX**. Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações – CPqD, 2006
- GOIS, L. M. R. **Estudo de Redes em Fio WIMAX**. Orientador: Amílcar Careli César. São Carlos, 2008. 38 f. Trabalho de conclusão de Curso. (Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2008.
- GRACIOSA, H. B. **A Transformação das Redes Ópticas no Acesso e no Anel Backbone Metropolitano: Alternativas Tecnológicas, Econômicas e Novos Serviços**. Rio de Janeiro, 2012. . Tese de Mestrado. (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2012.
- IEEE. **IEEE Standards for Local and Metropolitan Area Networks - Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems**. Work Group IEEE 802.16, 2004.
- IEEE. **QoS Control in the 3GPP Evolved Packet System**. IEEE Communications Magazine, 2009. Disponível em <http://ebookbrowse.com/ekstrom-paper-on-qos-control-in-the-3gpp-evolved-packet-system-pdf-d70213857>. Acesso em 01/03/2013.
- LIMA, F.;PRADO, E.; **Dimensionamento de Redes WiMAX**. 2006. Disponível em <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialredeswimax/default.asp>. Acesso em: 20/12/2012.
- LTEWORLD. **LTE Advanced: Evolution of LTE**. 2009. Disponível em <http://lteworld.org/blog/lte-advanced-evolution-lte>. Acessado em 25/02/2013.
- MACHADO, D. **WiMax vs LTE: Um Caso de Mercado**. 2009. Disponível em <http://www.teletime.com.br/Revista.aspx?ID=151218>. Acessado em 10/02/2013.
- MOTOROLA. **Long Term Evolution (LTE)**. White Paper. 2007. Disponível em [http://www.motorola.com/web/Business/Solutions/IndustrySolutions/ServiceProviders/WirelessOperators/LTE/\\_Document/StaticFiles/6833\\_MotDoc\\_New.pdf](http://www.motorola.com/web/Business/Solutions/IndustrySolutions/ServiceProviders/WirelessOperators/LTE/_Document/StaticFiles/6833_MotDoc_New.pdf). Acesso em 28/02/2013.

- MOTOROLA. **Long Term Evolution (LTE): A Technical Overview**. Technical White Paper. 2007. Disponível em [http://www.motorola.com/web/Business/Solutions/Industry Solutions/Service Providers/Wireless Operators/LTE /\\_Document/Static Files/ 6834\\_MotDoc\\_New.pdf](http://www.motorola.com/web/Business/Solutions/Industry%20Solutions/Service%20Providers/Wireless%20Operators/LTE/_Document/Static%20Files/6834_MotDoc_New.pdf). 28/02/2013.
- OLIVEIRA, R.S. **Avaliação e Segurança em Redes WiMAX para uso em Operações Militares**. Brasília, 2001. 76 f. Monografia. (Curso de Ciência da Computação) – Departamento de Ciência da Computação, Instituto de Ciências Exatas, Universidade de Brasília, 2011.
- OLIVEIRA, S.R.A.L.; VILLELA L.V.; MIYASHITA R.; **Estudo da Difusão Tecnológica no Setor de Telecomunicações – Tecnologia Wimax**. Revista de Gestão e Operações Produtivas Volume 3 – 2012/1, UERJ. Disponível em: [http://www.dein.eng.uerj.br/revista/download/DifusaoTecnologicaWIMAX\\_Ed03-2012.pdf](http://www.dein.eng.uerj.br/revista/download/DifusaoTecnologicaWIMAX_Ed03-2012.pdf). Acesso em 05/10/2012.
- RIBEIRO, F. T. S. **Wimax: Estudo e Simulação da Camada Física do Padrão IEEE 802.16d**. 2013. Disponível em <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialwimaxiee802/default.asp>. Acesso em: 01/02/2013.
- SANTOS, D. **Planejamento e Cobertura e Capacidade de Redes de Acesso em Banda Larga com Tecnologia LTE**. Rio de Janeiro, 2010. Tese de Mestrado. (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2010.
- SAUTER, M. **Beyond 3G – Bringing Networks, Terminals and the Web Together: LTE, WiMAX, IMS, 4G Devices and the Mobile Web 2.0**. John Wiley & Sons Ltd, 2009.
- SILVA, A. P. S.; Soares, B. T. A.; **Wi-Fi e WiMAX I: As Tecnologias de Rede Sem Fio**. 2009. Disponível em <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialww1/default.asp>. Acesso em: 05/02/2013.
- SILVA, A. P. S.; Soares, B. T. A.; **Wi-Fi e WiMAX II: As Tecnologias de Rede Sem Fio**. 2009. Disponível em <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialww2/default.asp>. Acesso em: 05/02/2013.
- SILVA, A. P. S.; Soares, B. T. A.; **Wi-Fi e WiMAX III: As Tecnologias de Rede Sem Fio**. 2009. Disponível em <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialww3/default.asp>. Acesso em: 05/02/2013.
- SILVA, M. J. P. G. **WiMAX – Uma revolução tecnológica**. Londrina, 2006. Monografia. (Curso de Especialização) – Centro de Ciências Exatas, Universidade Estadual de Londrina, 2006.
- TANNENBAUM, Andrew S. **Redes de Computadores**. 4ª ed. Rio de Janeiro: Editora Campus, 2003.

TEIXEIRA, E. R. D. **WiMAX**. 2004. Disponível em <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialwimax/default.asp>. Acesso em: 05/02/2013.

TELECO. **LTE: Solução OFDMA Otimizada para Espectro com Maior Largura de Banda**. 2009. Disponível em <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialofdma/Default.asp>. Acesso em: 05/02/2013.

WIKIIFSC. **Wimax**. Disponível em <http://wiki.sj.ifsc.edu.br/wiki/index.php/Wimax>. Acesso em 10/02/2013.

WiMAX Forum. **WiMAX and the IEEE 802.16m Air interface Standard**. 2011. Disponível em <http://www.wimaxforum.org> . Acesso em: 05/02/2013.

WiMAX Forum. **WiMAX™, HSPA+, and LTE: A Comparative Analysis**. 2009. Disponível em <http://www.wimaxforum.org> . Acesso em: 20/02/2013.

WIMAX.COM. **Why the WiMAX vs. LTE Battle Isn't a Battle**. Disponível em <http://www.wimax.com/lte/why-the-wimax-vs-lte-battle-isnt-a-battle>. Acessado em 16/02/2013.

WIMAX.COM. **WiMAX Tutorial**. Disponível em <http://www.wimax.com/table/wimax-tutorial>. Acessado em 16/02/2013.