



UNISUL

UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA

Leandro Pereira

Nilto Sens Junior

**ESTUDO DA IMPLEMENTAÇÃO DE REDES LONG TERM EVOLUTION EM
FLORIANÓPOLIS/SC**

Palhoça

2013

**LEANDRO PEREIRA
NILTO SENS JUNIOR**

**ESTUDO DA IMPLEMENTAÇÃO DE REDES LONG TERM EVOLUTION EM
FLORIANÓPOLIS/SC**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia de Elétrica Telemática da Universidade do Sul de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Clecio Marquetti, Esp.eng.

Palhoça
2013

**LEANDRO PEREIRA
NILTO SENS JUNIOR**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado à obtenção do grau de Engenheiro Eletricista e aprovado em sua forma final pelo curso de Graduação em Engenharia Elétrica – Habilitação em Telemática da Universidade do Sul de Santa Catarina.

Palhoça, 28 de Novembro de 2013.



Professor e orientador. Clecio Marquetti, Esp Eng.
Universidade do Sul de Santa Catarina



Professor Glauco de Castro Ligeiro



Professor Nataniel Bona, Esp Eng.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradecemos a Deus pela proteção recebida.

Ao professor Clécio Marquetti, pela contribuição para o desenvolvimento deste relatório e a todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram para que este trabalho consiga atingir aos objetivos propostos.

Aos demais professores, principalmente aqueles que de uma forma ou de outra contribuíram para o nosso crescimento intelectual e que nos auxiliaram em diversos momentos difíceis que passamos.

A todos, o nosso muito obrigado.

RESUMO

No capítulo Arquitetura das Redes Celulares, será apresentado a evolução destas nos releases da 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*), a arquitetura lógica da E-UTRA (*Evolved - Universal Terrestrial Rádio Access*) com suas interfaces e protocolos associados e a arquitetura lógica do EPC (*Evolved Packet Core*). Enquanto em Princípio de Interface Aérea LTE (*Long Term Evolution*), serão descritas as técnicas de interface de rádio utilizadas no *uplink* e *dowlink* considerando os princípios de OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) e a sua estrutura de canais de interface de ar, com detalhamento na estrutura no domínio do tempo da interface de rádio no *uplink* e *downlink* para os modos FDD (*Frequency Division Duplex*) e TDD (*Time Division Duplex*). Serão explicados também os princípios do OFDMA no *downlink*, SC-FDMA (*Single Carrier Frequency Division Multiplexing*) no *uplink*, MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) e o papel do MBMS (*Multimedia Broadcast Multicast Service*) no LTE. No estudo de caso da ativação da rede LTE em Florianópolis, será exposta a motivação para a implementação do serviço 4G no Brasil, as frequências licitadas para este fim, os equipamentos utilizados para transmissão do sinal celular além de simulações de cobertura e avaliação dos resultados obtidos após ativação da rede.

Palavras chave: LTE, 4G, 4G no Brasil, 3GPP.

ABSTRACT

The chapter Architecture of Cellular Networks, presents the evolution of network releases of 3GPP (3rd Generation Partnership Project), the logical architecture of the E-UTRA (Evolved - Universal Terrestrial Rádio Access) with interfaces and protocols associated with it as well as the logical architecture of the EPC (Evolved Packet Core). While in LTE (Long Term Evolution) Air Interface Principles, we describe the techniques used in rádio interface for uplink and downlink considering the principles of OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) and its channel structure of the air interface. It's also detailed the time domain structure of the rádio interface in the uplink and downlink for FDD (Frequency Division Duplex) and TDD (Time Division Duplex), the principles of OFDMA in downlink, SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiplexing) in uplink, MIMO (Multiple Input Multiple Output) and the role of MBMS (Multimedia Broadcast Multicast Service) in LTE. The case study on the activation of LTE network in Florianópolis, exposes the motivation for the implementation of 4G service in Brazil, the frequencies tendered for this purpose, the equipment used for signal transmission, coverage simulations and evaluation of the results obtained after activation of the network.

