

RENATA SANTOS DE MORAES

APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA 4G EM PROJETOS DE TELEFONIA

Guaratinguetá - SP

2015

RENATA SANTOS DE MORAES

APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA 4G EM PROJETOS DE TELEFONIA

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador (a): Profº Dr. José Feliciano Adami

Guaratinguetá

2015

M827a	Moraes, Renata Santos de Aplicação da tecnologia 4G em projetos de telefonia / Renata Santos de Moraes – Guaratinguetá, 2015. 76 f : il. Bibliografia: f. 69-74 Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2015. Orientador: Prof. Dr. José Feliciano Adami 1. Telefonia celular 2. Sistemas de comunicação móvel I. Título CDU 621.395
-------	---

RENATA SANTOS DE MORAES

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA"

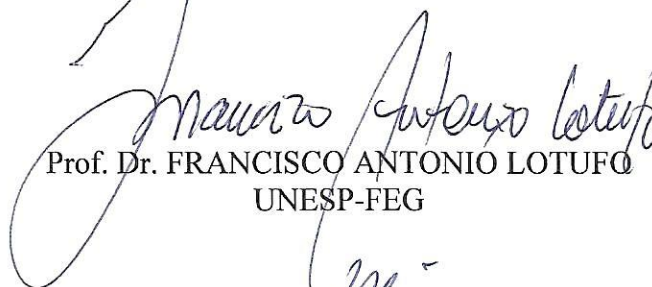
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Prof. Dr. LEONARDO MESQUITA
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. JOSÉ FELICIANO ADAMI
Orientador/UNESP-FEG



Prof. Dr. FRANCISCO ANTONIO LOTUFO
UNESP-FEG



Prof. Dr. RUBENS ALVES DIAS
UNESP-FEG

Dezembro de 2015

DADOS CURRICULARES

Renata Santos de Moraes

NASCIMENTO 01.12.1988 – SÃO PAULO / SP

FILIAÇÃO Luiz Antonio de Moraes
Nilza dos Santos Manoel

2004/2006 Ensino Médio
E.E. Profº Ascendino Reis – São Paulo - SP

2009/2015 Curso de Graduação em Engenharia Elétrica na
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita
Filho” Campus de Guaratinguetá

de modo especial, à minha mãe Nilza, que durante muitos anos foi a minha única incentivadora e mesmo quando tudo parecia não dar certo, acreditou em mim.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por todas as oportunidades que tive, e agradeço também,

aos meus familiares que de alguma forma contribuíram para que eu persistisse e chegasse até aqui,

ao meu orientador, Prof. Dr. José Feliciano Adami, pela confiança e disposição em me auxiliar.

à dona Lair que me acolheu em sua casa compartilhando as alegrias e tristezas por cinco anos.

às minhas amigas, Aline, Priscila e Thaís, pelos anos de companheirismo, por todas as alegrias divididas e pelo apoio nos momentos difíceis. Sem vocês esses anos não teriam sido tão divertidos.

aos funcionários da FEG pela dedicação e pela vontade de ajudar,

e por fim, aos professores que me acompanharam durante a Graduação por todo o aprendizado e vivência.

MORAES, R. S. **Aplicação da tecnologia 4G em projetos de telefonia**. 2015. 74 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo baseado em pesquisas bibliográficas sobre a tecnologia LTE, escolhida para a quarta geração de celulares, e a atual situação da implementação da rede 4G no Brasil. A mudança de comportamento do usuário, que agora utiliza serviços de dados em detrimento ao serviço de voz, exige que as redes de transmissão sejam cada vez mais robustas e velozes para possibilitar a visualização de vídeos e o uso de outras plataformas que necessitam da Internet. A retrospectiva do desenvolvimento das tecnologias celulares, 1G até a 4G utilizada atualmente, apresenta o longo caminho percorrido até que se chegasse aos aparelhos e ao modo como o celular é utilizado nos dias de hoje. Por fim, a popularização dos smartphones e, conseqüentemente, o crescente número de pessoas com acesso às redes 4G, exigiu novas pesquisas para o desenvolvimento das tecnologias das gerações futuras, de modo a atender a demanda por velocidade e permitindo mudanças significativas na experiência para o usuário.

PALAVRAS-CHAVE: Sistemas de comunicação móvel. Telefonia celular. 4G no Brasil. *LTE-Advanced*. 5G.

MORAES, R. S. **4G technology application in telephony projects**. 2015. 74 f. Graduate Work (Graduate in Electrical Engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

ABSTRACT

This paper presents a study based on bibliographic research on LTE technology, chosen for the fourth generation of mobile phones, and the current status of implementation of 4G network in Brazil. The change in user behavior, which now uses data over the voice services, requires transmission networks to be increasingly robust and fast to enable the viewing of videos and use of other platforms that require internet connection. The retrospective of the development of mobile technologies, from 1G up to 4G that is currently used, shows the long road until it came to appliances and how the phone is used nowadays. Finally, the popularity of smartphones and hence the growing number of people with access to 4G networks, demanded new researchs for the development of future generations technologies in order to achieve the demand for speed enabling significant changes in user experience.

KEYWORDS: Mobile communication system. Cellular Telephony. 4G in Brazil. LTE-Advanced. 5G

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Expansão da rede ARPANET.	20
Figura 2.2 - Expansão da rede de Internet brasileira.	21
Figura 2.3 - Modo de acesso FDMA.	23
Figura 2.4 - Modo de acesso TDMA.	24
Figura 2.5 - Padrão de células CDMA.	25
Figura 2.6 - Modo de acesso CDMA.	25
Figura 2.7 - Distribuição de canais na tecnologia GSM.	26
Figura 2.8 - Modulações usadas em comunicações móveis.	28
Figura 2.9 - Arquitetura UMTS.	30
Figura 2.10 - Modulações utilizadas no HSPDA.	31
Figura 3.1 - Redes CS e PS.	32
Figura 3.2 - Diagrama de fase e quadratura 16QAM e 64QAM.	35
Figura 3.3 - Diagrama modulação QPSK.	36
Figura 3.4 - Configuração MIMO 2x2.	37
Figura 3.5 - Codificação espaço-tempo.	37
Figura 3.6 - Multiplexação espacial.	38
Figura 3.7 - Sistema MU-MIMO.	38
Figura 3.8 - Espectro de frequência FDM tradicional e OFDM.	39
Figura 3.9 – Composição OFDMA.	40
Figura 3.10 - Comparação entre OFDMA e SC-FDMA.	40
Figura 3.11 - Diagrama de blocos para geração de um sinal SC-FDMA.	41
Figura 3.12 - Topologia <i>Evolved Packet System</i> (EPS).	42
Figura 3.13 - Arquitetura de protocolos.	45
Figura 3.14 - Estrutura de canais LTE.	50
Figura 3.15 - Transmissão de dados em uma rede LTE.	51
Figura 3.16 - Rede mista simplificada LTE e 2G/3G.	53
Figura 4.1 – Divisão da faixa de frequência.	57
Figura 5.1 - Agregação de portadoras LTE-A.	65
Figura 5.2 - Estrutura de transmissão LTE-A.	66
Figura 5.3 - Dispositivo móvel para testes na rede 5G.	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Variação de parâmetros com o tipo de terreno.....	60
Tabela 4.2 – Resultados obtidos.....	62
Tabela 5.1 – Metas de eficiência média do espectro.....	64

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Diferentes famílias da terceira geração.	29
Quadro 3.1 - Estrutura de canais.	49
Quadro 3.1 - Estrutura de canais (continuação).	50
Quadro 4.1 - Cronograma de implantação do LTE.	56
Quadro 4.2 - Parâmetros utilizados para os cálculos.	61

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1 - Evolução da rede 3G no Brasil.	29
Gráfico 3.1 - Evolução da rede 4G no Brasil.	33
Gráfico 4.1 – Velocidade média das redes LTE.....	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1G	Primeira geração de celulares
2,5G	Geração intermediária de celulares
2G	Segunda geração de celulares
3G	Terceira geração de celulares
3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
4G	Quarta geração de celulares
5G	Quinta geração de celulares
AM	<i>Acknowledged Mode</i>
AMPS	<i>Advanced Mobile Phone System</i>
Anatel	Agência Nacional de Telecomunicações
ARFCN	<i>Absolute Radio Frequency Channel Number</i>
ARPA	<i>Advanced Research Projects Agency</i>
ARQ	<i>Automatic Repeat reQuest</i>
BCCH	<i>Broadcast Control Channel</i>
BCH	<i>Broadcast Channel</i>
CA	<i>Carrier Aggregation</i>
CC	<i>Component Carrier</i>
CCCH	<i>Common Control Channel</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CDMA2000 1X	<i>1x Radio Tansmission Technology</i>
CERN	<i>Conseil Européen pour La Recherche Nucléaire</i>
CS	<i>Circuit Switch</i>
CSFB	<i>Circuit Switch Fallback</i>
DAMPS	<i>Digital AMPS</i>
DCCH	<i>Dedicated Control Channel</i>
DeNB	<i>Donor eNB</i>
DL-SCH	<i>Downlink Shared Channel</i>
DTCH	<i>Dedicated Traffic Channel</i>
EDGE	<i>Enhanced Data Rates for GSM Evolution</i>
eNodeB	<i>Evolved NodeB</i>
EPC	<i>Evolved Packet Core</i>

EPS	<i>Evolved Packet System</i>
eUTRAN	<i>Evolved Universal Terrestrial Access Network</i>
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
FDD	<i>Frequency Division Duplex</i>
FDM	<i>Frequency Division Multiplex</i>
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
Fermilab	<i>Fermi National Accelerator Laboratory</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
GGSN	<i>Gateway GPRS Support Node</i>
GMSC	<i>GPRS MSC Server</i>
GMSK	<i>Gaussian Minimum Shift Keying</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Services</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
HARQ	<i>Hybrid Automatic Repeat reQuest</i>
HSDPA	<i>High Speed Downlink Packet Access</i>
HSPA	<i>High Speed Packet Access</i>
HSS	<i>Home Subscriber Server</i>
HSUPA	<i>High Speed Uplink Packet Access</i>
HTML	<i>Hyper Text Markup Language</i>
HTTP	<i>Hyper Text Transfer Protocol</i>
IFFT	<i>Inverse Fast Fourier Transform Fourier</i>
LOS	<i>Line of Sight</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
LTE-A	<i>LTE Advanced</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
MCCH	<i>Multicast Control Channel</i>
MCH	<i>Multicast channel</i>
MGW	<i>Media GateWay</i>
MIMO	<i>Multiple-Input Multiple-Output</i>
MME	<i>Mobility Management Entity</i>
MSC	<i>Mobile Switching Center</i>
MTCH	<i>Multicast Traffic Channel</i>
MU-MIMO	<i>Multi-User MIMO</i>
NAS	<i>Non-Access-Stratum</i>

NCP	<i>Network Control Protocol</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplex</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i>
PAPR	<i>Peak-to-Average Power Ratio</i>
PBCH	<i>Physical Broadcast Channel</i>
PCCH	<i>Paging Control Channel</i>
PCFICH	<i>Physical Control Format Indicator Channel</i>
PCH	<i>Paging Channel</i>
PCRF	<i>Policy Control and Charging Rules Functions</i>
PCS	<i>Personal Communications System</i>
PDCCH	<i>Physical Downlink Control Channel</i>
PDSCH	<i>Physical Downlink Shared Channel</i>
P-GW	<i>Packet Data Network Gateway</i>
PHICH	<i>Physical Hybrid ARQ Indicator Channel</i>
PHY	Camada física
PMCH	<i>Physical Multicast Channel</i>
PNBL	Programa Nacional de Banda Larga
PRACH	<i>Physical Random Access Channel</i>
PS	<i>Packet Switch</i>
PSK	<i>Phase Shift – Keying</i>
PUCCH	<i>Physical Uplink Control Channel</i>
PUSCH	<i>Physical Uplink Shared Channel</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RACH	<i>Random Access Channel</i>
RAT	<i>Radio Access Technology</i>
RLC	<i>Radio Link Control</i>
RN	<i>Relay Node</i>
RNP	Rede Nacional de Pesquisa
RRC	<i>Radio Resource Control</i>
S1	Interface entre eNodeB e EPC
SAE	<i>Service Architecture Evolution</i>
SC-FDMA	<i>Single Carrier Frequency Division Multiple Access</i>

SDUs	<i>Service Data Units</i>
SGSN	<i>Serving GPRS Support Node</i>
S-GW	<i>Serving Gateway</i>
SIM Card	<i>Subscriber Identity Module Card</i>
SUI	<i>Stanford University Interin</i>
SU-MIMO	<i>Single User MIMO</i>
TCP/IP	<i>Transmission Control Protocol/Internet Protocol</i>
TDD	<i>Time Division Duplex</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
TIA	<i>Telecommunications Industry Association</i>
TM	<i>Transparent Mode</i>
TTI	<i>Trasmission Time Interval</i>
UE	<i>User Equipament</i>
UL-SCH	<i>Uplink Shared channel</i>
UM	<i>Unacknowledged Mode</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications Service</i>
VLR	<i>Visitor Location Register</i>
VoIP	<i>Voice over IP</i>
WCDMA	<i>Wideband Code Division Multiple Access</i>
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>
WWW	<i>World Wide Web</i>
X2	<i>Interface entre eNodeB</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
2	RETROSPECTIVA DOS SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO.....	19
2.1	SURGIMENTO DA INTERNET	19
2.1.1	A internet no Brasil.....	21
2.2	EVOLUÇÃO NA COMUNICAÇÃO MÓVEL.....	22
2.2.1	A primeira geração 1G	22
2.2.1.1	O sistema <i>Advanced Mobile Phone System</i> (AMPS).....	22
2.2.2	A segunda geração 2G	23
2.2.2.1	O sistema <i>Time Division Multiple Access</i> (TDMA)	24
2.2.2.2	O sistema <i>Code Division Multiple Access</i> (CDMA).....	24
2.2.2.3	O sistema <i>Global System for Mobile Communications</i> (GSM)	25
2.2.3	A geração intermediária 2,5G.....	26
2.2.3.1	<i>General Packet Radio Services</i> (GPRS)	27
2.2.3.2	<i>Enhanced Data Rates for GSM Evolution</i> (EDGE)	27
2.2.3.3	CDMA2000 1X.....	28
2.2.4	A terceira geração 3G	28
2.2.4.1	<i>Universal Mobile Telecommunications Service</i> (UMTS)	29
2.2.4.2	CDMA 1xEV (<i>Evolution</i>)	30
2.2.4.3	<i>High Speed Packet Access</i> (HSPA).....	31
3	A QUARTA GERAÇÃO (4G).....	32
3.1	TECNOLOGIA ADOTADA.....	33
3.2	CONCEITOS BÁSICOS	34
3.2.1	Modulação adaptativa	34
3.2.1.1	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i> (QAM).....	35
3.2.1.2	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i> (QPSK).....	36
3.2.2	<i>Multiple-Input Multiple-Output</i> (MIMO)	36
3.2.3	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i> (OFDMA)	38
3.3	ARQUITETURA.....	41

3.3.1	<i>User Equipament (UE)</i>	42
3.3.2	<i>Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (eUTRAN)</i>	42
3.3.2.1	<i>Evolved NodeB (eNodeB)</i>	43
3.3.3	<i>Evolved Packet Core (EPC)</i>	43
3.4	ARQUITETURA DE PROTOCOLOS	44
3.4.1	<i>Packet Data Convergence Protocol (PDCP)</i>	45
3.4.2	<i>Radio Link Control (RLC)</i>	46
3.4.3	<i>Medium Access Control (MAC)</i>	46
3.4.4	A camada PHY	47
3.4.5	<i>Radio Resource Control (RRC)</i>	47
3.4.6	<i>Non-Access-Stratum (NAS)</i>	47
3.5	ESTRUTURA DE CANAIS	48
3.6	TRANSMISSÃO	51
3.7	CHAMADAS DE VOZ E SMS NO LTE	52
3.7.1	<i>Circuit Switch Fallback (CSFB)</i>	52
4	DIFICULDADES NA IMPLANTAÇÃO DA REDE 4G	54
4.1	COBERTURA	56
4.2	A CARÊNCIA DE FIBRA ÓPTICA	56
4.3	FREQUÊNCIA DE OPERAÇÃO	57
4.3.1	Modelos de propagação	58
4.3.1.1	O modelo <i>Stanford University Interin</i> (SUI)	59
5	O FUTURO DAS REDES 4G	63
5.1	LTE <i>ADVANCED</i> (LTE-A)	63
5.1.1	Requisitos	64
5.1.2	Panorama geral	64
5.2	A QUINTA GERAÇÃO 5G.....	66
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	68

1 INTRODUÇÃO

O modo como o usuário final da telefonia móvel vem utilizando o serviço teve uma mudança significativa ao longo dos anos. Antes utilizada apenas como um telefone “fora de casa”, agora é vista como uma extensão de um computador pessoal englobando diversas funções seja para trabalho ou para entretenimento. Em razão disso, o volume e a necessidade de maiores velocidades de transmissão de dados só vem crescendo com o passar do tempo, o que impulsionou o desenvolvimento de novas tecnologias de comunicação móvel e tornou a busca por maiores taxas de transmissão uma constante.

Motivado pela tendência de crescimento do número de usuários com acesso às novas tecnologias de comunicação móvel, esse trabalho apresenta as tecnologias relacionadas à geração atual de celulares (4G), bem como as tecnologias anteriores que possibilitaram que se chegasse ao nível de segurança e eficiência da rede 4G.

O presente trabalho foi estruturado em seis capítulos. O primeiro capítulo traz uma introdução sobre o tema e a motivação do trabalho.

O segundo capítulo apresenta a evolução dos padrões celulares desde o surgimento do primeiro aparelho até o aparecimento dos *smartphones* na terceira geração, bem como o desenvolvimento da internet.

O terceiro capítulo é dedicado à quarta geração de celulares e sua arquitetura e conceitos que permitem alcançar velocidades ainda maiores.

O quarto capítulo foca nos desafios da implementação das redes 4G no Brasil.

O quinto capítulo mostra o futuro das redes de quarta geração e as tecnologias que estão em desenvolvimento ou em fase de implantação.

Por fim, o sexto capítulo apresenta as conclusões e análises especialmente sobre a implementação e os pontos críticos das redes de quarta geração no Brasil.