Keywords: LTE, LTE Advanced, 4G, 4G in Brazil, 3GPP.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: EVOLUÇÃO DAS REDES CELULARES.....	29
Figura 2: SISTEMAS MÓVEIS DE SEGUNDA GERAÇÃO	31
Figura 3: Sistemas Móveis de Terceira Geração.....	34
Figura 4: Sistemas Móveis de Quarta Geração	36
Figura 5: Releases 3GPP	36
Figura 6: HSDPA (Release5).....	39
Figura 7: HSDPA (Release6).....	40
Figura 8: HSDPA+ (Release7).....	41
Figura 9: Release 8 - HSDPA+ e LTE	42
Figura 10: Release 9 e Release 10	43
Figura 11: Arquitetura de Referência LTE	43
Figura 12: Elementos Funcionais do User Equipment.....	45
Figura 13: Elementos Funcionais do Evolved Node B.....	48
Figura 14: Interfaces E-UTRAN	50
Figura 15: Protocolo da Interface Uu.....	52
Figura 16: Protocolo da Interface X2.....	55
Figura 17: Protocolo da Interface S1.....	57
Figura 18: Arquitetura e Interfaces EPC	59
Figura 19: Elementos Funcionais do MME.....	60
Figura 20: Elementos Funcionais do S-GW.....	61
Figura 21: Elementos Funcionais do PDN-GW.....	63
Figura 22: Protocolos da Interface S11.....	64
Figura 23: Protocolo da Interface S5/S8.....	65
Figura 24: Protocolo da Interface S10	66
Figura 25: Protocolo da Interface SGi.....	66
Figura 26: Elementos de Rede e Interfaces Adicionais	68
Figura 27: Elementos de Rede e Interfaces Adicionais	69
Figura 28: Frequency Division Multiple Access	70
Figura 29: Time Division Multiple Access	71
Figura 30: Code Division Multiple Access.....	71
Figura 31: Orthogonal Frequency Division Multiple Access.....	72
Figura 32: Frequency Division Duplex	73

Figura 33: Time Division Duplex.....	74
Figura 34: Uso de OFDM em LTE	75
Figura 35: Subportadoras FDM.	76
Figura 36: Subportadoras OFDM.....	77
Figura 37: Inverse Fast Fourier Transform	77
Figura 38: Fast Fourier Transform	78
Figura 39: Mapeamento de Símbolo OFDM	79
Figura 40: OFDM PAPR (Peak to Average Power Ratio)	80
Figura 41: Atraso de Propagação	81
Figura 42: Inter Symbol Interference – Interferência Inter Simbólica	81
Figura 43: Prefixo Cíclico.....	82
Figura 44: Canais LTE.....	84
Figura 45: Localização dos Canais.....	84
Figura 46: Canais Lógicos BCCH e PCH.....	85
Figura 47: Sinalização em CCCH e DCCH.....	86
Figura 48: <i>Dedicated Traffic Channel</i>	86
Figura 49: Canais de Transporte do LTE em Release 8.....	88
Figura 50: Canais de Rádio	90
Figura 51: Mapeamento dos Canais de Downlink	91
Figura 52: Mapeamento dos Canais de Uplink	91
Figura 53: Estrutura do Quadro LTE.....	92
Figura 54: Cyclic Prefix Normal e Prolongado	93
Figura 55: Quadro de Rádio Tipo 2 TDD	94
Figura 56: OFDMA em LTE.	96
Figura 57: Physical Resource Block e Resource Element.....	97
Figura 58: Parâmetros de PRB de Downlink	97
Figura 59: Downlink Cell ID	98
Figura 60: Localização do PSS e SSS para FDD	99
Figura 61: Localização do PSS e SSS para TDD	99
Figura 62: Conceito de Mapeamento de Subportadora SC-FDMA.....	102
Figura 63: Geração de Sinais SC-FDMA.....	103
Figura 64: SC-FDMA e o eNB	104
Figura 65: SU-MIMO e UM-MIMO	105
Figura 66: Multiplexação de Espacial do MIMO.....	106

Figura 67: Problemas de interferência devido a Multiplexação Espacial	106
Figura 68: Codificação Tempo Espaço	107
Figura 69: Adaptive MIMO Switch	107
Figura 70: Arquitetura Lógica MBMS	108
Figura 71: MBSFN Synchronization Arenas	110
Figura 72: Faixas de frequência 2.500 MHz a 2.690 MHz LTE no Brasil.	111
Figura 73: Throughput na camada física do LTE.....	127
Figura 74: Eficiência Espectral do LTE.....	128
Figura 75: Cluster	133
Figura 76: Interferência dos anéis adjacentes.	136
Figura 77: Interferência com setorização tripla.....	139
Figura 78: Variação do Throughput (Mbps) conforme a distância (m) para largura de banda de 5 MHz.	144
Figura 79: Variação do Throughput (Mbps) conforme a distância (m) para largura de banda de 10 MHz.	145
Figura 80: Variação do Throughput (Mbps) conforme a distância (m) para largura de banda de 15 MHz.....	145
Figura 81: Variação do Throughput (Mbps) conforme a distância (m) para largura de banda de 20 MHz.....	146
Figura 82: Elementos Físicos da eNodeB.....	148
Figura 83: BBU	149
Figura 84: APM30 e IBBS200T.....	150
Figura 85: cabos de fibra ótica CPRI - Conexão.....	151
Figura 86: Cabo coaxial ½”	152
Figura 87: Propagação da antena isotrópica	156
Figura 88: Diagrama de irradiação de uma antena parabólica	160
Figura 89: Modelo de antena utilizada em ERB.....	162
Figura 90: Configurações de Parâmetros de Base para Predição.....	163
Figura 91: Exemplos de configuração de uma eNodeB para predição	164
Figura 92: Simulação de cobertura LTE de Florianópolis utilizando xWizard.	165
Figura 93: Propagação geral da rede LTE Florianópolis para 2600MHz	167
Figura 94: Exemplo de propagação para avaliação da qualidade de cobertura nos pontos notáveis da rede LTE Florianópolis para 2600MHz.	167

Figura 95: Exemplo de equipamento de Drive Test.....	168
Figura 96: Exemplo de SSV estático	169
Figura 97: Drive Test de SSV pós-processado.....	170
Figura 98: Drive Test de Cluster pós-processado.....	171

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Sistema 2G, 2.5G e 2.75G GSM/GPRS	32
Tabela 2: Característica do IMT Advanced	35
Tabela 3: Categorias de UE.....	46
Tabela 4: Canal LTE e Tamanhos de FFT.....	79
Tabela 5: Pontos de Comutação para Quadro de Rádio Tipo 2	95
Tabela 6: SC-FDMA versus OFDMA.....	104
Tabela 7: Distribuição das faixas de frequências 4G entre as operadoras vencedoras da licitação.....	112
Tabela 8: Valores dos Parâmetros para o Link Budget de Downlink.	118
Tabela 9: Sensibilidade Requerida na Recepção para a modulação QPSK.	119
Tabela 10: Valores dos Parâmetros para o Link Budget de Uplink.....	119
Tabela 11: Valores dos Parâmetros do Modelo SUI.....	122
Tabela 12: Valores calculados no Link Budget.	124
Tabela 13: Largura de Banda e Subportadoras LTE.	125
Tabela 14: Capacidade de bits por símbolo das modulações utilizadas no downlink.	125
Tabela 15: Throughput para largura de banda de 5 MHz.	126
Tabela 16: Throughput para largura de banda de 10 MHz.	126
Tabela 17: Throughput para largura de banda de 15 MHz.	126
Tabela 18: Throughput para largura de banda de 20 MHz.	127
Tabela 19: Taxa de Código de Modulação.	130
Tabela 20: Throughput para largura de banda de 5 MHz, adotando taxa de código.....	131
Tabela 21: Throughput para largura de banda de 10 MHz, adotando taxa de código.....	131
Tabela 22: Throughput para largura de banda de 15 MHz, adotando taxa de código.....	131
Tabela 23: Throughput para largura de banda de 20 MHz, adotando taxa de código.....	132
Tabela 24: SNR requerido para respectivas modulações e taxas de códigos.	133
Tabela 25: Fator de Reuso e Razão de Reuso Celular.	135

Tabela 26: Relação SIR considerando o primeiro anel interferente com setorização tripla.	140
Tabela 27: SNR requerido para respectivas modulações e taxas de códigos	141
Tabela 28: Valores dos Parâmetros para o Link Budget de Uplink.....	142
Tabela 29: Raio de atuação das Modulações e respectivas taxas de códigos (MCS).....	143
Tabela 30: Valores medidos de RSRP	166

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1.....	116
Equação 2.....	119
Equação 3.....	120
Equação 4.....	121
Equação 5.....	121
Equação 6.....	121
Equação 7.....	121
Equação 8.....	122
Equação 9.....	122
Equação 10.....	123
Equação 11.....	123
Equação 12.....	123
Equação 13.....	123
Equação 14.....	123
Equação 15.....	124
Equação 16.....	124
Equação 17.....	125
Equação 18.....	125
Equação 19.....	126
Equação 20.....	126
Equação 21.....	128
Equação 22.....	129
Equação 23.....	130
Equação 24.....	132
Equação 25.....	134
Equação 26.....	134
Equação 27.....	134
Equação 28.....	134
Equação 29.....	134
Equação 30.....	135
Equação 31.....	136
Equação 32.....	137
Equação 33: Relação SIR considerando o primeiro anel interferente.	137

Equação 34.....	137
Equação 35.....	139
Equação 36.....	139
Equação 37.....	139
Equação 38.....	140
Equação 39.....	142
Equação 40.....	142
Equação 41.....	156
Equação 42.....	157
Equação 43.....	157
Equação 44.....	157
Equação 45.....	157
Equação 46.....	157
Equação 47.....	158
Equação 48.....	159
Equação 49.....	159
Equação 50.....	160
Equação 51.....	160