2 RETROSPECTIVA DOS SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO

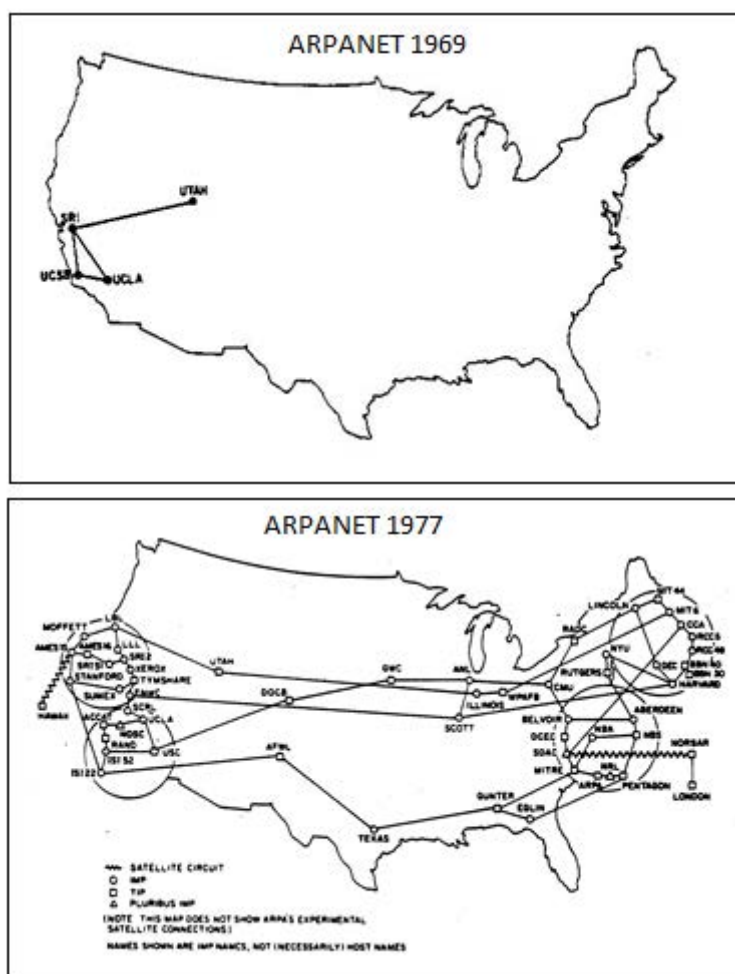
2.1 SURGIMENTO DA INTERNET

O primeiro passo para o desenvolvimento da internet utilizada atualmente, foi dado no auge da Guerra Fria, em 1960. Com o objetivo de evitar que informações fossem perdidas em um possível ataque da antiga União Soviética (atual Rússia), pesquisas militares levaram ao desenvolvimento da ARPANET, criada pela *Advanced Research Projects Agency* (ARPA), possibilitando que algumas universidades e institutos americanos tivessem seus computadores interligados através de uma rede. A ARPANET funcionava com o protocolo *Network Control Protocol* (NCP) que controlava a comunicação entre os computadores e incluía um sistema de chaveamento de pacotes, no qual as informações eram fragmentadas em pacotes menores com informações que possibilitavam a junção dos mesmos ao final da transmissão.

A partir de 1970, com a diminuição das tensões da Guerra Fria, houve a liberação do desenvolvimento e consequentemente o uso da internet para fins não militares. Com a rede em expansão, como mostra a Figura 2.1, o número de usuários dificultava a administração da rede. Por isso, em 1984, a ARPANET foi dividida em duas novas redes: a MILNET que era utilizada para fins militares e a nova ARPANET utilizada para fins científicos.

Com a popularização da rede, o protocolo NCP, que se limitava a controlar a comunicação entre os computadores sem corrigir possíveis falhas de envio, ficou obsoleto e surgiu a necessidade de trocar o protocolo de comutação. E então foi criado, por Vint Cerf e sua equipe, o *Transmission Control Protocol/Internet Protocol* (TCP/IP). Esse padrão de comunicação é dividido em camadas e está presente na transmissão de dados até os dias atuais e entre outras vantagens, qualquer dado transmitido erroneamente é rapidamente reenviado. O protocolo TCP/IP foi oficializado como padrão da ARPANET apenas em 1983.

Figura 2.1 - Expansão da rede ARPANET.



Fonte: (PRESS, 2015)

Paralelamente ao desenvolvimento da ARPANET, surgia também o correio eletrônico, o qual viria a ser o instrumento mais utilizado. As tentativas de enviar mensagens pela rede já tinham acontecido, mas foi o engenheiro Ray Tomlinson o responsável pela criação do SNDMSG, um programa que permitia a utilização ordenada das mensagens com um protocolo de transferência de arquivos, o CYPNET, possibilitando a transmissão em rede. Algum tempo depois o símbolo @ foi incorporado ao endereço de email com a finalidade de separar o nome de usuário e seu servidor, assim como é atualmente (KLEINA, 2011).

A década de 1990 foi marcada pelo uso da Internet em grande escala pela população em geral e por uma grande invenção que ampliaria e revolucionaria o uso da rede. Em 1989, Tim Berners-Lee, cientista do *Conseil Européen pour La Recherche Nucléaire* (CERN) em Gênova, desenvolveu a *World Wide Web* (WWW), com a finalidade de permitir a colaboração mútua entre cientistas de diversas universidades, juntamente com o protocolo *Hyper Text*

Transfer Protocol (HTTP) e a linguagem *Hyper Text Markup Language* (HTML) dando novas aparência e funcionalidades à rede.

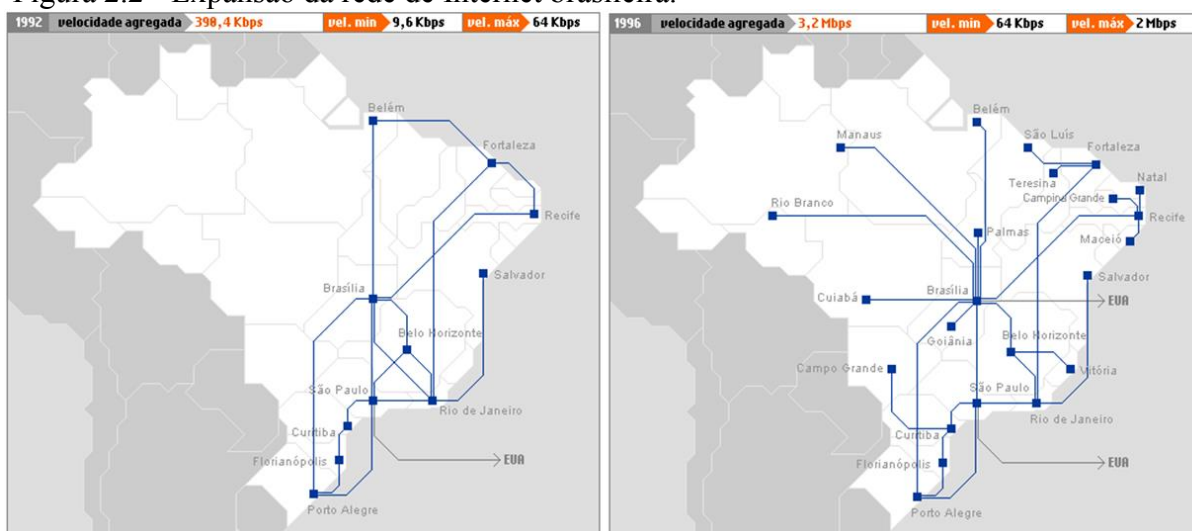
2.1.1 A internet no Brasil

Com a rede ganhando maior abrangência, no final da década de 1980 ela alcançou o território brasileiro o primeiro contato. A primeira conexão foi entre a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e o *Fermi National Accelerator Laboratory* (Fermilab) nos Estados Unidos. Era uma ligação ponto a ponto feita através de uma linha telefônica com um cabo submarino e dava início ao primeiro *backbone* (espinha dorsal) nacional (ARRUDA, 2011).

Em 1990 o Ministério da Ciência e Tecnologia criou a Rede Nacional de Pesquisa (RNP), presente ainda hoje, com a finalidade de construir uma infraestrutura nacional de rede internet de âmbito acadêmico e disseminar o seu uso no país (RNP, 2015).

Durante algum tempo a conexão FAPESP – Fermilab foi a única forma de ligação entre o Brasil e o mundo e a fundação ficou responsável pela distribuição dos números de IP e pela administração do domínio “.br”. A partir daí, a rede em território nacional expandiu-se e surgiram conexões entre universidades em São Paulo, Rio de Janeiro, Rio Grande do Sul e Minas Gerais e, em 1992, a RNP já estava presente em 10 estados e no Distrito Federal, como apresentado na Figura 2.2.

Figura 2.2 - Expansão da rede de Internet brasileira.



Fonte: (RNP, 2015)

Em maio de 1995, a internet deixou o seu uso estritamente acadêmico e passou a ser comercializada para o público em geral, inicialmente pela EMBRATEL. E esse passo foi essencial para a implantação da rede em larga escala no país (ARRUDA, 2011).

2.2 EVOLUÇÃO NA COMUNICAÇÃO MÓVEL

A ideia de criar algo que permitisse a comunicação entre telefones sem fio surgiu pela primeira vez em 1947, entretanto a tecnologia conhecida na época não permitia que a ideia se tornasse realidade. De 1947 até 1973 muitas empresas realizaram pesquisas nessa área, mas a Motorola foi a primeira a apresentar o protótipo nesse mesmo ano. O modelo, não disponível para venda, foi chamado de *DynaTAC* e somente 10 anos após o primeiro teste, em 1983, a Motorola lançaria o *DynaTAC 8000x*, primeiro modelo comercial nos EUA (JORDÃO, 2009).

Os primeiros telefones celulares não eram tão portáteis e chegavam a pesar aproximadamente 1 kg e medir quase 30 cm. Por esse motivo, eram comumente desenvolvidos para serem instalados em carros. Ao longo dos anos as dimensões foram diminuindo, os preços se popularizando e a cada nova geração de celulares novas funções eram atribuídas e diferentes tecnologias de transmissão descobertas. Nos itens a seguir, são explicadas as peculiaridades de cada uma dessas gerações, bem como as suas novidades.

2.2.1 A primeira geração 1G

A primeira geração tem como principal característica o uso de sistemas analógicos com a preocupação de transmitir apenas voz. Essa transmissão utilizava a comutação por circuito e fazia o uso da tecnologia *Frequency Division Multiple Access* (FDMA) que foi adotada como padrão pelo sistema *Advanced Mobile Phone System* (AMPS).

2.2.1.1 O sistema *Advanced Mobile Phone System* (AMPS)

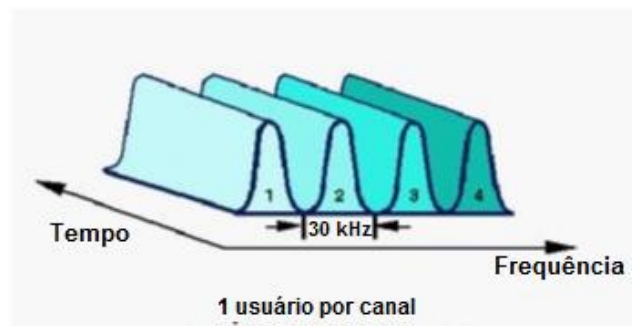
O AMPS foi desenvolvido pela *Bell Labs* em 1979 nos Estados Unidos e foi o principal sistema analógico usado para comunicações móveis, chegando ao Brasil em 1991. Por ser analógico poderia assumir quaisquer valores, e por essa razão, havia muito ruído durante as chamadas uma vez que o sistema poderia interpretá-lo como parte do sinal de voz.

O AMPS operava na faixa de 800 MHz, tanto nos EUA quanto aqui no Brasil, com 832 canais para cada banda de transmissão e recepção, sendo cada um deles com 30 kHz de largura e modulados em frequência (FM). Dentre esses 832 canais havia os canais de controle para o gerenciamento do sistema. Os canais de transmissão utilizavam as faixas de 824 a 849 MHz e os canais de recepção utilizavam as faixas de 869 a 894 MHz.

O método de acesso aos canais era o FDMA que consiste em um canal de voz associado a uma única portadora, como mostra a Figura 2.3. Isso significa que ao iniciar uma chamada, o usuário ocupa aquele canal até que a comunicação termine. Embora o AMPS já contasse com *handoff*¹ e *roaming*² havia uma carência no quesito segurança da rede. Os dados não possuíam criptografia e poderiam ser facilmente interceptados.

Devido às falhas de segurança e com o aumento do número de usuários, levando a capacidade do sistema ao limite, um novo caminho seria aberto para o desenvolvimento da segunda geração.

Figura 2.3 - Modo de acesso FDMA.



Fonte: (MACHADO, 2015)

2.2.2 A segunda geração 2G

A segunda geração deixa para trás a transmissão analógica e inicia a transmissão digital. Além disso, os aparelhos celulares passam a ter um *design* mais portátil, visor com imagens coloridas e novos serviços, como o *Short Message Service* (SMS) e as mensagens multimídia, são apresentados aos usuários.

A qualidade das chamadas teve uma melhora significativa e em relação à segurança, a rede começava a ter criptografia digital e a criação do *Subscriber Identity Module* (SIM Card)

¹ Técnica utilizada para permitir que uma comunicação em andamento não seja interrompida durante a movimentação do usuário.

² Capacidade de um usuário de uma rede de celular obter conectividade em áreas diferentes daquela em que ele é assinante do serviço.

para a identificação e autenticação do usuário. A primeira tecnologia 2G implantada no Brasil foi o *Time Division Multiple Access* (TDMA), logo em seguida o *Code Division Multiple Access* (CDMA) que evoluiu para o *Global System for Mobile Communications* (GSM).

2.2.2.1 O sistema *Time Division Multiple Access* (TDMA)

O sistema TDMA surgiu como uma forma de aumentar a capacidade do sistema anterior mantendo a compatibilidade com a arquitetura já utilizada. Por esse motivo, inicialmente foi chamado de DAMPS ou Digital AMPS sendo padronizado como TDMA padronizado pela *Telecommunications Industry Association* (TIA) como IS-136. Assim sendo, o TDMA manteve as características do AMPS como número de canais, divisão de faixas de frequência de transmissão e recepção com a diferença de cada canal com largura de faixa de 30 kHz seria dividido em pequenos intervalos de tempos (*slots*), possibilitando que um mesmo canal fosse ocupado simultaneamente por até três usuários, como mostra a Figura 2.4.

Figura 2.4 - Modo de acesso TDMA.



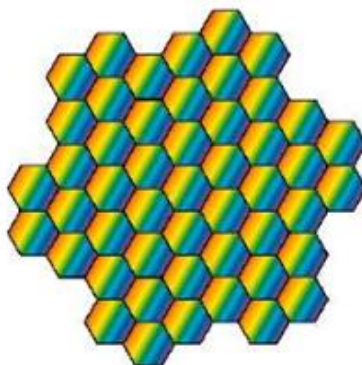
Fonte: (MACHADO, 2015)

2.2.2.2 O sistema *Code Division Multiple Access* (CDMA)

Ainda buscando um meio que permitisse a expansão da rede, a empresa americana Qualcomm desenvolveu o método CDMA que foi padronizado pela TIA como IS-95 em 1993. Desenvolvido para manter a compatibilidade com os sistemas anteriores, a fim de facilitar a evolução das outras redes, o CDMA foi o primeiro a utilizar a técnica do espalhamento espectral (*spread spectrum*), como na Figura 2.5, técnica essa que fora utilizada em transmissões militares, e consiste em utilizar toda a largura de banda disponível (1,25 MHz) para um canal. Neste caso, os usuários poderiam utilizar o mesmo canal e o mesmo *slot*

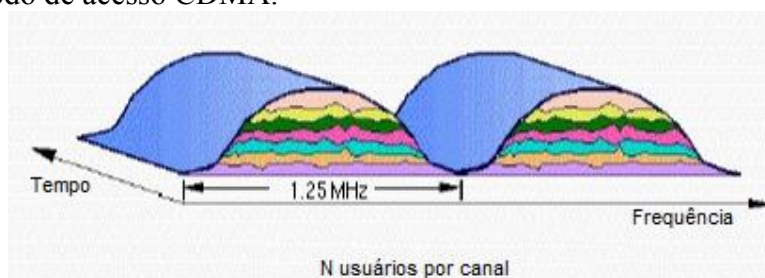
de tempo, apresentado na Figura 2.6, e a diferenciação é feita através de códigos especiais associados a cada transmissão. Cada ligação recebe um código específico, de modo que ele não seja repetido para ligações diferentes, permitindo a separação eficiente entre todas as chamadas que estão utilizando a mesma banda.

Figura 2.5 - Padrão de células CDMA.



Fonte: (MACHADO, 2015)

Figura 2.6 - Modo de acesso CDMA.



Fonte: (MACHADO, 2015)

Como o CDMA propõe a transmissão de sinais com a mesma potência, surgiu então o *Near-Far Problem* que refere-se à distância entre a estação base e o aparelho celular. Para evitar que o sinal recebido de um usuário perto da estação mascare o de um outro que está longe, foi necessário que os aparelhos tivessem um ajuste fino de potência capaz de identificar essas diferenças de distância e fazer os ajustes nos níveis de potência.

2.2.2.3 O sistema *Global System for Mobile Communications* (GSM)

Na Europa havia muitos padrões analógicos e incompatíveis entre si e em busca de unificar o sistema, criou-se então o *Groupe Spéciale Mobile* (GSM) que mais tarde se tornaria um sistema mundial e em 1989 passou a ser chamado de *Global System for Mobile Communications*, mantendo a mesma sigla. Do ponto de vista do usuário, a tecnologia GSM

marca o início do uso do *SIM Card* que é um dispositivo de memória que armazena informações tais como o número de identificação do usuário, as redes e países onde o assinante está habilitado a receber serviços, chaves privadas e outras informações específicas.

Inicialmente foi projetado para operar na frequência de 900 MHz, por uma solicitação do Reino Unido foi adaptado para a frequência de 1800 MHz chamado de DCS1800 e posteriormente foi feita outra adaptação do GSM para a faixa de 1900 MHz com a finalidade de atender aos requisitos do *Personal Communications System* (PCS) americano e ficou conhecido como PCS1900.

Atualmente opera também na frequência de 850 MHz e utiliza uma combinação das técnicas de FDMA e TDMA em uma portadora de RF com largura de banda de 200 kHz que é dividida em oito *slots* de tempo utilizando TDMA, como apresentado na Figura 2.7. Isso permitiu que para uma mesma banda, até oito usuários realizassem chamadas simultaneamente. Para cada par de frequência portadora nos enlaces direto e reverso é atribuído um número designado por *Absolute Radio Frequency Channel Number* (ARFCN – Número Absoluto de Canal de RF).

Figura 2.7 - Distribuição de canais na tecnologia GSM.



Fonte: (MACHADO, 2015)

O padrão GSM foi adotado mundialmente e ainda é utilizado atualmente. No quesito segurança, o padrão é bastante robusto uma vez que cada *slot* de tempo é criptografado com códigos que são modificados a cada chamada, dificultando a interceptação de dados.

2.2.3 A geração intermediária 2,5G

A transição entre a segunda e a terceira geração foi marcada pela mudança no modo de comutação que antes era feito por circuitos e a partir dessa geração seria feito por pacotes, a mesma técnica de transmissão adotada pelo IP do protocolo TCP/IP. Nesta geração foram desenvolvidas as tecnologias *General Packet Radio Services* (GPRS), *Enhanced Data Rates*

for GSM Evolution (EDGE) e 1x Radio Transmission Technology (CDMA2000 1X) que são apresetadas nos itens que seguem.

2.2.3.1 General Packet Radio Services (GPRS)

O GPRS é um serviço oferecido pelas operadoras que provê a transmissão de pacotes e ele surgiu devido à necessidade crescente do uso da internet em aparelhos móveis, o que não era suportado pela rede GSM. Esses pacotes de dados são enviados através de múltiplos *slots* de tempo, os quais são alocados conforme a demanda dos pacotes enviados ou recebidos, permitindo que os canais não fiquem reservados.

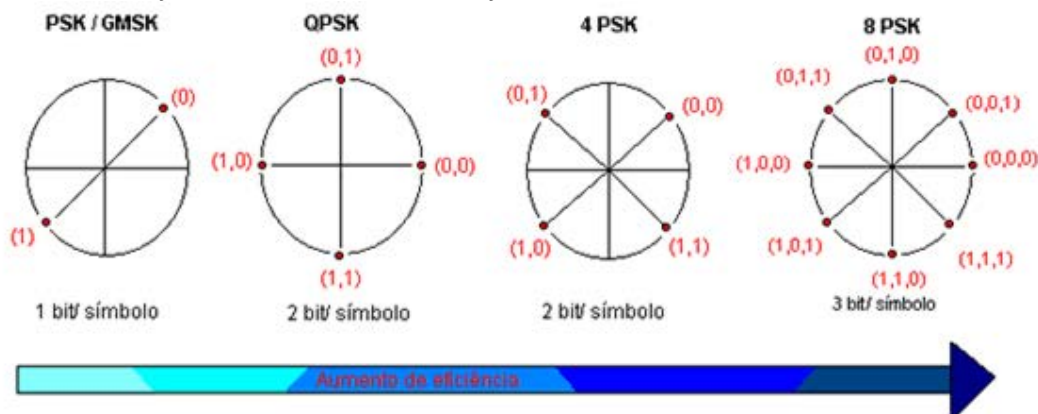
Esse tipo de comunicação trouxe a possibilidade de que o assinante só pagasse pelos dados e não pelo tempo de permanência no ar em que se faz a conexão e nem pelo tempo de carregamento. A arquitetura GPRS utiliza toda a estrutura já montada na rede GSM, incluindo-se novos elementos de rede e interfaces, além de modificar ou atualizar o *software* de alguns já existentes. Desta forma, a utilização dos recursos da rede pôde ser melhores aplicados elevando as taxas de dados de para 9,6 kbps no padrão GSM para 171,2 kbps.

2.2.3.2 Enhanced Data Rates for GSM Evolution (EDGE)

O EDGE foi desenvolvido para ampliar a capacidade da taxa de transmissão de dados pela interface aérea oferecida pelo GSM/GPRS. Enquanto a tecnologia GSM utiliza um tipo de modulação chamado *Gaussian Minimum Shift Keying* (GMSK), o padrão EDGE utiliza uma modulação baseada no 8PSK, que aumenta em três vezes a taxa de bits por símbolo, aumentando assim a capacidade de transmissão do canal, conforme a Figura 2.8.

A rede EDGE foi implantada a partir de pequenas modificações na rede já disponível GSM/GPRS, sendo necessárias algumas atualizações de *software* para possibilitar o funcionamento das modulações GMSK e 8PSK.

Figura 2.8 - Modulações usadas em comunicações móveis.



Fonte: (SOARES, M., 2003)

2.2.3.3 CDMA2000 1X

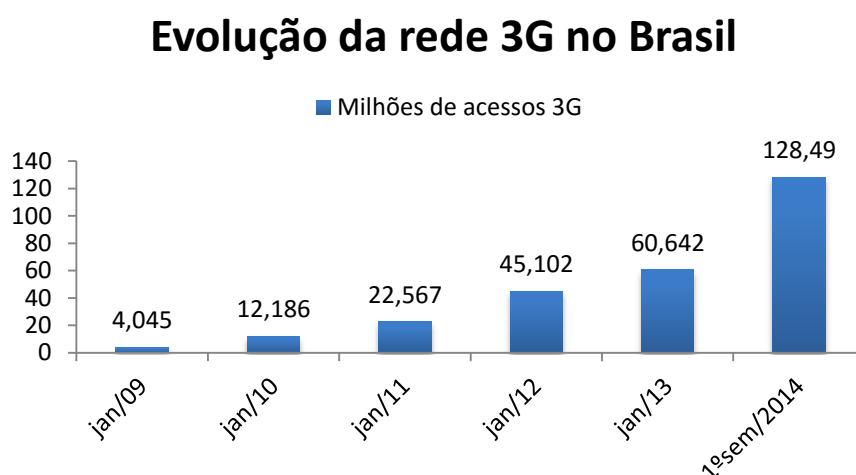
O CDMA2000 1X, que também é conhecido como *1x Radio Transmission Technology* (CDMA 1xRTT) tem como base o padrão de comunicação CDMA, e é considerado uma evolução do CDMAOne da segunda geração. Embora fosse compatível com os sistemas de voz e podendo dobrar a velocidade de transmissão de voz, a sua principal função era aumentar a velocidade de transmissão de dados com taxas de transmissão superiores a 144 kbps.

2.2.4 A terceira geração 3G

A terceira geração consolidou o uso de serviços de internet móvel e abriu a era dos *SmartPhones* e *tablets*. Os celulares ganharam novos recursos que aliados à tecnologia dessa geração permitiram a realização de videoconferência, conexão de internet de alta velocidade, economia de energia nos aparelhos. Além disso, com o desenvolvimento dos *modems* portáteis foi possível aproveitar todas as funcionalidades e o bom desempenho da rede 3G sem a necessidade de um aparelho celular.

A tecnologia 3G é amplamente utilizada no Brasil e continua em expansão como mostra o Gráfico 2.1. Para conseguir evoluir para a nova tecnologia, as operadoras precisaram realizar grandes *upgrades* em suas redes existentes, o que levou ao estabelecimento de duas famílias distintas da tecnologia 3G: a *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) e a 3GPP 2 que é apresentado no Quadro 2.1.

Gráfico 2.1 - Evolução da rede 3G no Brasil.



Fonte: (ANATEL, 2015)

Quadro 2.1 – Diferentes famílias da terceira geração.

	UMTS	CDMA 2000
Interface Rádio	WCDMA/HSDPA	EV-DO
Banda por portadora	5 MHz	1,25 MHz
Evolução das operadoras que utilizam	GSM	CDMA
Órgão que define a padronização	3GPP	3GPP2

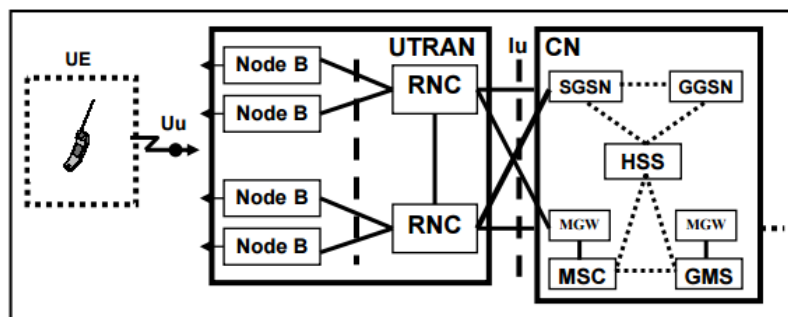
Fonte: (TELECO, 2014)

2.2.4.1 Universal Mobile Telecommunications Service (UMTS)

O UMTS é o termo adotado para designar o padrão de 3ª Geração estabelecido como evolução para operadoras que utilizavam o GSM. Desenvolvido pelo 3GPP, o UMTS utiliza como interface aérea o *Wideband Code Division Multiple Access* (WCDMA), uma banda larga com alta capacidade que pode oferecer serviços com taxas de até 2 Mbps, permitindo, por exemplo, o tráfego multimídia (voz, vídeo e dados). Essa banda utiliza um canal 5 MHz de largura, aperfeiçoando a sua utilização, conseguindo taxas de até 2 Mbps para usuários com pouca mobilidade, e até 144 kbps em situações de alta mobilidade. Isso foi possível porque assumiu-se a hipótese de que o novo sistema seria implantado utilizando novas faixas de frequências a serem adquiridas pelas operadoras, possibilitando a adoção do WCDMA com canais de 5 MHz.

A arquitetura das redes UMTS é dividida em duas partes: o sistema de rádio terrestre UMTS *Radio Access Network* (UTRAN) e a *Core Network* (CN), e inclui o *User Equipment* (UE), como mostra a Figura 2.9.

Figura 2.9 - Arquitetura UMTS.



Fonte: (VALE, 2006)

O UTRAN é composto pelas torres de transmissão, chamadas de NodeBs, responsáveis pela comunicação com os usuários, e é composto também pelos *Radio Network Controller* (RNC), responsável pelo controle dos NodeBs e por sua comunicação com a *Core Network*.

A *Core Network* suporta serviços baseados em comutação de circuitos e comutação de pacotes e tem, basicamente, funções de gerenciamento de tráfego, roteamento, comunicação dentre múltiplos protocolos. É composta pelo *Mobile Switching Center Server* (servidor MSC), pelo GPRS MSC Server (GMSC), pela *Media GateWay* (MGW), pelo *Serving GPRS Support Node* (SGSN), pelo *Gateway GPRS Support Node* (GGSN) e pelo *Home Subscriber Service* (HSS), que possui a base de dados dos usuários locais e provê suporte a outros servidores nos processos de autenticação, autorização e localização de usuários.

2.2.4.2 CDMA 1xEV (*Evolution*)

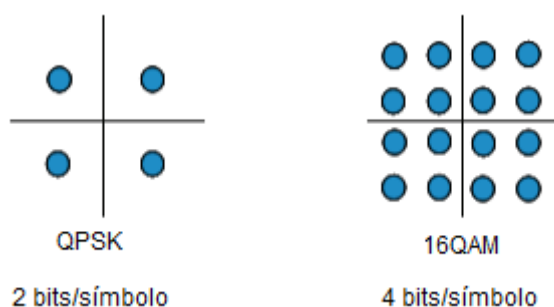
O CDMA 1xEV é a evolução da tecnologia CDMA na terceira geração, e essa evolução foi dividida em duas fases. A primeira, chamada de 1xEV-DO (*Data Only*), foi desenvolvida para operar com uma portadora de 1,25 MHz, ocupando a mesma quantidade de espectro utilizado nos sistemas CDMA anteriores. Além disso, um canal é alocado para transportar somente dados permitindo uma taxa de transmissão de até 2,4 Mbps no *downlink*, no qual os usuários são multiplexados no tempo. Na segunda fase, foi desenvolvido o 1xEV-DV (*Data and Voice*) que permite que dados e voz sejam transportados no mesmo canal.

2.2.4.3 High Speed Packet Access (HSPA)

O HSPA é a junção do *High Speed Downlink Packet Access* (HSDPA) e do *High Speed Uplink Packet Access* (HSUPA) e foram implementados como melhorias da rede UMTS no *downlink* e no *uplink*, ou seja, no recebimento e no envio de dados respectivamente.

O HSPA oferece uma experiência melhorada ao usuário, permitindo enviar e receber *e-mails* com grandes anexos, jogar interativamente em tempo real, receber e enviar imagens e vídeos de alta resolução, fazer *download* de conteúdos de vídeo e de música. Isso foi possível devido à diminuição do intervalo no tempo de transmissão (*Transmission Time Interval* - TTI) e ao aumento da taxa de dados com uso da modulação *Quadrature Amplitude Modulation* (16QAM), como apresentado na Figura 2.10.

Figura 2.10 - Modulações utilizadas no HSPDA.



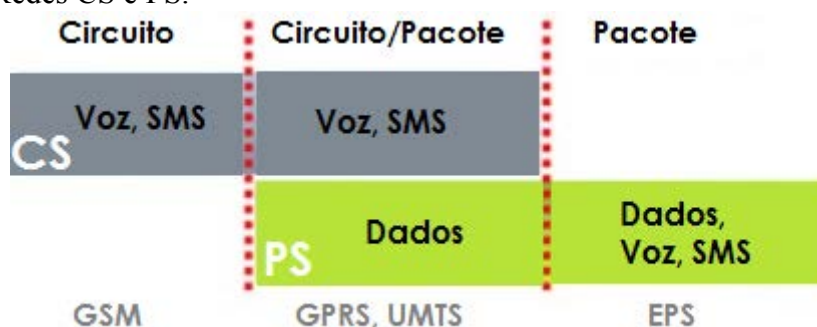
Fonte: (ERICSSON, 2007)

3 A QUARTA GERAÇÃO (4G)

A quarta geração foi desenvolvida com o objetivo de alcançar velocidades de transmissão de dados ainda maiores do que as alcançadas na geração anterior. Além disso, a mudança no comportamento dos usuários, que passaram a utilizar o serviço de dados em detrimento ao serviço de voz, tornou a transmissão de dados prioritária nessa geração.

A evolução do sistema 3G foi desenvolvida pelo 3GPP baseada no uso do *Internet Protocol* (IP) como chave para o transporte de todos os outros serviços. A tendência de que a comutação por circuitos (*circuit switch* – CS) seria substituída pela comutação por pacotes (*packet switch* – PS) já era visível durante a evolução das gerações de tecnologias móveis, e com a escolha de uma quarta geração baseada em IP 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 PS. A Figura 3.1 mostra a evolução de redes baseadas na escolha por CS ou PS.

Figura 3.1 - Redes CS e PS.

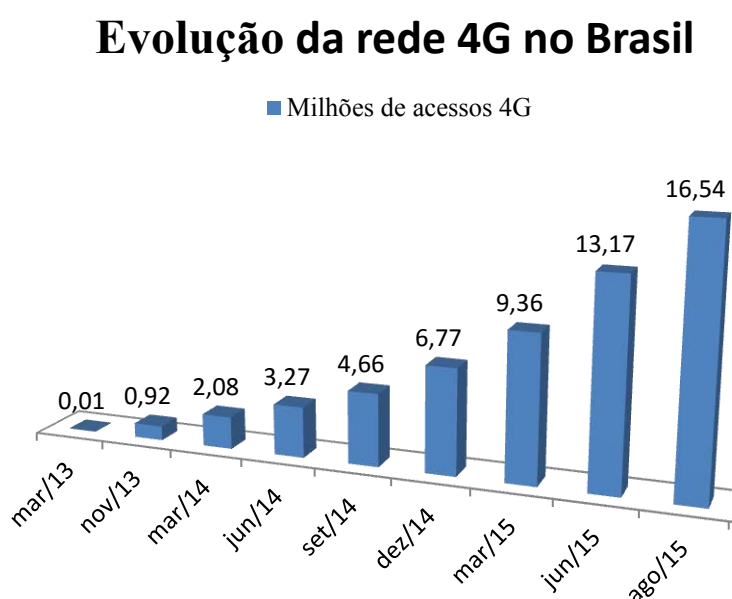


Fonte: (FIRMIN, 2015)

Os fabricantes de celulares têm investido na produção de modelos compatíveis com a nova tecnologia, entretanto o serviço ofertado pelas operadoras ainda não é suficiente para atender à demanda crescente pelo produto, como mostra o Gráfico 3.1.

Neste capítulo são apresentados os padrões utilizados, a arquitetura da rede e toda a estrutura necessária à implementação da rede 4G.

Gráfico 3.1 - Evolução da rede 4G no Brasil.



Fonte: (ANATEL, 2015)

3.1 TECNOLOGIA ADOTADA

Durante o desenvolvimento do 4G, duas tecnologias despontaram como possíveis de serem adotadas. São elas o *Worldwide Interoperability for Microwave Access* (WiMAX), e o *Long Term Evolution* (LTE).

O WiMax está a mais tempo no mercado e foi implementado com base no padrão de redes *Wi-Fi* IEEE 802.16 e inicialmente com o objetivo de prover uma alternativa ao uso de cabos para uma conexão de banda larga, podendo oferecer uma maneira barata de levar a conexão de banda larga a lugares distantes, como propriedades rurais, pois dispensa o investimento em infraestrutura capaz de levar cabos até as casas dos clientes.

O WiMax também possui uma ligeira vantagem de implementação (está a mais tempo no mercado), além do suporte das gigantes *Sprint* e *Intel*. Infelizmente, mesmo embora projetada para altas velocidades, ela vem sofrendo pressão constante por não manter a velocidade esperada na maioria dos testes realizados até agora, fato que indica a falta de maturação da tecnologia (PANKIEWICZ, 2009).

Além de não manter a velocidade esperada durante alguns testes, há ainda o problema da interferência devido às condições climáticas. Em frequências mais elevadas estas interferências são significativas e limitam o raio de alcance dos sinais de transmissão, reduzindo a velocidade de tráfego de dados (PANKIEWICZ, 2009).

Já o LTE surgiu como uma evolução natural do padrão HSPA da terceira geração e foi desenvolvido pelo 3GPP desde o início para ser uma tecnologia de comunicação móvel. Dentre outras vantagens manteve a compatibilidade com as rede implementadas anteriormente e isso permitiria às operadoras uma substituição gradual dos equipamentos.

Baseando-se apenas nas características técnicas, o LTE e o WiMax são similares, já que ambos utilizam o padrão *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) e o protocolo IP. A principal diferença técnica é que o LTE divide a banda de transmissão em dois canais (*downlink* e *uplink*) enquanto o WiMAX usa um único canal para transmissão e recepção.

Se algumas nações dão prosseguimento ao uso das duas tecnologias, estudos de mercado apontam que o LTE pode ganhar de goleada o futuro das telecomunicações. A previsão de mercado da iSuppli para os usuários de internet de alta velocidade já apontavam, em 2011, que em 2014 o número de assinantes de serviços LTE deveria passar dos 303 milhões, ao passo que o WiMAX deve contar com apenas 10% disso, 33,4 milhões (KARASINSKI, L., 2013).

Alguns países, como a Coréia do Sul, adotaram uma rede mista para que os seus habitantes estivessem sempre conectados. Entretanto, a popularidade do LTE, a possibilidade de que as operadoras continuassem a utilizar as redes antigas e futuras inovações na rede, fez com que essa tecnologia tivesse mais adeptos mundialmente. No Brasil o LTE foi a tecnologia adotada para a 4G e por esse motivo, os itens tratados neste capítulo são dedicados ao padrão LTE.

3.2 CONCEITOS BÁSICOS

3.2.1 Modulação adaptativa

O LTE utiliza as modulações: *Quadrature Phase Shift Keying* (QPSK) e *Quadrature Amplitude Modulation* (16QAM e 64QAM) no *downlink* e *uplink*. As modulações são utilizadas de forma adaptativa sendo as mais robustas para ambientes ruidosos, por exemplo, borda da célula e as de maior eficiência espectral para obter taxas de transmissão elevadas. Os itens seguintes mostram o funcionamento de cada uma delas.