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Numéricos

- 16 QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*)
- 2G (*Second Generation*)
- 3G (*Third Generation*)
- 3GPP (*Third Generation Partnership Project*)
- 4G (*Fourth Generation*)

A

- ACK (*Acknowledgement*)
- AM (*Acknowledged Mode*)
- AMPS (*Advanced Mobile Telephone System*)
- AMS (*Adaptive MIMO Switching*)
- APN (*Access Point Name*)
- ARQ (*Automatic Repeat Request*) AS (*Access Stratum*)
- AWS (*Advanced Wireless Services*)

B

- BCCH (*Broadcast Control Channel*)
- BCH (*Broadcast Channel*)

C

- CATT (*China Academy of Telecommunications Technology*)
- CC (*Chase Combining*)
- CCCH (*Common Control Channel*)
- CCE (*Control Channel Element*)
- CDD (*Cyclic Delay Diversity*)
- CDMA (*Code Division Multiple Access*)
- CFI (*Control Format Indicator*)
- CP (*Cyclic Prefix*)
- CPC (*Continuous Packet Connectivity*)
- CQI (*Channel Quality Indicator*)
- CRC (*Cyclic Redundancy Check*)
- C-RNTI (*Cell - Rádio Network Temporary Identifier*)

CS (*Circuit Switched*)
CS (*Cyclic Shift*)
CSG (*Closed Subscriber Group*)

D

DAI (*Downlink Assignment Index*)
D-AMPS (*Digital - Advanced Mobile Phone System*)
DC (*Direct Current*)
DCCH (*Dedicated Control Channel*)
DC-HSDPA (*Dual Cell - HSDPA*)
DCI (*Downlink Control Information*)
DCS (*Digital Cellular Service*)
DFT (*Discrete Fourier Transform*)
DL (*Downlink*)
DL-SCH (*Downlink - Shared Channel*)
DL-SCH (*Downlink Shared Channel*)
DRB (*Dedicated Rádio Bearer*)
DRS (*Demodulation Reference Signal*)
DRX (*Discontinuous Reception*)
DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*)
DTCH (*Dedicated Traffic Channel*)
DTX (*Discontinuous Transmission*)
DwPTS (*Downlink Pilot Time Slot*)

E

EARFCN (*E-UTRA Absolute Rádio Frequency Channel Number*)
EDGE (*Enhanced Data Rates for Global Evolution*)
E-GSM (*Extended GSM*)
EMM (*EPS Mobility Management*)
eNB (*Evolved Node B*)
EPC (*Evolved Packet Core*)
EPLMN (*Equivalent HPLMN*)
EPS (*Evolved Packet System*)
E-RAB (*EPS Rádio Access Bearer*)

ESM (*EPS Session Management*)
ETACS (*Extended Total Access Communication System*)
ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*)
E-UTRA (*Evolved - Universal Terrestrial Rádío Access*)
E-UTRAN (*Evolved - Universal Terrestrial Rádío Access Network*)
EV-DO (*Evolution-Data Optimized*)

F

FDD (*Frequency Division Duplex*)
FDM (*Frequency Division Multiplexing*)
FDMA (*Frequency Division Multiple Access*)
FEC (*Forward Error Correction*)
FFT (*Fast Fourier Transform*)
FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrum*)
FM (*Frequency Modulation*)
FSTD (*Frequency Shift Time Diversity*)

G

GF(2) (*Galois Field (2)*)
GP (*Guard Period*)
GPRS (*General Packet Rádío System*)
GSM (*Global System for Mobile communications*)
GSMA (*GSM Association*)
GUTI (*Globally Unique Temporary Identifier*)

H

HARQ (*Hybrid ARQ*)
HARQ (*Hybrid Automatic Repeat Request*)
HeNB (*Home eNB*)
HI (*HARQ Indicator*)
HPLMN (*Home PLMN*)
HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*)
HSPA (*High Speed Packet Access*)
HS-SCCH (*High Speed - Shared Control Channel*)

HSUPA (*High Speed Uplink Packet Data*)

I

IDFT (*Inverse Discrete Fourier Transform*)

IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*)

IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*)

IMEI (*International Mobile Equipment Identity*)

IMS (*IP Multimedia Subsystem*)

IMSI (*International Mobile Subscriber Identity*)

IMT Advanced (*International Mobile Telecommunications Advanced*)

IMT2000 (*International Mobile Telecommunications - 2000*)