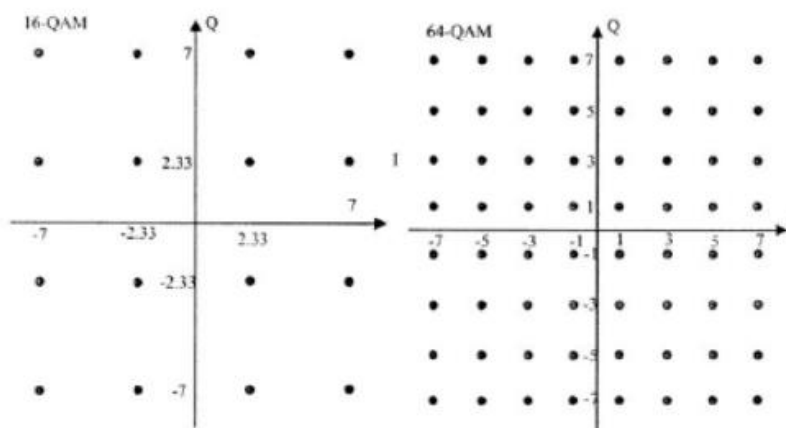
3.2.1.1 Quadrature Amplitude Modulation (QAM)

A modulação QAM é uma combinação entre as modulações *Amplitude Shift Keying* (ASK) e *Phase Shift Keying* (PSK). Sendo assim, há variação de fase e amplitude na onda portadora de acordo com a informação digital a ser transmitida.

Para formar o sinal é utilizada uma portadora que recebe um nível de amplitude Q determinado pela informação a ser transmitida; em seguida a portadora é defasada em 90° e recebe outro nível de amplitude I, determinado pela informação. O sinal QAM é formado a partir da soma desses sinais, através da equação $S(t) = Q \sin(\omega t) + I \cos(\omega t)$. O resultado desse processo pode ser representado por uma constelação, na qual os símbolos são mapeados em um diagrama de fase e quadratura, sendo que cada símbolo apresenta uma distância específica da origem do diagrama que representa a sua amplitude (CAMBOIM, 2011).

De modo a aumentar a eficiência espectral do processo de modulação, diferentes tipos de modulação de amplitude em quadratura são utilizados. No caso do 16QAM, a constelação apresenta 16 símbolos, sendo 4 em cada quadrante do diagrama, o que significa que cada símbolo representa 4 bits. Já o modo 64QAM apresenta 64 símbolos em sua constelação, cada um deles representando 6 bits, como mostra a Figura 3.2.

Figura 3.2 - Diagrama de fase e quadratura 16QAM e 64QAM.



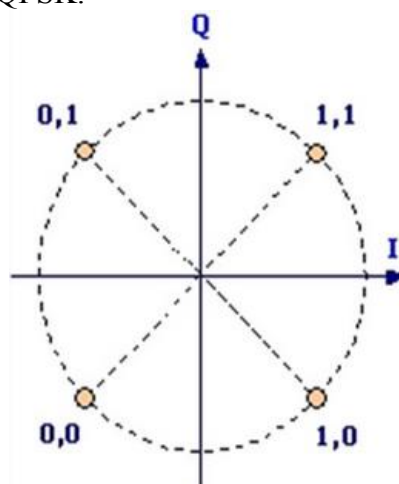
Fonte: (MALBURG, 2004)

Pode-se notar que no modo 16QAM alcança-se uma taxa de transmissão menor do que no modo 64QAM, uma vez que cada símbolo transporta um número menor de bits. Entretanto, a maior distância entre os símbolos no 16QAM dificulta erros de interpretação no receptor durante a detecção de um símbolo, permitindo melhor qualidade de serviço.

3.2.1.2 Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)

A modulação QPSK é uma técnica de modulação derivada do PSK, que varia a fase da onda portadora em função do sinal digital a ser transmitido, porém neste caso, são utilizados parâmetros de fase e quadratura da onda portadora para modular o sinal de informação. Como esta modulação utiliza dois parâmetros, existem mais tipos possíveis de símbolos nesta constelação, o que permite que sejam transmitidos mais bits por símbolo que na modulação PSK. A Figura 3.3 mostra os símbolos gerados nesta modulação (MALBURG, 2004).

Figura 3.3 - Diagrama modulação QPSK.

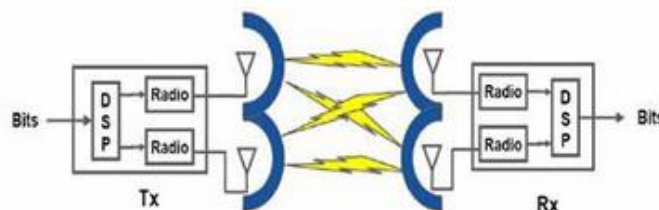


Fonte: (PEREIRA, 2011)

3.2.2 Multiple-Input Multiple-Output (MIMO)

A técnica MIMO consiste em utilizar múltiplas antenas na transmissão e recepção de sinais, permitindo assim, que dados sejam enviados por caminhos diferentes ainda que ocupem a mesma banda de RF ao mesmo tempo, levando às esperadas altas taxas de dados, sem a necessidade de se utilizar banda ou potência adicionais para a transmissão dos sinais. A Figura 3.4 mostra um sistema MIMO utilizando a configuração 2x2.

Figura 3.4 - Configuração MIMO 2x2.



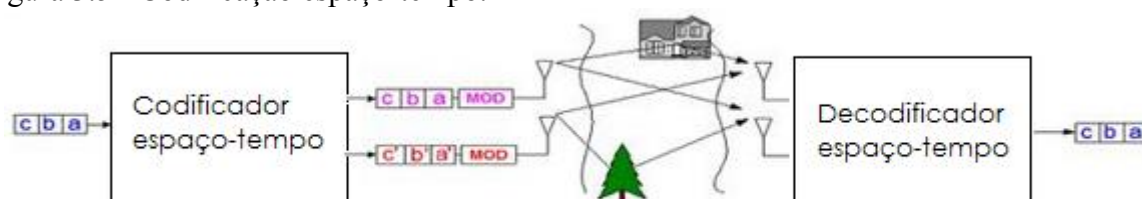
Fonte: (ALMEIDA, 2013)

Além disso, essa foi uma maneira eficiente de superar os limites impostos pela Lei de Shannon. Esta lei mostra que existe um limite de dados que podem ser transmitidos em um canal devido à presença de ruído. Como o sistema MIMO cria vários canais entre emissor e receptor, cada canal individualmente fica limitado, porém o conjunto de canais excede tal limite (GUEDES, 2009).

Esta técnica vem sendo padronizada pelo 3GPP e se tornou um fator determinante para as novas tecnologias móveis devido as altas taxas de *downlink* e *uplink* exigidas. Para que o MIMO tenha a sua capacidade máxima atingida, o 3GPP prevê o uso da codificação espaço-tempo e da multiplexação espacial.

Na codificação espaço-tempo é feita uma cópia do sinal com codificação diferente do sinal original, e ambos os sinais são enviados simultaneamente por antenas distintas, aumentando assim a intensidade do sinal total com o objetivo de diminuir ou eliminar o desvanecimento causado pelo multipercurso, como apresentado na Figura 3.5 Já na multiplexação espacial, os sinais são enviados em vários feixes que exploram o ambiente até chegar ao seu destino final, como mostra a Figura 3.6. As mudanças de percurso, devido à presença de obstáculos no caminho, podem gerar atrasos que são compensados através de algoritmos que se baseiam na reflexão sofrida pelo sinal ao longo do seu percurso. No receptor esses feixes são tratados com filtros que possibilitam a recuperação do sinal original (ALMEIDA, 2013).

Figura 3.5 - Codificação espaço-tempo.



Fonte: (ALMEIDA, 2013)

Figura 3.6 - Multiplexação espacial.



Fonte: (ALMEIDA, 2013)

O MIMO pode ser classificado como *Multi-User* MIMO (MU-MIMO) ou *Single User* MIMO (SU-MIMO). No SU-MIMO um único usuário transmite para o receptor e no MU-MIMO vários usuários transmitem simultaneamente para o receptor. Ambos os recursos podem ser usados tanto no *uplink* quanto no *downlink*. Porém no *uplink* dá-se preferência ao MU-MIMO de forma a reduzir os custos para o usuário e a complexidade do sistema, conforme Figura 3.7.

Figura 3.7 - Sistema MU-MIMO.



Fonte: (FERRAZ, 2012)

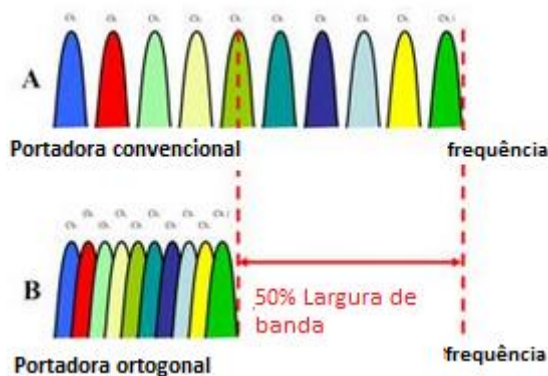
3.2.3 Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA)

Para atingir alta eficiência espectral, bem como permitir a programação eficiente nos domínios do tempo e da frequência, uma abordagem multiportadora para acesso múltiplo foi escolhida pelo 3GPP para a quarta geração (NOHRBORG, 2015).

O OFDMA é um refinamento do *Orthogonal Frequency Division Multiplex* (OFDM) e foi criado com o objetivo de promover o compartilhamento de recursos entre os usuários. A técnica de transmissão de multiplexação por divisões de frequências ortogonais (OFDM) surgiu como uma evolução da *Frequency Division Multiplex* (FDM), porém a OFDM utiliza a sobreposição de portadoras, que são matematicamente ortogonais, enquanto que na FDM utiliza-se a banda de guarda para separá-las. Essa propriedade ajuda a reduzir interferências

causadas por portadoras vizinhas e faz com que sistemas que utilizam o OFDM reduzam em 50% o uso do espectro de frequências, conforme a Figura 3.8.

Figura 3.8 - Espectro de frequência FDM tradicional e OFDM.



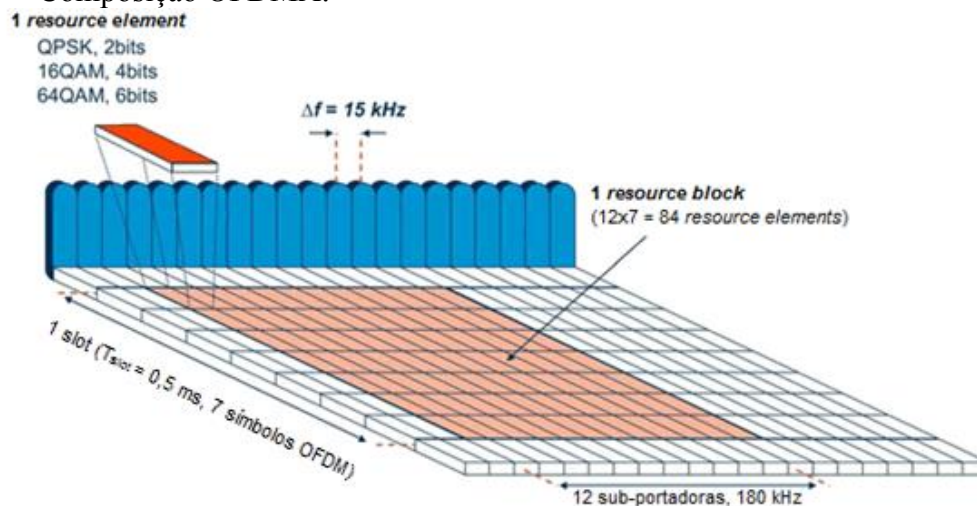
Fonte: (ALMEIDA, 2013)

O OFDM divide a banda de frequência da portadora em pequenas subportadoras espaçadas de 15 kHz, e emprega-se a técnica da transformada rápida inversa de *Fourier* (*Inverse Fast Fourier Transform* - IFFT) na modulação e a transformada rápida de *Fourier* (*Fast Fourier Transform* - FFT) na demodulação dos sinais, onde cada canal de frequência pode ser modulado com QPSK, 16QAM ou 64QAM.

No OFDMA os dados são transmitidos utilizando múltiplas portadoras estreitas simultaneamente, as quais são divididas em grupos de subportadoras com espaçamento regular de 15 kHz cada (Δf), e cada grupo com doze subportadoras, sete símbolos OFDM cada, formam um *resource block*. A duração de um símbolo OFDM é dada por $1/\Delta f + \text{prefixo cíclico}$. O prefixo cíclico padrão é de 4,7 μs , ele é transmitido antes de cada símbolo OFDM como medida de prevenção ao multi-percurso e mantém a ortogonalidade entre as subportadoras, mesmo para um canal de rádio dispersivo no tempo. No LTE existe a possibilidade de escalonamento da banda, variando-a de 1,4 MHz até 20 MHz.

O *resource block* tem uma banda de 180 kHz e 0,5 ms de duração no domínio do tempo (1 slot) e é composto por 84 *resource elements*, como apresenta a Figura 3.9. Nem todos os *resource elements* são alocados para a transmissão de dados, podendo ser utilizados também para outros fins, como por exemplo, medidas de qualidade dos canais de *downlink* ou *uplink*.

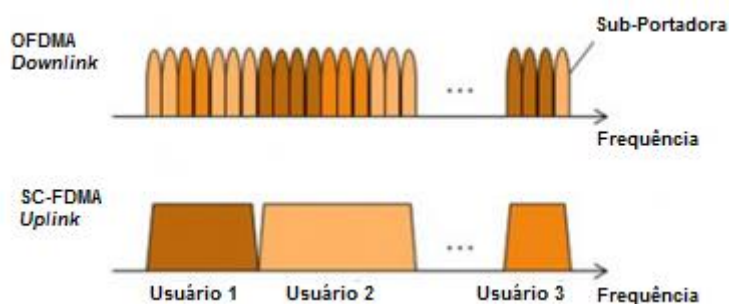
Figura 3.9 – Composição OFDMA.



Fonte: (TELECO, 2009)

Os sinais OFDM têm uma *Peak-to-Average Power Ratio* (PAPR) relativamente alto. O PAPR é dado por $Pot_{pico}/Pot_{méd}$ o que significa que para uma dada potência média, seriam necessários amplificadores de potência caros, pois teriam que ser capazes de lidar com picos significativamente grandes de potência. Sendo assim, um valor alto de PAPR causa ineficiência no consumo de energia para os terminais móveis que desejam transmitir no canal *uplink*, criando assim um obstáculo para sua utilização. Por essa razão, o LTE utiliza o OFDMA apenas no *downlink* e a solução para o *uplink* foi adotar o *Single Carrier Frequency Division Multiple Access* (SC-FDMA) que possui um PAPR menor, como pode ser visto na Figura 3.10. Já o WiMax utiliza o OFDMA tanto no *downlink* como no *uplink* (MOWLA, 2013).

Figura 3.10 - Comparação entre OFDMA e SC-FDMA.

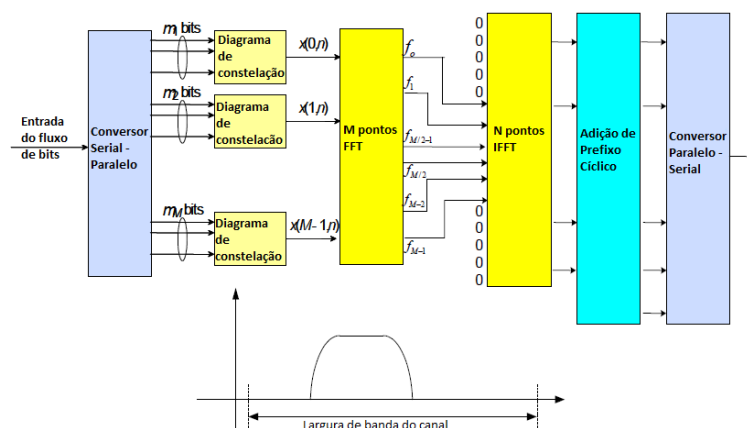


Fonte: (NOHRBORG, 2015)

O SC-FDMA também utiliza os prefixos cíclicos entre os blocos de símbolos a serem transmitidos como intervalo de guarda e para gerar o sinal SC-FDMA utiliza-se a transformada discreta de *Fourier*. Inicialmente os dados são convertidos de serial para

paralelo. Cada bit é modulado e transformado do domínio do tempo para o domínio da frequência através da transformada rápida de *Fourier* e o resultado é mapeado nas subportadoras disponíveis. Após o sinal ser submetido a Transformada Inversa de *Fourier* é adicionado o prefixo cíclico, que é utilizado como um tempo de guarda entre os símbolos. Ao final do processo o sinal é convertido novamente de paralelo para serial. Esse processo pode ser visto na Figura 3.11.

Figura 3.11 - Diagrama de blocos para geração de um sinal SC-FDMA.

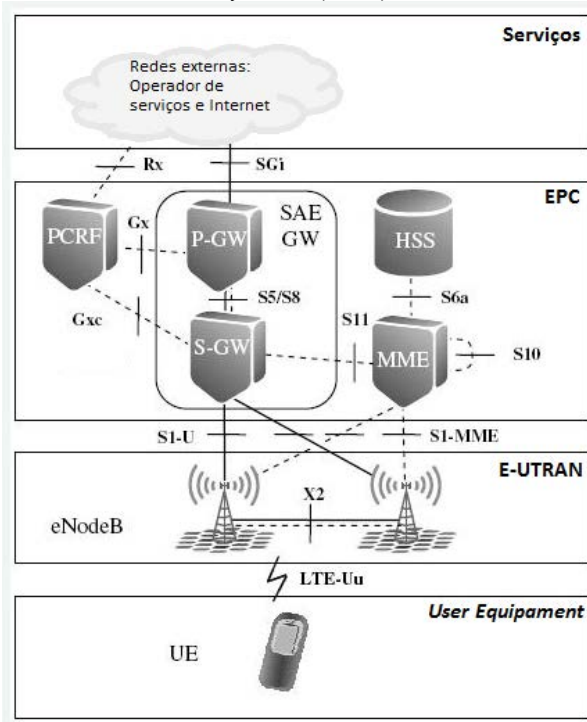


Fonte: (ROHDE & SCHWARZ, 2012)

3.3 ARQUITETURA

O desenvolvimento da arquitetura da 4G foi feito em duas frentes de trabalho, sendo elas o LTE cujo alvo era a nova arquitetura da rede de acesso e interface aérea, e o *Service Architecture Evolution* (SAE) responsável pela evolução da rede de pacotes. Como resultado dessa pesquisa, surgiram a *Evolved Universal Terrestrial Access Network* (eUTRAN) e o *Evolved Packet Core* (EPC), e a combinação de ambos formou o *Evolved Packet System* (EPS), que ainda inclui o *User Equipment* (UE) e uma parte de serviços que prevê a integração da rede LTE com outras redes. A Figura 3.12 apresenta os componentes do EPS, os quais são apresentados nos itens a seguir.

Figura 3.12 - Topologia *Evolved Packet System* (EPS).



Fonte: (ALMEIDA, 2013)

3.3.1 User Equipment (UE)

O UE é o nome dado ao dispositivo móvel do usuário e é composto pelo equipamento propriamente dito e pelo *SIM Card*.

Como o LTE foi desenvolvido de modo que a sua arquitetura fosse mais simples do que as presentes nas gerações anteriores, o UE possui apenas três estados possíveis. São eles o *Detached*, no qual o dispositivo não está registrado na rede, o *Idle* – no qual o móvel está registrado na rede, porém não está enviando nem recebendo dados – e o estado *Connected* – no qual o móvel está em uma conexão ativa.

3.3.2 Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (eUTRAN)

O padrão eUTRAN é composto por estações de radiobase chamadas de *evolved NodeB* (eNodeB) que são interligados através de uma interface chamada X2 e é baseado em OFDMA para o *downlink* e SC-FDMA para o *uplink*. Opera com o *Frequency Division Duplex* (FDD) e com o *Time Division Duplex* (TDD) na mesma plataforma. O FDD faz uso de duas faixas de frequências distintas, onde é possível enviar dados por uma frequência e recebê-los através de

outra. Por sua vez, o TDD só utiliza uma única faixa de frequência, transmitindo e enviando em tempos diferentes. Isso permitiu que houvesse flexibilidade no uso do espectro de frequências. Além disso, suporta o uso de antenas do tipo MIMO e suas possíveis configurações, aumentando a taxa de dados e a eficiência do espectro de frequências.

3.3.2.1 *Evolved NodeB* (eNodeB)

O eNodeB, ou eNB, é o nome dado à estação de rádio base presente na arquitetura EPS responsável pela transmissão e recepção de dados vindos do UE em uma ou mais células. Na quarta geração essa torre de transmissão de sinais ganhou novas funções de processamento, controle de tráfego na interface área assegurando a *Quality of Service* (QoS) para os serviços oferecidos, decisões de *handover* dos UEs, através da comunicação entre os elementos, fazendo uso da interface X2. A interconexão entre os eNodeBs é opcional, entretanto na ausência da mesma é possível que haja perda de pacotes durante o *handover* do usuário. O eNodeB também se conecta com o EPC pela interface chamada de S1.

A eNodeB contém as camadas física (PHY), *Medium Access Control* (MAC), *Radio Link Control* (RLC) e o protocolo de controle de pacotes de dados. Ainda inclui a funcionalidade de compressão de cabeçalho, criptografia, gestão de recursos do rádio, controle de admissão, negociação de QoS no *uplink* e *broadcast* contendo informações da célula.

3.3.3 *Evolved Packet Core* (EPC)

Essa arquitetura de rede foi desenvolvida para permitir a comunicação com outras redes através do protocolo IP, portanto utilizando a comutação por pacotes (*packet switch* – PS) e é também onde estão contidos os principais elementos da rede. O EPC é composto pelo *Mobility Management Entity* (MME), o *Serving Gateway* (S-GW), o *Packet Data Network Gateway* (P-GW), *Home Subscriber Server* (HSS) e o *Policy Control and Charging Rules Functions* (PCRF).

O MME é responsável por funções de gestão de mobilidade, segurança, autorização de serviços, gerenciamento de perfil do usuário, autenticação e suporte ao *handover* entre diferentes eNodeBs e entre diferentes tecnologias, tais como GSM, UMTS. É responsável

também pelo UE em *idle mode* (quando ainda não se tem o estabelecimento de conexões com alguma portadora). O MME também é responsável pela seleção do P-GW quando o UE requer estabelecimento com endereços IP da rede.

O HSS é o responsável por armazenar os dados de assinatura dos usuários. Esses dados são obtidos pelo MME e o HSS os utiliza para autenticação do UE na rede.

O S-GW se ocupa com o plano de usuário, transportando dados IP entre o UE e a internet. Além disso, durante o *handover* entre eNodeBs o S-GW serve como âncora para a mobilidade, encaminhando os pacotes de dados até que o processo de *handover* seja finalizado pelo MME. Já o P-GW tem a tarefa de atribuir endereços de IP para os usuários e controlar a tarifação dos serviços, e é o ponto de interconexão entre o EPC e outras redes externas. O S-GW e o P-GW são logicamente interligados e embora sejam especificados de forma independente pelo 3GPP, na prática eles podem ser combinados em um mesmo equipamento pelos fabricantes.

O PCRF é o elemento de rede responsável pelo *Policy and Charging Control* (PCC – Política e Controle de Carga), ou seja toma decisões provendo um QoS adequado para que os serviços solicitados possam utilizar os recursos apropriados.

3.4 ARQUITETURA DE PROTOCOLOS

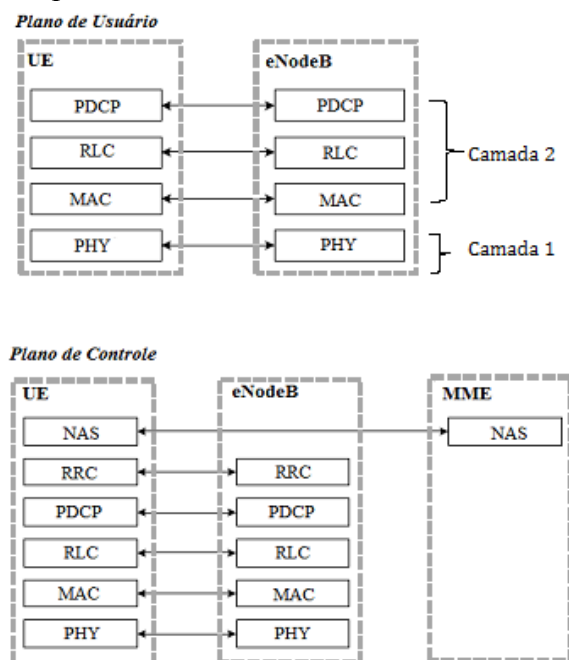
Os protocolos usados na tecnologia LTE foram desenvolvidos para simplificar a arquitetura de protocolos e por isso se baseia no compartilhamento de canais não havendo canais dedicados para trafegar dados para usuários específicos. Esta decisão proporcionou um aumento na eficiência da interface aérea, permitindo que a rede fosse capaz de controlar a utilização dos recursos da interface ar, de acordo com a demanda de cada usuário em tempo real, sem que haja a necessidade de alocação de recursos fixos para cada usuário, independente dos requerimentos necessários.

A arquitetura de protocolos correspondente à camada 2 do Modelo *Open Systems Interconnection* (OSI) é basicamente formada por três subcamadas: a *Packet Data Convergence Protocol* (PDCP), a *Radio Link Control* (RLC) e a *Medium Access Control* (MAC).

O usuário se comunica com a E-UTRAN e com o EPC utilizando protocolos de rádio. Do lado do plano de usuário (*User Plane*), os protocolos utilizados para a comunicação são PDCP, RLC, MAC e PHY. Já no plano de controle (*Control Plane*) são utilizados o protocolo

Radio Resource Control (RRC) para comunicação com a eNodeB e o protocolo *Non-Access-Stratum* (NAS) para comunicação com o MME, como apresenta a Figura 3.13.

Figura 3.13 - Arquitetura de protocolos.



Fonte: (Do autor, 2015)

3.4.1 Packet Data Convergence Protocol (PDCP)

Nesta subcamada ocorre a compressão e descompressão dos cabeçalhos dos pacotes IP que são recebidos e enviados pelo usuário, permitindo que a largura de banda seja utilizada de maneira mais eficiente. Além disso, na PDCP ocorre a criptografia dos dados tanto no plano do usuário quanto no plano de controle.

A PDCP é responsável também por tomada de decisões bastante importantes para o bom funcionamento da rede. É aqui que ocorre a decisão sobre descarte de pacotes, uma vez que congestionamentos de tráfego são corriqueiros em toda a rede e para prevenir atrasos excessivos faz uso de um temporizador para tomar decisão de retransmissão ou até mesmo de descarte de pacotes a fim de atender os requisitos de QoS das aplicações.

3.4.2 *Radio Link Control (RLC)*

Nesta subcamada acontece a segmentação, a remontagem e a ordenação dos dados que serão passados para as subcamadas PDCP ou MAC. A RLC é utilizada para formatar e transportar os dados entre a UE e o eNodeB e para tanto, dispõe de três modos diferentes de confiabilidade para o transporte: o *Acknowledged Mode* (AM), o *Unacknowledged Mode* (UM) e o *Transparent Mode* (TM).

O modo AM tem como principal funcionalidade a retransmissão sendo adequado para serviços que não são transmitidos em tempo real, como arquivos para download. Já o modo UM é utilizado para o transporte de serviços em tempo real, tais como fluxos do tipo *Voice over IP* (VoIP), que são tolerantes a perdas mas não a atrasos. E por fim, o modo TM que é utilizado principalmente para troca de mensagens de configuração, quando o tamanho dos quadros já são previamente conhecidos, como a mensagem de *broadcast* contendo informações do sistema.

A RLC também oferece a entrega sequencial das *Service Data Units* (SDUs) para as camadas superiores eliminando as informações duplicadas. De acordo com as condições do canal rádio, esta camada pode segmentar as SDUs (ALMEIDA, 2013).

3.4.3 *Medium Access Control (MAC)*

A subcamada MAC se comunica com a camada abaixo PHY utilizando canais de transporte, e para se comunicar com a subcamada acima, RLC, utiliza os canais lógicos. Além disso, é responsável pelo *Hybrid Automatic Repeat reQuest* (HARQ), pelo *Automatic Repeat reQuest* (ARQ) e pelo agendamento da distribuição de pacotes.

A função ARQ provê a correção de erros por retransmissões no modo AM. Já a função HARQ é responsável pela retransmissão de blocos de transportes (*Transport Blocks*- TBs), quando é identificado erro de transmissão através de mensagens de sinalização *Acknowledgement / Negative Acknowledgement* (ACK/NACK). Sendo assim, a HARQ opera como *Stop-and-Wait*, ou seja, os dados são transmitidos e um *feedback* é aguardado para que, se houver necessidade, esses dados possam ser reenviados.

A HARQ opera de forma assíncrona no *downlink* e síncrona no *uplink*. Retransmissões síncronas significam que os blocos HARQ ocorrem em um intervalo de tempo periódico pré-definido, desta forma nenhuma sinalização é necessária para indicar ao receptor a

retransmissão dos dados. Já o HARQ assíncrono oferece a possibilidade de programar a retransmissão dos dados baseado nas condições da interface aérea, havendo a necessidade de enviar mensagens de sinalização para identificar o processo HARQ.

Outra característica importante é o controle de acesso randômico encontrado na sub-camada MAC, que é responsável pelo procedimento *Random Access Channel* (RACH). Esse processo ocorre quando um UE não está alocado para receber recursos, mas possui dados para serem enviados; ou se não está sincronizado com a eNB.

3.4.4 A camada PHY

A camada física oferece serviços de transmissão de dados para as camadas superiores. O acesso a esses serviços é através do uso dos canais de transporte através da camada MAC. Essa camada é responsável pela detecção e indicação de erros no canal de transporte para as camadas superiores, modulação e demodulação dos canais físicos, informações da faixa de frequência, tipo de multiplexação (TDD ou FDD) e tipo de modulação (OFDMA ou SC-FDMA) utilizada, sincronização de frequência e tempo, processamento de RF e é nessa camada que acontece o processamento MIMO.

3.4.5 Radio Resource Control (RRC)

A camada RRC na eNodeB toma decisões de *handover* com base em medições do nível de sinal das células vizinhas que são enviadas pelo UE. Além desta função esta camada ainda envia mensagens de *broadcast* contendo informações do sistema e controla as medições dos parâmetros do UE, fornece a configuração principal e parâmetros para os protocolos de camada inferior e transporta a sinalização NAS entre o UE e o MME.

3.4.6 Non-Access-Stratum (NAS)

No plano de controle, o protocolo NAS, que funciona entre o MME e a UE, é utilizado para fins de controle, tais como conexão de rede, autenticação e gestão de mobilidade. Todas as mensagens NAS são cifradas e sua integridade é garantida pelo MME e pelo UE.

Os procedimentos NAS são agrupados em duas categorias: EPS *Mobility Management* (EMM), e o EPS *Session Management* (ESM) (FIRMIN, 2015).

O protocolo EMM se refere a procedimentos relacionados com a mobilidade ao longo de um acesso, autenticação e segurança E-UTRAN. Já o protocolo ESM oferece suporte para a criação e manipulação de dados do usuário no NAS.

As mensagens geradas pelo protocolo NAS são transportadas pela camada RRC e existem duas maneiras de realizar essa transmissão. A primeira consiste em concatenar as mensagens do NAS com outras mensagens da camada RRC; e a segunda possibilidade é pela inclusão dessas mensagens em mensagens RRC dedicadas sem o uso da concatenação.

3.5 ESTRUTURA DE CANAIS

A camada física fornece canais de transporte para a camada 2. Estes canais de transporte diferem em suas características como os dados são transmitidos e são mapeados para os diversos canais lógicos fornecidos pela camada MAC. Os canais lógicos descrevem que tipo de dados são transmitidos.

Os canais lógicos podem ser divididos em canais de controle e canais de tráfego. Os canais de controle são utilizados para a transferência de informações no plano de controle e os canais de tráfego para a transferência de informações no plano de usuário.

Os canais de rádio do LTE estão separados em dois tipos, os canais físicos e os sinais físicos. Os canais físicos correspondem a um conjunto de recursos físicos utilizados para a transmissão de dados e informações de controle da camada MAC. Já os sinais físicos são utilizados somente pela camada física PHY, para dar suporte às suas funcionalidades, e não carregam nenhum tipo de informação das camadas mais altas.

Existem dois sinais físicos utilizados no *downlink*: o *Reference Signal* (RS) e os sinais de sincronização *Primary Synchronization Signal* (P-SS) e *Secondary Synchronization Signal* (S-SS). O RS é utilizado pelo UE para estimar o canal de *downlink* e os canais de sincronização P-SS e S-SS são utilizados pelo UE para sincronizar os frames e para requisitar informações como frequência e identificação da célula.

A quantidade de canais de transporte foi pensada para ser reduzida de modo a diminuir a complexidade da arquitetura de protocolos do LTE. A camada MAC é responsável por mapear os canais de transporte nos canais lógicos e selecionar o formato de

transporte mais adequado. O Quadro 3.1 apresenta os diversos canais e suas respectivas funções.

Quadro 3.1 - Estrutura de canais.

Canal	Função
Canais de Controle	
<i>Broadcast Control Channel</i> (BCCH)	Canal utilizado no <i>downlink</i> para fornecer informações sistêmicas para todos os terminais conectados à eNodeB.
<i>Paging Control Channel</i> (PCCH)	Canal de <i>downlink</i> responsável pela transferência das informações de <i>paging</i> . É utilizado pelo sistema para que a rede possa localizar em qual célula está o UE.
<i>Common Control Channel</i> (CCCH)	Utilizado para informações de acesso randômico.
<i>Multicast Control Channel</i> (MCCH)	Canal de <i>downlink</i> ponto-a-ponto utilizado para transmitir informações de controle MBMS da rede para o UE. Este canal é utilizado somente por dispositivos que suportam o MBMS.
<i>Dedicated Control Channel</i> (DCCH)	Canal bi-direcional ponto-a-ponto que carrega informações específicas de controle para cada usuário (controle de potência, <i>handover</i> , etc).
Canais de Tráfego	
<i>Dedicated Traffic Channel</i> (DTCH)	É um canal ponto-a-ponto dedicado para um UE. É utilizado para transferir as informações do usuário tanto no <i>downlink</i> quanto no <i>uplink</i> .
<i>Multicast Traffic Channel</i> (MTCH)	É um canal de <i>downlink</i> ponto-a-ponto responsável pela transmissão do tráfego de dados da rede para o UE. Este canal é utilizado somente por dispositivos que suportam o MBMS.
Canais de Transporte <i>downlink</i>	
<i>Broadcast Channel</i> (BCH)	É caracterizado pelo formato pré-definido de transporte. Este canal carrega as informações de broadcast em uma área definida pela cobertura de uma célula.
<i>Downlink Shared Channel</i> (DL-SCH)	Principal canal para transferência de dados no <i>downlink</i> , é responsável pela alocação dinâmica dos recursos, através de verificações da modulação, codificação e potência de transmissão.
<i>Paging Channel</i> (PCH)	Provê suporte para a recepção descontínua, permitindo uma economia no consumo de energia da bateria do UE. Pode ser utilizado tanto como um canal de tráfego quanto para controle.
<i>Multicast channel</i> (MCH)	Utilizado para enviar informações <i>multicast</i> para os UEs. Estas mensagens podem ser enviadas simultaneamente para vários dispositivos.
Canais de Transporte <i>uplink</i>	
<i>Uplink Shared channel</i> (UL-SCH)	Provê suporte para o HARQ e para o link adaptativo dinâmico, este parâmetro possibilita a variação da modulação, da codificação e da potência transmitida.
<i>Random Access Channel</i> (RACH)	Canal utilizado para efetuar o acesso ao sistema. Apenas permite o envio de uma identificação provisória e a razão do acesso.

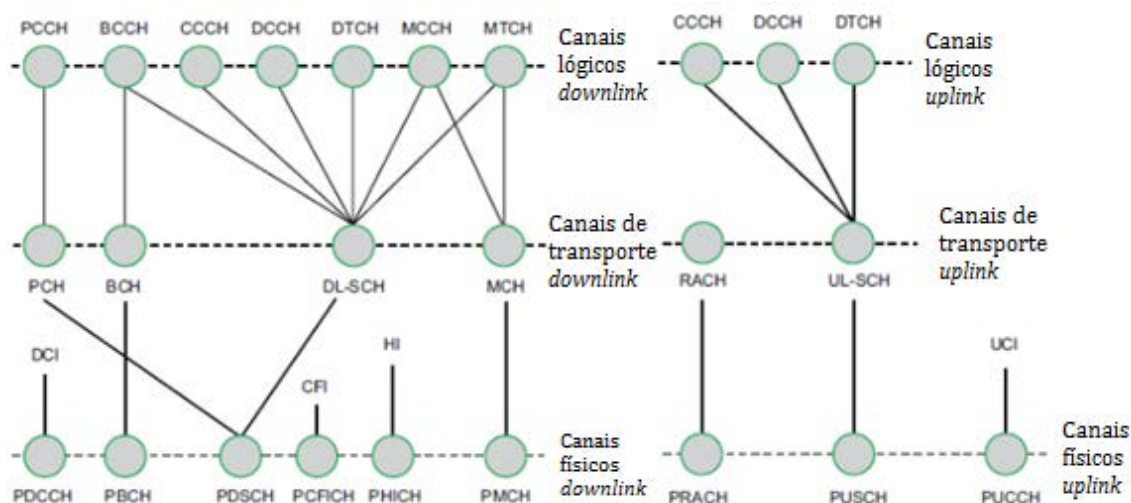
Quadro 3.2 - Estrutura de canais (continuação).

Canal	Função
Canais Físicos	
<i>Physical Downlink Shared Channel</i> (PDSCH)	Carrega informações contendo os dados dos usuários do DL-SCH.
<i>Physical Uplink Shared Channel</i> (PUSCH)	Carrega as informações contendo os dados dos usuários do UL-SCH.
<i>Physical Control Format Indicator Channel</i> (PCFICH)	Informa ao UE o número de símbolos OFDM utilizados para transmitir o canal de controle PDCCH. Este canal é transmitido em todos os frames e utiliza modulação QPSK.
<i>Physical Downlink Control Channel</i> (PDCCH)	Carrega as principais informações de alocação de recursos.
<i>Physical Uplink Control Channel</i> (PUCCH)	Transporta informações de controle como respostas de ACK/NAK das transmissões de <i>downlink</i> e agendamentos de pedidos de <i>uplink</i> .
<i>Physical Hybrid ARQ Indicator Channel</i> (PHICH)	Carrega as informações de ACK/NAK em respostas às transmissões de <i>uplink</i> .
<i>Physical Broadcast Channel</i> (PBCH)	Carrega informações de acesso dos usuários que solicitam acesso a rede, enviando, a cada 40 ms, informações sobre o sistema para que o UE possa se conectar à rede.
<i>Physical Multicast Channel</i> (PMCH)	Carrega informações de <i>multicast</i> que são enviadas a múltiplos UEs simultaneamente. O canal possui várias opções de modulação incluindo QPSK, 16QAM ou 64QAM.
<i>Physical Random Access Channel</i> (PRACH)	Canal de <i>uplink</i> utilizado para funções de acesso randômico.

Fonte: (ERICSSON, 2008)

A Figura 3.14 apresenta a estrutura dos canais descritos anteriormente.

Figura 3.14 - Estrutura de canais LTE.



Fonte: (SANTOS, 2010)

3.6 TRANSMISSÃO

A transmissão usada no 4G foi escolhida de modo que o usuário pudesse desfrutar de todo o aumento de velocidade prometido. Para isso, a comunicação feita entre a torre de transmissão, eNodeB, e a central de distribuição é feita através de cabos de fibra óptica. Esta é a principal diferença entre as transmissões 3G e 4G.

O sinal chega para as operadoras por cabos de fibra óptica vindos dos grandes *backbones*. Logo depois, é enviado também por cabo até centrais de distribuição, para ser levado às antenas, passando por roteadores e *switches* de alto desempenho, para que então o sinal seja direcionado até as antenas utilizando a fibra óptica; e nesta última etapa que a transmissão 4G difere dos padrões anteriores (HAMANN, 2013).

As antenas usadas na 3G atuam como redistribuidoras, recebendo os sinais de uma antena principal e compartilhando-os com os usuários que estiverem ao alcance. Já no novo padrão, as antenas são distribuidoras. Ou seja, os sinais chegam por meio de cabos de fibra óptica e então são transmitidos aos usuários. Isso permite uma redução nas perdas e o alcance de altas taxas de transmissão. Além disso, a rede LTE utiliza métodos de compressão de dados e de distribuição inteligente, em que as redes conseguem identificar momentos de tráfego intenso de dados e se reorganizam para que não exista sobrecarga e queda de sistemas, fazem com que o sinal seja enviado com maior facilidade e rapidez, além de absorver maior quantidade de informações. A Figura 3.15 apresenta as etapas da transmissão dos dados em uma rede LTE.

Figura 3.15 - Transmissão de dados em uma rede LTE.



Fonte: (HAMANN, 2013)

3.7 CHAMADAS DE VOZ E SMS NO LTE

Como o LTE foi desenvolvido para ser uma rede IP em sua totalidade, o serviço de chamadas de voz deverá ser feito através do VoIP. O suporte de voz sobre IP traz muitos novos desafios à sua implementação, tais como a qualidade do serviço provido pelas redes baseadas em CS que deve ser mantida uma vez que o assinante já está habituado com a qualidade desse serviço, cabe à operadora oferecê-lo com qualidade igual ou superior.

Existem três formas para que o serviço de voz seja utilizado em uma rede 4G: a *Voice Over LTE via Generic Access* (VoLGA), a *Voice over LTE* (VoLTE) e a *Circuit Switch Fallback* (CSFB), sendo esta última adotada atualmente (MENDES SANTOS, 2014).

O VoLGA permite aos operadores implementarem estes serviços com base em um padrão existente desenvolvido pelo 3GPP conhecido como Generic Access Network (GAN). O VoLGA ainda exige que um elemento conhecido como *VoLGA Access Network Controller* (VANC) seja adicionado ao núcleo das redes GSM / UMTS existentes. Para o funcionamento é necessário que o UE tenha além dos rádios convencionais para GSM e UMTS, um específico para Wi-Fi, que é utilizada como uma tecnologia de acesso.

O VoLTE é baseado no serviço telefônico de multimídia (MMTel), que é o serviço VoIP baseado em *IP Multimedia Subsystem* (IMS). O IMS atua como uma arquitetura de acesso independente de controle de serviço e conectividade, baseada no padrão IP, que habilita vários tipos de serviço multimídia para usuários finais, como por exemplo, vídeos compartilhados, *Voice over IP*, vídeo em *streaming*, jogos interativos, através da utilização de protocolos baseados na rede Internet *all-IP*.

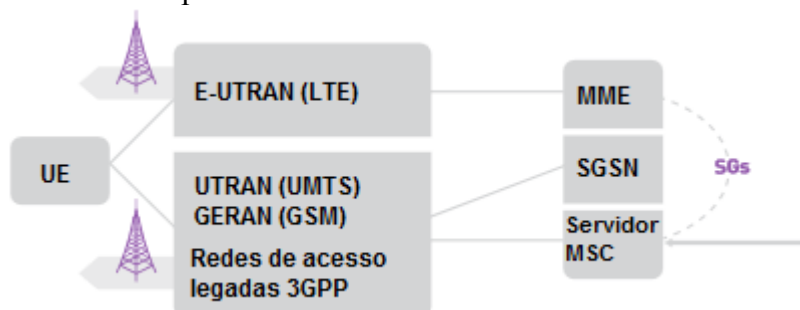
3.7.1 *Circuit Switch Fallback* (CSFB)

O CSFB é baseado na capacidade que as redes anteriores têm de operar tanto no domínio de comutação por circuito (CS), para tráfego de voz, quanto no de comutação por pacotes (PS), para tráfego de dados. Ou seja, o CSFB faz uso da infraestrutura oferecida pelo domínio CS das redes das gerações anteriores, para fornecer interoperabilidade de voz e SMS em aparelhos LTE.

A Figura 3.16 apresenta uma visão simplificada de uma rede mista de LTE e das gerações anteriores usada para a solução CSFB. Nas redes 2G/3G o usuário utiliza o *Serving GPRS Support Node* (SGSN) para o tráfego de dados e o *Mobile Switching Center* (MSC)

para o tráfego de voz. Já o LTE utiliza o *Mobility Management Entity* (MME) para o serviço de dados. Sendo assim, é necessário que o MME e o MSC estejam interligados para a realização da chamada de voz e SMS com CSFB.

Figura 3.16 - Rede mista simplificada LTE e 2G/3G.



Fonte: (ERICSSON, 2012)

A interface SGs, que conecta MME e MSC, é um ponto de referência entre essas duas entidades, utilizada no gerenciamento de mobilidade e procedimento de *paging*.

Antes de ocorrer o CSFB, há um mapeamento das redes 2G/3G para que a MME seja atualizada. Quando o usuário, com conexão 4G ativa, realiza uma chamada, uma requisição para MME é enviada pelo UE que então recebe um comunicado para alterar o seu *Radio Access Technology* (RAT) para as outras tecnologias disponíveis. Terminado o processo de configuração, é solicitado o pedido de serviço de voz para a MSC e um registro na *Visitor Location Register* (VLR) e finalmente a chamada estabelecida passa a ser controlada pela nova rede.

No caso do usuário receber uma chamada, ela será encaminhada para a MSC da rede 2G/3G e então uma mensagem de *paging* é enviada para o MME que irá identificar o UE registrado. Esta mensagem, informando da chamada, é enviada para o UE que se prepara para recebê-la na tecnologia definida e informa à MME. Por fim, o processo de configuração da chamada recebida segue normalmente, sendo ela 2G ou 3G. O serviço de SMS é tratado da mesma forma, sempre utilizando a MME e MSC como tratamento e conexão das tecnologias.

Ao finalizar a chamada o dispositivo retorna para o LTE no modo *Idle* ou no modo *Connected*.

4 DIFICULDADES NA IMPLANTAÇÃO DA REDE 4G

O padrão LTE vem sendo mundialmente implantado e em setembro de 2015 existiam 442 redes LTE em operação comercial no mundo (TELECO, 2015).

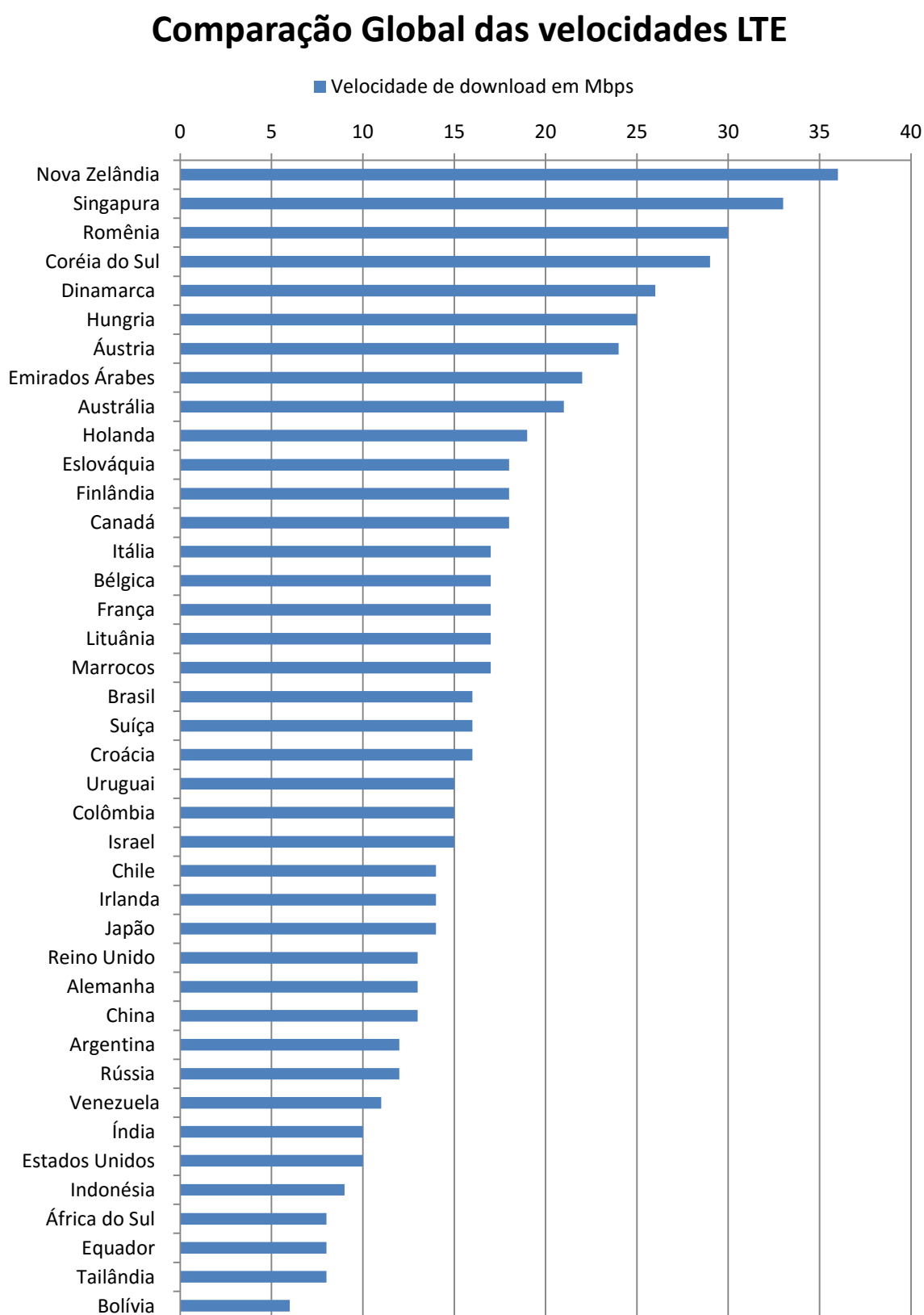
As primeiras redes comerciais foram lançadas na Noruega e Suécia pela *TeliaSonera*, em dezembro de 2009. No entanto, ainda levaria um tempo até a chegada dessa tecnologia ao Brasil, uma vez que a implementação das redes 4G no nosso país foi impulsionada pela realização da Copa do Mundo em 2014. Isso porque a rede 3G não seria suficiente para atender ao aumento do número de usuários e ficaria congestionada.

A tecnologia 4G/LTE permitirá atender ao aumento de demanda de banda larga, originado pelo crescimento exponencial das transferências de dados, voz e imagem, e que será ainda maior nos próximos anos no Brasil, motivados pelos grandes eventos esportivos como Copa das Confederações, Copa do Mundo e Olimpíadas. A previsão para 2014, por exemplo, é de que o tráfego de dados seja 15 vezes maior do que na Copa de 2010 (ERICSSON, 2012).

Esse novo padrão traz velocidades teóricas bastante elevadas, entretanto essas velocidades não são globalmente uniformes, tendendo a variar entre países e entre operadoras em um mesmo país. Em países nos quais a população está espalhada, a dificuldade de prover cobertura em uma área geográfica maior implica em pior desempenho do serviço. Já em países onde a maior parte de população está concentrada em um número pequeno de centros urbanos, o serviço tende a registrar maiores velocidades.

No Brasil, a Claro possui a maior velocidade com média de 20 Mbps, seguida pela Vivo com 18 Mbps, a Oi tem 14 Mbps, a Tim com 10 Mbps e a Nextel com apenas 3 Mbps. O Gráfico 4.1 apresenta essa variação de velocidade entre diversos países com dados do segundo semestre de 2015 (OPEN SIGNAL, 2015).

Gráfico 4.1 – Velocidade média das redes LTE.



Fonte: (OPEN SIGNAL, 2015)

4.1 COBERTURA

Inicialmente as cidades sede da Copa foram priorizadas na implantação das redes 4G. Segundo dados da Anatel, em dezembro de 2014, existiam 147 municípios atendidos pelo serviço, incluindo 23 capitais e o Distrito Federal, totalizando 41,8% da população.

A Anatel propôs um cronograma de implantação para que as operadoras de telefonia tivessem tempo para a adaptação de suas redes já existentes à nova tecnologia. O Quadro 4.1 traz os prazos e as metas a serem cumpridas pelas operadoras.

Quadro 4.1 - Cronograma de implantação do LTE.

Prazo	Meta
Até 30/04/2013	Cidades sede da Copa das Confederações
Até 31/12/2013	Cidades sede e subdeses da Copa do Mundo de 2014
Até 31/05/2014	Todas as capitais com mais de 500 mil habitantes
Até 31/12/2015	Todas as cidades com mais de 200 mil habitantes
Até 31/12/2016	Todas as cidades com mais de 100 mil habitantes
Até 31/12/2017	Todas as cidades com mais de 30 mil habitantes

Fonte: (ANATEL, 2015)

Como as subdeses da Copa (centros de treinamento) só estariam definidas em janeiro de 2014, a Anatel e operadoras concordaram em substituir a demanda do edital de atender mais 12 municípios indicados como subdeses da Copa pelo atendimento a mais 27 municípios, além das sedes, até 31 de dezembro de 2013 por uma ou mais operadoras. Os centros de treinamentos tiveram atendimento com cobertura pontual em 4G até abril de 2014. (TELECO, 2015).

4.2 A CARÊNCIA DE FIBRA ÓPTICA

A transmissão de dados em uma rede LTE envolve o uso da fibra óptica entre o eNodeB e a central de distribuição, *backbone*, para que as altas taxas de dados sejam alcançadas. Por esse motivo, a cobertura de fibra óptica é bastante importante para a implementação e expansão de redes 4G.

Atualmente, 80% dos acessos estão concentrados em 4% dos municípios o que se torna um empecilho à expansão da rede. Com o objetivo de melhorar esta carência, o governo criou

o Programa Nacional de Banda Larga (PNBL) que fornecerá rede de fibra óptica a 90% dos municípios do País (PORTAL BRASIL, 2015).

Durante a fase inicial de implementação da rede 4G para atender à demanda da Copa, algumas empresas se juntaram para diminuir os custos com infraestrutura compartilhando a rede de transporte de dados (fibra óptica, satélite ou outro tipo de conexão) (AMATO, 2013).

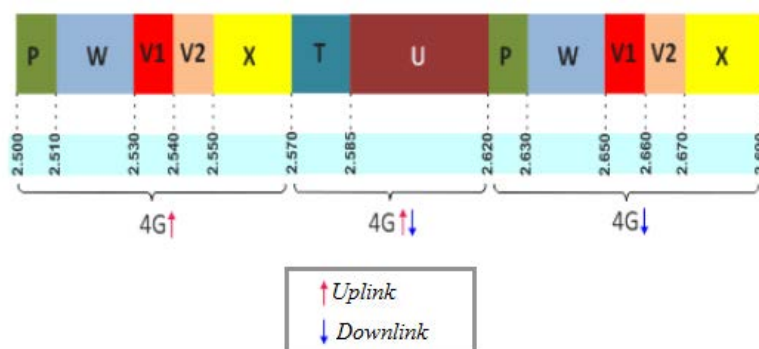
Para estimular a otimização de recursos e a redução de custos operacionais, além de outros benefícios aos usuários dos serviços prestados, atendendo a regulamentação específica do setor de telecomunicações, a Anatel aprovou, por meio da Resolução 274, de 5 de setembro de 2001, o Regulamento de Compartilhamento de Infra-Estrutura entre Prestadoras de Serviço de Telecomunicações (ANATEL, 2015).

4.3 FREQUÊNCIA DE OPERAÇÃO

Atualmente a rede LTE funciona na faixa de 2,5 GHz. A Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel) realizou, em junho de 2012, o leilão desta faixa de frequência para meios urbanos e da faixa de 450 MHz para meios rurais para implantar o 4G no Brasil. Porém, as operadoras de telefonia móvel não ficaram satisfeitas com a faixa adotada, pois acreditavam que a faixa de 700 MHz seria mais adequada.

A Anatel destinou para o 4G a faixa de frequências de 2500 MHz a 2690 MHz. As faixas entre 2500 - 2570 MHz e 2620 - 2690 MHz (P, W, V e X) foram destinadas para operação FDD (canais separados para transmissão e recepção), já as faixas entre 2570 - 2620 MHz (T e U) foram destinadas para operação TDD (transmissão e recepção no mesmo canal), como apresenta a Figura 4.1.

Figura 4.1 – Divisão da faixa de frequência.



Fonte: (TELECO, 2015)

Durante o Futurecom 2011, o presidente da TIM, Luca Luciani, argumentou que um dos motivos de a faixa de 700MHz ser a mais adequada é porque o volume de investimentos é cinco vezes menor do que o necessário para projetos 2,5GHz. Segundo ele, o valor cai por causa do número de antenas, 4,5 vezes inferior. Oi e Vivo também defendem a adoção da faixa de 700MHz para 4G (SOARES, 2015).

O problema com a faixa de 700 MHz é que no Brasil ela ainda é usada para a transmissão de TV analógica, que está com os seus dias contados. Ainda que a frequência de 700 MHz apresente algumas vantagens sobre a de 2,5 GHz, existem muitos países apostando na implantação de uma rede híbrida, ou seja, fazendo uso dos benefícios de cada uma delas. A AT&T, por exemplo, lançou serviços com espectro de 1,7 GHz e 700 MHz; e na Itália, a TIM fez um mix de 2,5 GHz e 700 MHz.

A migração do sistema analógico para o digital começa em 2016 e vai até 2018. O início será em abril de 2016, no Distrito Federal e municípios da Região do Entorno. No decorrer desse mesmo ano, vai abranger capitais e cidades dos Estados de São Paulo, Minas Gerais, Goiás e Rio de Janeiro. O cronograma será concluído no fim de 2018 (ANATEL, 2014).

4.3.1 Modelos de propagação

Para projetar um sistema de radiodifusão, e decidir sobre a frequência a ser utilizada, a área de cobertura, a quantidade de antenas, entre outros; é necessário usar modelos de propagação.

Os modelos de propagação são fórmulas matemáticas usadas para caracterizar a propagação de ondas de rádio, e descrevem a atenuação do sinal (perda de percurso) para uma determinada distância de separação entre o transmissor e receptor. Esses modelos podem ser divididos em três tipos: modelos empíricos, teóricos e específicos do local. Além disso, eles podem ser classificados quanto a suas aplicações como: ponto-multiponto, fornecendo uma estimativa geral da propagação de rádio em vez de usar dados de caminho específicos, e ponto-a-ponto, que além de fazer estimativas de rádio enlace, também possibilita descrever o comportamento da propagação entre o transmissor e receptor (PIRES, 2012).

Existem alguns modelos que se destinam para esse fim como o de Okumura que é bastante utilizado para faixa de 150 MHz – 2000 MHz, o de Hata, ou Okumura-Hata, que é usado na faixa 150 MHz – 1500 MHz. Entretanto, para a análise da cobertura oferecida pelas frequências de 700 MHz e 2,5 GHz no presente trabalho foi utilizado o modelo *Stanford*

University Interin (SUI) que atende a faixa de frequência utilizada nas redes 4G no Brasil. Esse modelo é indicado para o planejamento de redes WiMAX, que possui algumas semelhanças com a tecnologia LTE.

4.3.1.1 O modelo *Stanford University Interin* (SUI)

O modelo empírico SUI é usado para estimar as perdas de percurso em ambientes urbanos, levando em consideração três tipos de terrenos: A, B e C. O terreno tipo A é montanhoso com alta/moderada densidade de árvores; o terreno tipo B é montanhoso com baixa densidade de árvores ou planície com alta-moderada densidade de árvores; e o terreno tipo C é de planície com baixa densidade de árvores.

Em ambientes com linha de visada (LOS – *Line of Sight*) entre a antena transmissora e a antena receptora, a perda no enlace corresponde a perda em espaço livre. A perda em espaço livre, L , está associada a dispersão da energia do sinal ao longo do trajeto de propagação como determina a equação (1) (ALENCAR; COSTA, 2009).

$$L = 92,44 + 20 \log f + 20 \log d \text{ [dB]} \quad (1)$$

Sendo:

f : frequência em GHz;

d : distância em km.

Já em ambientes sem linha de visada, ou seja, condições em que o trajeto entre as antenas transmissora e receptora está obstruído (NLOS – *Non Line Sight*); o sinal alcança o receptor depois de sofrer reflexões, espalhamentos e difrações ao longo do percurso. As perdas no trajeto, P_L , são determinadas pela equação (2).

$$P_L = A + 10\gamma \log \left(\frac{d}{d_0} \right) + \Delta PL_f + \Delta PL_h + S \text{ [dB]} \quad (2)$$

O parâmetro A , dado pela equação (3), corresponde à perda em espaço livre na distância d_0 , γ é o expoente de perda de propagação em função da altura da estação base h_b como apresentado na equação (4) tal que $10 < h_b < 80 \text{ m}$, d_0 é uma distância de referência, tal que $d_0 = 100 \text{ m}$, ΔPL_f é a correção na frequência, equação (5), ΔPL_h é a correção na altura da antena receptora, dada pela equação (6) e S corresponde a perda de sombreamento dada pelo tipo de terreno, sendo $8,2 < S < 10,6 \text{ dB}$. A equação (2) é válida somente para $d > d_0$.

$$A = 20 \log \left(\frac{4\pi d_0}{\lambda} \right) \text{ [dB]} \quad (3)$$

O parâmetro λ é o comprimento de onda que dado por $\lambda = \frac{v}{f}$, em que v é a velocidade no meio de propagação e f a frequência da onda. Para propagação no ar, v pode ser considerada a velocidade da luz no vácuo de 3×10^8 m/s.

$$\gamma = a - bh_b + \frac{c}{h_b} \text{ [dB]} \quad (4)$$

$$\Delta PL_f = 6 \log \left(\frac{f}{2000} \right) \text{ [dB]} \quad (5)$$

$$\Delta PL_h = 10,8 \log \left(\frac{h}{2} \right) \text{ [dB]}, \text{ para terrenos do tipos A e B} \quad (6)$$

$$\Delta PL_h = -20 \log \left(\frac{h}{2} \right) \text{ [dB]}, \text{ para terrenos do tipo C}$$

Na equação (6), o parâmetro h corresponde à altura da antena receptora, de modo que $2 < h < 10$ m. E os parâmetros a , b e c variam com o tipo de terreno e são apresentados na Tabela 4.1. As perdas máximas no *downlink* e no *uplink*, $L_{máx}$, são determinadas pela equação (7).

Tabela 4.1 – Variação de parâmetros com o tipo de terreno.

Parâmetro	Terreno tipo A	Terreno tipo B	Terreno tipo C
a	4,6	4,0	3,6
b	0,0075	0,0065	0,0050
c	12,6	17,1	20,0

Fonte: (ALENCAR; COSTA, 2009)

$$L_{máx} = P_T + G_T - L_T - SNR_{Req.} - S_R + G_R - L_R + G_{div} \text{ [dB]} \quad (7)$$

Sendo:

P_T : Potência de Transmissão [dBm];

G_T : Ganho da antena transmissora [dBi];

L_T : Perdas na transmissão [dB];

$SNR_{Req.}$: Relação Sinal Ruído requerida [dB];

S_R : Sensibilidade requerida na recepção [dBm];

G_R : Ganho da antena receptora [dBi];

L_R : Perdas na recepção [dB];

G_{div} : Ganho por diversidade [dBi].

A equação (7) fornece um valor médio que indicaria que 50% dos pontos de uma célula terão cobertura. Para que essa cobertura seja mais abrangente é necessário incluir uma margem, M , que depende do tipo de cobertura desejada (*outdoor*, *indoor* ou *incar*). Em caso de coberturas *indoor* ou *incar* é preciso adicionar uma perda por penetração no ambiente. Além disso, uma perda adicional por bloqueio do terminal móvel pelo corpo humano, BL , deve ser considerada. Geralmente, a perda BL equivale a 4 dB, a perda por penetração em carros a 10 dB e a perda por penetração em edifícios a 20 dB. A equação (8) mostra como calcular a perda por propagação máxima (PUC – RIO, 2015).

$$L_{P_{\text{máx}}} = L_{\text{máx}} - L_{\text{penetração}} - BL - M \text{ [dB]} \quad (8)$$

Para calcular a quantidade de torres que serão utilizadas é necessário obter o raio máximo de cobertura dado pelo parâmetro d na equação (1) e então a área de cobertura para cada estação, área a da célula, é dada pela equação (9). E finalmente, o número de torres n é dado pela equação (10).

$$a = \frac{d^2 3\sqrt{3}}{2} \text{ [km}^2\text{]} \quad (9)$$

$$n = \frac{\text{área desejada}}{a} \quad (10)$$

Para os cálculos desse trabalho, o terreno escolhido foi do tipo B , a altura da antena receptora $h = 3$ m, a altura da estação base $h_b = 30$ m e a perda de sombreamento por tipo de terreno $S = 9$ dB. A área escolhida para o projeto tem 8 km^2 e os demais valores utilizados nos cálculos são apresentados no Quadro 4.2.

Quadro 4.2 - Parâmetros utilizados para os cálculos.

	<i>Downlink</i>	<i>Uplink</i>
Potência de transmissão	43 dBm	23 dBm
Ganho da antena transmissora	15 dBi	-
Perdas na transmissão	2 dB	-
SNR	-	-
Ganho da antena receptora	-	15 dBi
Perdas na recepção	-	2 dB
Ganho de diversidade	-	3 dB
Margem de desvanecimento	4 dB	4 dB
Sensibilidade requerida na recepção	-85 dBm	-101,5 dBm

Fonte: (PUC – RIO, 2015)

Tabela 4.2 – Resultados obtidos.

Parâmetros	700 MHz	2,5 GHz
λ [m]	0,43	0,12
$L_{\max} \text{ downlink}$ [dB]	141	141
$L_{\max} \text{ uplink}$ [dB]	140,5	140,5
$L_{p\max} \text{ downlink}$ [dB]	133	133
$L_{p\max} \text{ uplink}$ [dB]	132,5	132,5
A [dB]	69,344	80,401
γ [dB]	4,375	4,375
ΔPL_f [dB]	-2,736	0,582
ΔPL_h [dB]	1,902	1,902
d [km]	1,855	0,871
a [km ²]	8,94	1,97
n	0,895 $\cong$ 1	4,063 $\cong$ 5

Fonte: (Do autor, 2015)

A Tabela 4.2 apresenta os resultados obtidos com o método de propagação SUI e se pode concluir que em uma rede LTE com a frequência de 700 MHz se tem um raio de abrangência duas vezes maior do que com a frequência de 2,5 GHz e além disso, na frequência menor seriam necessárias quatro torres a menos do que na de 2,5 GHz, o que representa uma redução significativa nos custos de infraestrutura.

5 O FUTURO DAS REDES 4G

Ainda que as redes 4G no Brasil estejam em fase de expansão e haja muito a ser feito, já existem pesquisas para discutir o futuro dessas redes e quais tecnologias virão a seguir.

Ao que tudo indica, o aumento na demanda de serviços de vídeo e *streaming* motivará a busca por velocidades cada vez maiores e impulsionará o desenvolvimento das tecnologias futuras.

Nos itens a seguir são apresentados dois caminhos possíveis, o LTE *Advanced* e a quinta geração (5G), para a evolução e melhoria das redes 4G.

5.1 LTE *ADVANCED* (LTE-A)

O LTE *Advanced* tem como objetivo principal o aumento da capacidade das rede LTE. Isso inclui fornecer maiores taxas de bits de maneira economicamente viável, de modo que a tecnologia seja mundialmente adotada.

A primeira rede LTE-A comercial, disponibilizada para clientes comuns, foi lançada pela operadora *SK Telecom* na Coréia do Sul em 2013, e inicialmente atingiu 102 Mbps na realização de um *download* (KARASINSKI, L., 2013).

Motivadas pelo excelente desempenho da nova tecnologia, as empresas de celulares se empenharam no desenvolvimento de aparelhos compatíveis com o LTE-A e a *Samsung* foi a primeira a lançar esses dispositivos.

Em um comunicado oficial divulgado hoje (17/06/2013), a companhia sul-coreana confirmou estar trabalhando em uma nova versão do seu *smartphone* top de linha *Galaxy S4* que será compatível com a rede LTE-A (*Long Term Evolution-Advanced*, versão aprimorada do LTE tradicional). O anúncio foi feito pelo próprio J.K. Shin, presidente da divisão mobile da empresa.

“Seremos os primeiros a lançar comercialmente um *smartphone* compatível com o 4G avançado”, comenta o executivo. De acordo com Shin, o aparelho estará disponível para o mercado sul-coreano ainda neste mês (DE SOUZA, 2013).

5.1.1 Requisitos

Para que uma rede seja considerada LTE-A o 3GPP estabeleceu alguns requisitos necessários referentes à velocidade de tráfego de dados, à eficiência espectral.

O valor de pico esperado para a taxa de dados é de 1 Gbps no *downlink* e 500 Mbps no *uplink*. Já a latência, que é o tempo de resposta do sistema, no plano de controle a transição do UE em modo *idle* para o modo *connected* deve acontecer em menos de 50 ms. Em relação à eficiência de espectro, que era no máximo de 16bps/Hz na versão anterior, deve ser de 30 bps/Hz com o uso de antenas MIMO 8x8 no *downlink*. Além disso, são previstos aumento do número de assinantes ativos simultaneamente, flexibilidade de espectro, melhoras no serviço de VoIP e melhor desempenho nas bordas de célula, como apresenta a Tabela 5.1 (ROHDE & SCHWARZ, 2012).

Tabela 5.1 – Metas de eficiência média do espectro.

	Configuração da antena MIMO	Metas [bps/Hz/célula]
<i>Uplink</i>	1x2 / 2x4	1,2 / 2,0
<i>Downlink</i>	2x2 / 4x2 / 4x4	2,4 / 2,6 / 3,7

Fonte: (ROHDE & SCHWARZ, 2012)

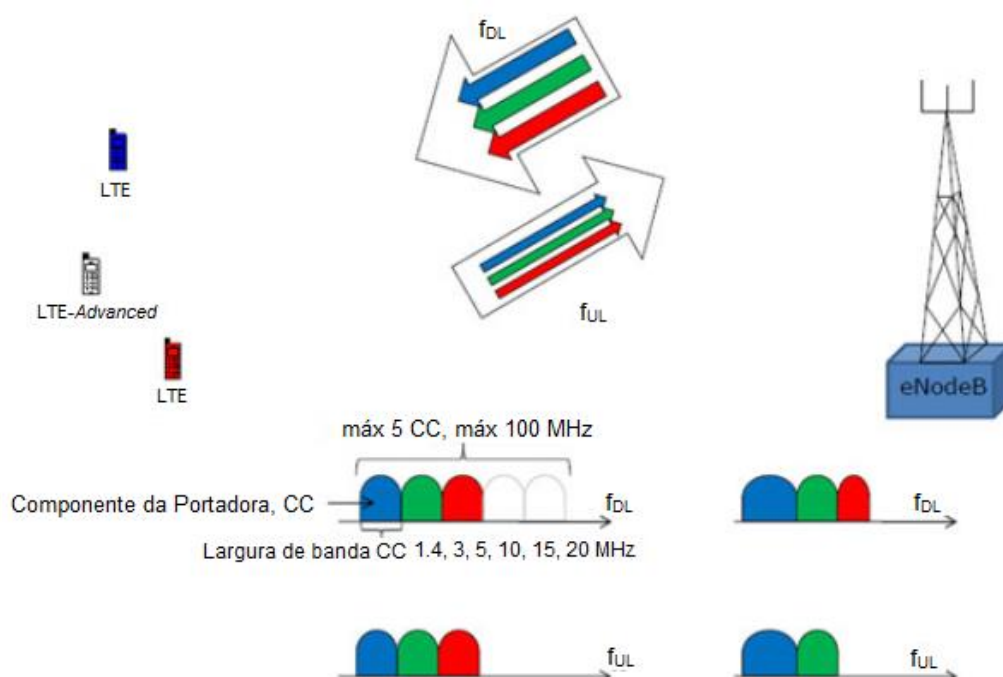
5.1.2 Panorama geral

As principais novas funcionalidades introduzidas no LTE-Advanced são o maior uso das técnicas MIMO, o suporte para a retransmissão através dos *Relays Nodes* (RN) e a agregação de portadoras, chamada de *Carrier Aggregation* (CA) (WANNSTROM, 2013).

Para aumentar a capacidade do sistema é necessário aumentar a largura de banda e por esse motivo o LTE-A propôs que as bandas usadas no LTE fossem agregadas formando bandas maiores e assim manteria a compatibilidade com o sistema anterior. Cada portadora agregada é chamada de componente da portadora (CC) e assim como na versão anterior da tecnologia, tanto FDD como TDD podem ser utilizados.

A componente de portadora pode ter uma largura de banda de 1,4; 3; 5; 10; 15 ou 20 MHz e no máximo cinco elementos podem ser agregados. Por conseguinte, a largura de banda máxima é de 100 MHz (cinco CC de 20 MHz). O número de portadoras agregadas pode ser diferente para o *downlink* e para o *uplink* ($f_{DL} \neq f_{UL}$), de modo que a quantidade utilizada no *uplink* seja sempre menor do que a do *downlink*, como mostra a Figura 5.1.

Figura 5.1 - Agregação de portadoras LTE-A.

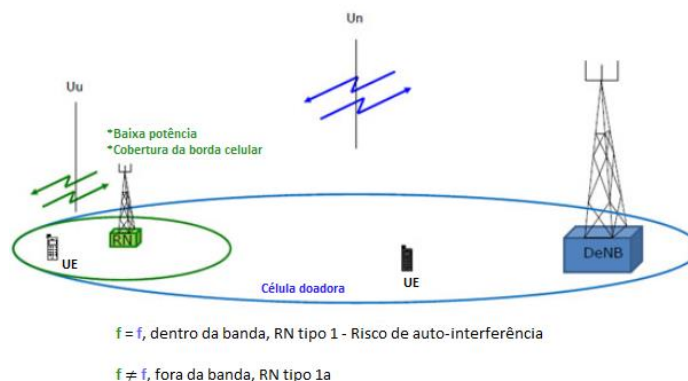


Fonte: (WANNSTROM, 2013)

Por razões de praticidade, o número de portadoras a serem agregadas será feito gradativamente. Para a primeira versão (*Release 10*), estão previstas duas portadoras agregadas para o *downlink* e uma para o *uplink*. Já o *Release 11* prevê a agregação de duas portadoras para o *uplink*.

Os Nodes de retransmissão (*Relays Nodes – RN*) são estações base de baixa potência que irão proporcionar uma maior cobertura e capacidade nas bordas das células. O RN também pode ser usado para conectar-se à áreas remotas sem conexão de fibra, permitindo a formação de uma rede heterogênea, com células de diversos tamanhos, eficiente. A Figura 5.2 mostra a comunicação de um RN com um *Donor eNB* (DeNB) através da interface de rádio Un. UE na borda da célula doadora são atendidos pelo RN através da interface Uu. As frequências usadas em Un e Uu podem ser diferentes, fora da banda, ou o mesmo, dentro da banda. No caso dentro da banda existe um risco de auto-interferência na RN.

Figura 5.2 - Estrutura de transmissão LTE-A.



Fonte: (WANNSTROM, 2013)

5.2 A QUINTA GERAÇÃO 5G

A quinta geração ainda não tem padrão definido, mas já existem muitas discussões e previsões sobre a próxima geração de celulares. No momento não existe nenhuma rede 5G em funcionamento comercial, entretanto a *Ericsson* realizou os primeiros testes em um dispositivo móvel nas ruas de Estocolmo, na Suécia. Esse dispositivo, que é apresentado na Figura 5.3, tem dimensões avantajadas por ser configurável para atuar como um *smartphone*, *tablet* ou computador. Dessa maneira é possível analisar o comportamento da rede em dispositivos variados (PAYÃO, 2015).

Figura 5.3 - Dispositivo móvel para testes na rede 5G.



Fonte: (PAYÃO, 2015)

Evidentemente, o principal objetivo dessa geração será proporcionar velocidades ainda maiores que as que já foram alcançadas com o LTE-A e atender à demanda crescente por serviços de vídeo. E para isso, é necessário que a largura de espectro seja aumentada.

“As tecnologias de realidade virtual e outras experiências de imersão estão cada vez mais presentes na internet e exigem uma alta velocidade de banda. Os investimentos em interface e arquitetura de rede devem ser ampliados, ao lado de incentivos à novas tecnologias para que possamos atender a demanda do mercado. Estamos confiantes que podemos triplicar a eficiência do espectro da 5G com as nossas novas soluções e colaborar para a aplicação e desenvolvimento dessa rede no mundo”, disse Ken Hu (HUAWEI, 2015).

Segundo o CEO da *Huawei*, Ken Hu, esse é um ponto bastante crítico para o desenvolvimento da tecnologia 5G e ele espera maior agilidade dos governos e agências reguladoras no desenvolvimento de políticas sobre a alocação de espectro no futuro.

Durante o *Mobile World Congress* em julho de 2015 em Xangai, a empresa demonstrou o primeiro protótipo 5G operando no espectro sub-6 GHz com taxas de 10 Gbps de pico. Além disso, planeja lançar a primeira rede piloto da 5G, em colaboração com empresas parceiras, em 2018 e o lançamento comercial da rede tem previsão para 2020.

De acordo com o Relatório de Mobilidade da Ericsson, divulgado em novembro de 2015, as assinaturas 5G chegarão a 150 milhões em 2021 no mundo, e países como a Coreia do Sul, o Japão, a China e os Estados Unidos serão pioneiros e captarão mais assinantes 5G (ERICSSON, 2015).

Para alcançar as velocidades esperadas e atender ao volume esperado de usuários, será necessário aliar o maior espectro de frequência ao uso de células pequenas para complementar as redes tradicionais. A disponibilidade de bandas novas e avanços nas técnicas MIMO serão responsáveis por melhorar a capacidade de transmissão de rádio.

As redes de transporte precisarão exibir um alto grau de flexibilidade para dar suporte a novos serviços. Para essa finalidade, os recursos principais são abstração e capacidade de programação em todos os aspectos da rede; não apenas a conectividade, mas também armazenagem e processamento. A flexibilidade por meio da capacidade de programação é uma característica significativa que permitirá que as redes de transporte 5G deem suporte rápido ao mercado para novos serviços e dimensionamento eficiente (ERICSSON, 2015).

De acordo com o Ministério das Comunicações, existe uma iniciativa que apoiará a ida de especialistas e pesquisadores brasileiros para acompanhar desenvolvimento do 5G na Europa, através do Projeto Apoio aos Diálogos Setoriais União Europeia-Brasil, com o intuito de promover a troca de informações e de contribuir para o desenvolvimento da tecnologia.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Muitos passos foram dados até que se pudesse chegar à rede existente atualmente. Os primeiros aparelhos celulares em nada lembram os *smartphones* de hoje em dia. As dimensões físicas foram bastante reduzidas até alcançar o título de portátil, e muitas novas funcionalidades foram introduzidas.

As duas primeiras gerações de celulares se baseavam exclusivamente na comutação por circuitos e atendiam a serviços de voz e SMS. Na terceira geração, o perfil do usuário sofreu uma mudança e com isso o serviço de dados começou a ser mais importante do que os serviços de voz. Por esse motivo na 3G passou-se a utilizar também a comutação por pacotes para a transmissão de dados. E, finalmente, a rede 4G foi desenvolvida para alcançar altas velocidades e para tanto, inovou ao introduzir a fibra óptica em sua rede de distribuição de sinais.

As redes de quarta geração têm muitos benefícios a oferecer, porém a sua implementação no país tem um longo caminho a ser percorrido. O custo para o assinante do serviço é considerado alto não só para os padrões brasileiros, mas também quando comparado ao de outros países. Além disso, o serviço ainda encontra reclamações em relação à cobertura e à velocidade mesmo em grandes capitais.

Os problemas de carência de fibra óptica e de indisponibilidade da faixa de frequência de 700 MHz ganham mais importância quando observados com o momento atual da economia brasileira. A insegurança e a crise atuais freiam grandes investimentos das empresas em nova infraestrutura, e como consequência a evolução da rede 4G tende a ser mais lenta.

O padrão LTE *Advanced* é utilizado em alguns países e vem apresentando bons resultados em relação às taxas de dados, e também em relação aos custos que foram diminuídos com o uso de nodes de retransmissão. As perspectivas futuras para a 5G são promissoras e têm a possibilidade de que novos serviços sejam oferecidos, ampliando as funcionalidades da rede.

Portanto, o futuro das redes 4G será norteador pelo aumento na demanda dos serviços de vídeos e *streaming* que exigem maiores capacidade e velocidade de transmissão de dados. Essa maior taxa de dados dependerá do quão eficiente será o uso do espectro de frequência e por esse motivo, o estudo para ampliar o uso de técnicas multi-usuário e antenas MIMO são de suma importância juntamente com pesquisas para o desenvolvimento de novas técnicas.

REFERÊNCIAS

ALENCAR, Gilson A; COSTA, Renata B. F. **Análise de cobertura em redes de comunicações sem fio utilizando a ferramenta de geoprocessamento Spring**. Abr. 2009. Disponível em <<http://martedpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.17.23.40/doc/3425-3432.pdf>> Acesso em 30 nov. 2015.

ALMEIDA, Marco A. F. R. **Introdução ao LTE – Long Term Evolution**. 2013. Disponível em <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialintlte/pagina_5.asp> Acesso em 05 nov. 2015.

AMATO, Fábio. **Cade aprova compartilhamento de rede entre Vivo e Claro**. 2013. Disponível em <<http://g1.globo.com/economia/negocios/noticia/2013/05/cade-aprova-compartilhamento-de-rede-entre-vivo-e-claro.html>> Acesso em 01 dez. 2015.

ANATEL – Agência Nacional de Telecomunicações. **Cobertura de Redes 4G [Dados]**. 2015. Disponível em <http://www.anatel.gov.br/dados/index.php?option=com_content&view=article&id=218:destaque-6&catid=84&Itemid=506> Acesso em 10 out. 2015.

ARRUDA, Felipe. **20 anos de internet no Brasil: aonde chegamos? [Internet]; Conexões 4G LTE e WiMAX: o que podemos esperar delas [4G]; 3G e 4G: entenda as diferenças de infraestrutura [4G]**. 2011. Disponível em <<http://www.tecmundo.com.br>> Acesso em 20 out. 2015.

CAMBOIM, Vinicius C. **TV Digital II: Conceitos e Sistemas**. 2011. Disponível em <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialtvdconsis2/pagina_4.asp> Acesso em 22 out. 2015.

DE SOUZA, Ramon. **Samsung lançará versão do Galaxy S4 compatível com LTE-Advanced**. 2013. Disponível em <<http://www.tecmundo.com.br/samsung-galaxy-s4/40912-samsung-lancara-versao-do-galaxy-s4-compativel-com-lte-advanced.htm>> Acesso em 30 nov. 2015.

ERICSSON. **Ericsson fabrica milésima estação radiobase 4G/LTE no Brasil.** 2012.

Disponível em <http://www.ericsson.com/res/region_RLAM/press-release/2012-09-27-4glte-po.pdf> Acesso em 02 dez. 2015.

ERICSSON. **LTE System Techniques.** STUDENT BOOK LZT 123 8955 R1A. 2008.

Disponível em <http://www.academia.edu/5585900/Ericsson_LTE_system_techniques_R1A> Acesso em 30 out. 2015.

ERICSSON. **Relatório de Mobilidade da Ericsson, Novembro 2015; Flexibilidade nas redes de transporte 5G: o segredo para atender a demanda de conectividade.** 2015.

Disponível em <<http://www.ericsson.com/br/>> Acesso em 30 nov. 2015.

FIRMIN, Frédéric. **The Evolved Packet Core; NAS Protocol.** Disponível em <<http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms>> Acesso em 10 nov. 2015.

GUEDES, Luís C. S; VASCONCELOS, Renan R. **UMTS, HSPA e LTE.** 2009. Trabalho Final de Redes de Computadores I. UFRJ. Disponível em <http://www.gta.ufrj.br/grad/09_1/versao-final/umts/lte.html> Acesso em 05 nov. 2015.

HAMANN, Renan. **Como funcionam as redes 4G? [ilustração].** 2013. Disponível em <<http://www.tecmundo.com.br/4g/40528-como-funcionam-as-redes-4g-ilustracao-.htm>> Acesso em 05 out. 2015.

HUAWEI. **Huawei recomenda espectro mínimo para avançar com 5G.** 2015. Disponível em <<http://www.huawei.com/br/about-huawei/newsroom/press-release/hw-451706-inova--o-5g-pesquisa-desenvolvimento.htm>> Acesso em 20 out. 2015.

JORDÃO, Fabio. **História: a evolução do celular.** 2009. Disponível em <<http://www.tecmundo.com.br/celular/2140-historia-a-evolucao-do-celular.htm>> Acesso em 04 out. 2015.

KARASINSKI, Lucas. **Mais que 4G: entenda a tecnologia LTE-Advanced**. 2013. Disponível em < <http://www.tecmundo.com.br/4g/41622-mais-que-4g-entenda-a-tecnologia-lte-advanced.htm>> Acesso em 20 out. 2015.

KLEINA, Nilton. **A história da Internet: pré-década de 60 até anos 80 [infográfico]**. 2011. Disponível em <<http://www.tecmundo.com.br/infografico/9847-a-historia-da-internet-pre-decada-de-60-ate-anos-80-infografico-.htm>> Acesso em 11 out. 2015.

MACHADO, Renato. **Sistemas de telefonia celular no Brasil**. Disponível em < <http://coral.ufsm.br/gpscom/professores/Renato%20Machado/Telefonia/TelCelular17Renato.pdf>> Acesso em 10 out. 2015.

MALBURG, Maria Moura. **Modulação**. 2004. Trabalho final de Redes I. UFRJ. Disponível em <http://www.gta.ufrj.br/grad/04_2/Modulacao/index.html#Topic2> Acesso em 20 out. 2015.

MENDES SANTOS, Gustavo. **Soluções para Voz em LTE**. 2014. Disponível em <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialltevoz2/pagina_1.asp> Acesso em 20 nov. 2015.

MOWLA, Munjure; HASAN, Mahmud. **Performance Improvement of PAPR Reduction for OFDM Signal in LTE System**. Ago. 2013. Vol. 5. No. 4. Disponível em <<http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1404/1404.2233.pdf>> Acesso em 15 nov. 2015.

NOHRBORG, Magdalena. **LTE**. 2015. Disponível em <<http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte>> Acesso em 05 nov. 2015.

OLIVEIRA, Juliana. **LTE: o futuro da banda larga móvel?** 2009. Disponível em <http://www.tecmundo.com.br/roteador/1763-lte-o-futuro-da-banda-larga-movel-.htm?utm_source=404corrigido&utm_medium=baixaki> Acesso em 07 out. 2015.

OPEN SIGNAL. **The State of LTE.** 2015. Disponível em <<http://opensignal.com/reports/2015/09/state-of-lte-q3-2015/>> Acesso em 30 out. 2015.

PANKIEWICZ, Igor. **O 4G está chegando.** 2009. Disponível em <http://www.tecmundo.com.br/conexao/2453-o-4g-esta-chegando.htm?utm_source=404corrigido&utm_medium=baixaki> Acesso em 20 out. 2015.

PAYÃO, Felipe. **Velocidade monstruosa: tecnologia 5G está sendo testada.** 2015. Disponível em < <http://www.tecmundo.com.br/4g/85632-velocidade-monstruosa-tecnologia-5g-sendo-testada.htm>> Acesso em 15 out. 2015.

PEREIRA, Alexandre Cesar et al. **Tecnologia PLC I: Alternativa para o Plano Nacional de Banda Larga.** 2011. Disponível em <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialplcalt1/pagina_4.asp> Acesso em 22 out. 2015.

PIRES, Edson V. T. et al. **Redes LTE I: Comparação Entre os Modelos de Predição Okumura Hata e ITU-R.** 2012. Disponível em < <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialredeslte/default.asp>> Acesso em 30 nov. 2015.

PORTAL BRASIL. **Programa levará fibra óptica a 90% das cidades brasileiras.** 2015. Disponível em < <http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2015/07/programa-levara-fibra-optica-a-90-das-cidades-brasileiras>> Acesso em 22 nov. 2015.

PRESS, Larry. **ARPANET Maps.** Disponível em <<http://som.csudh.edu/fac/lpress/history/arpamaps/>> Acesso em 10 out. 2015.

PUC – RIO. **Métodos para cálculo de cobertura e interferências. Capítulo 3.** Disponível em <http://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/1121515_2013_cap_3.pdf> Acesso em 30 nov. 2015.

RNP, Rede Nacional de Ensino e Pesquisa. **Nossa história**. 2011. Disponível em <<http://www.rnp.br/institucional/nossa-historia>> Acesso em 15 out. 2015.

ROHDE & SCHWARZ. **LTE-Advanced - Technology Introduction White Paper**. 2012. Disponível em <http://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ma169/1MA169_3e_LTE-Advanced_technology.pdf> Acesso em 30 nov. 2015.

ROHDE & SCHWARZ. **UMTS Long Term Evolution (LTE) - Technology Introduction Application Note**. 2012. Disponível em <http://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ma111/1MA111_4E_LTE_technology_introduction.pdf> Acesso em 13 out. 2015.

SOARES, Edileuza. **O que está em jogo na implementação de 4G no Brasil**. 2015. Disponível em <<http://orlandobarrozo.blog.br/o-que-esta-em-jogo-na-implementacao-de-4g-no-brasil/>> Acesso em 30 out. 2015.

SOARES, Marilson Duarte. **EDGE**. 2003. Disponível em <<http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialedge/default.asp>> Acesso em 20 out. 2015.

TELECO. **LTE (Long Term Evolution): A Evolução das Redes 3G**. 2009. Disponível em <<http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutoriallte/default.asp>> Acesso em 05 nov. 2015.

TELECO. **Seção: 3G**. 2014. Disponível em <http://www.teleco.com.br/3g_tecnologia.asp> Acesso em 15 nov. 2015.

TELECO. **Seção: 4G**. 2015. Disponível em <<http://www.teleco.com.br/lte.asp>> Acesso em 30 nov. 2015.

VALE, Eduardo Rodrigues. **Técnicas para a Melhoria de Desempenho da Transmissão de Voz no Sistema UMTS**. 2006. 129 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro 2006.

WANNSTROM, Jeanette . **LTE - Advanced**. 2013. Disponível em <<http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/97-lte-advanced> > Acesso em 20 out. 2015.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

BARWINSKI, Luísa. **A World Wide Web completa 20 anos, conheça como ela surgiu.** 2009. Disponível em <<http://www.tecmundo.com.br/historia/1778-a-world-wide-web-completa-20-anos-conheca-como-ela-surgiu.htm>> Acesso em 03 out. 2015.

CASTRO, Bruno S. L. **Modelo de propagação para redes sem fio fixas na banda de 5,8 GHz em cidades típicas da região amazônica.** 2010. 45 f. Dissertação de Mestrado. UFPA. Disponível em <http://repositorio.ufpa.br/jspui/bitstream/2011/2628/1/Dissertacao_ModeloPropagacaoRedes.pdf> Acesso em 25 nov. 2015.

CIRIACO, Douglas. **A história da conexão.** 2009. Disponível em <<http://www.tecmundo.com.br/banda-larga/2543-a-historia-da-conexao.htm>> Acesso em 03 out. 2015.

DUMAS, Véronique. **A origem da internet.** Disponível em <http://www2.uol.com.br/historiaviva/reportagens/o_nascimento_da_internet.html> Acesso em 02 out. 2015.

ERICSSON. **The first phase of voice evolution for mobile LTE devices.** 2012. Disponível em <http://www.ericsson.com/res/docs/2012/the_first_phase_of_voice_evolution_for_mobile_lte_devices.pdf> Acesso em 20 nov. 2015.

FONSECA, Erik; SAMPAIO, Ênia. **História da Internet e Órgãos de Coordenação.** Disponível em <<http://homepages.dcc.ufmg.br/~mlbc/cursos/internet/historia/Brasil.html>> Acesso em 01 out. 2015.

GRASEL, Grasiel Felipe. **O que é e como funciona a 4G?** 2014. Disponível em <<https://www.oficinadanet.com.br/post/12569-o-que-e-e-como-funciona-4g>> Acesso em 02 out. 2015.

HAYKIN, Simon; MOHER, Michael. **Sistemas modernos de comunicações wireless**. Porto Alegre: Bookman, 2008.580p.

IKEDA, Ana. **Sinal do 4G no Brasil enfrenta obstáculos "naturais"**. 2013. Disponível em <<http://tecnologia.uol.com.br/noticias/redacao/2013/05/29/sinal-do-4g-no-brasil-enfrenta-obstaculos-naturais-entenda.htm>> Acesso em 22 nov. 2015.

JUNIOR, Nilton S; PEREIRA, Leandro. **Estudo Da Implementação De Redes Long Term Evolution Em Florianópolis/SC**. 2013. 175 f. Trabalho de Conclusão de Curso. UNISUL. Disponível em <http://busca.unisul.br/pdf/108876_leandro.pdf> Acesso em 24 out. 2015.

RAPPAPORT, Theodore S. **Comunicações sem fio: princípios e práticas**. 2.ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009. 410p.

SANTOS, Diego dos. **Planejamento de Cobertura e Capacidade de Redes de Acesso em Banda Larga com Tecnologia LTE**. 2010. 91 f. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Disponível em <http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/Busca_etds.php?strSecao=resultado&nrSeq=17607@1> Acesso em 27 nov. 2015.

SILVA, José G. N. S. **Voice Over LTE: Desafios da solução de voz para a rede 4G**. 2014. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso. Escola Politécnica de Pernambuco. Disponível em <http://tcc.ecomp.poli.br/20142/TCC_vF_Jose%20Guilherme%20Nascimento%20Sousa%20e%20Silva.pdf> Acesso em 19 nov. 2015.