IP (*Internet Protocol*)

IR (*Incremental Redundancy*)

IS-136 (*Interim Standard 136*)

ISI (*Inter Symbol Interference*)

ITU (*International Telecommunication Union*)

L

LCID (*Logical Channel Identifier*)

LCR (*Low Chip Rate*)

LTE (*Long Term Evolution*)

M

MAC (*Medium Access Control*)

MBSFN (*MBMS over Single Frequency Network*)

MCS (*Modulation and Coding Scheme*)

MGW (*Media Gateways*)

MIB (*Master Information Block*)

MIMO (*Multiple Input Multiple Output*)

MME (*Mobility Management Entity*)

MSC (*Mobile Switching Centre*)

Msg3 (*Higher Layer Message*)

MU-MIMO (*Multi User - MIMO*)

N

NACK (*Negative Acknowledgement*)

NAS (*Non Access Stratum*)

NDI (*New Data Indicator*)

O

OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*)

OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*)

P

PAPR (*Peak to Average Power Ratio*)

PBCH (*Physical Broadcast Channel*)

PCCH (*Paging Control Channel*)

PCFICH (*Physical Control Format Indicator Channel*)

PCH (*Paging Channel*)

PCS (*Personal Communications Service*)

PDCCH (*Physical Downlink Control Channel*)

PDCCP (*Packet Data Convergence Protocol*)

PDN-GW (*Packet Data Network - Gateway*)

PDSCH (*Physical Downlink Shared Channel*),

PF (*Paging Frame*)

P-GSM (*Primary GSM*)

PH (*Power Headroom*),

PHICH (*Physical Hybrid ARQ Indicator Channel*)

PHR (*Power Headroom Report*), 2-85

PHY (*Physical Layer*)

PL (*Pathloss*)

PLMN (*Public Land Mobile Network*)

PMI (*Precoding Matrix Indicator*)

PO (*Paging Occasion*)

PRACH (*Physical Random Access Channel*)

PRB (*Physical Resource Block*)

PS (*Packet Switched*)

P-S (*Parallel to Serial*)

PSS (*Primary Synchronization Signal*)
PTM (*Point-To-Multipoint*)
PTP (*Point-To-Point*)
PUCCH (*Physical Uplink Control Channel*)
PUSCH (*Physical Uplink Shared Channel*)

Q

QoS (*Quality of Service*)
QPP (*Quadratic Permutation Polynomial*)
QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*)

R

R (*Cell Ranking*)
RA (*Random Access*)
RACH (*Random Access Channel*)
RAN (*Rádio Access Network*)
RAPID (*Random Access Preamble Identifier*)
RA-RNTI (*Random Access - RNTI*)
RB (*Rádio Bearer*)
RB (*Resource Block*)
RBG (*Resource Block Groups*)
RE (*Resource Element*)
REG (*Resource Element Group*)
R-GSM (*Railways GSM*)
RI (*Rank Indication*)
RIV (*Resource Indication Value*)
RLC (*Rádio Link Control*)
PvNC (*Rádio Network Controller*)
RRC (*Rádio Resource Control*)
RS (*Reference Signals*)
RSRP (*Reference Signal Received Power*)
RSRQ (*Reference Signal Received Quality*)
RSSI (*Received Signal Strength Indicator*)
RV (*Redundancy Version*)

S

S (*Cell Selection*)

SAW (*Stop And Wait*)

SC-FDMA (*Single Carrier - Frequency Division Multiple Access*)

SFBC (*Space Frequency Block Coding*)

SFN (*System Frame Number*),

S-GW (*Serving Gateway*)

SI (*System Information*)

SIB (*System Information Block*)

SIB 1 (*System Information Block Type1*)

SI-RNTI (*System Information - Rádio Network Temporary Identifier*)

SM (*Spatial Multiplexing*)

SMS (*Short Message Service*)

S-P (*Serial to Parallel*)

SR (*Scheduling Request*)

SRB (*Signaling Rádio Bearer*)

SRS (*Sounding Reference Signal*) SSS (*Secondary Synchronization Signal*)

STC (*Space Time Coding*)

SU-MIMO (*Single User - MIMO*)

T

TA (*Timing Alignment*)

TAC (*Tracking Area Code*)

TACS (*Total Access Communications System*)

TAI (*Tracking Area Identity*)

TB (*Transport Block*)

TBS (*Transport Block Set*)

TBS (*Transport Blok Size*)

TD (*Transmit Diversity*)

TD-CDMA (*Time Division CDMA*)

TDD (*Time Division Duplex*)

TDMA (*Time Division Multiple Access*)

TD-SCDMA (*Time Division Synchronous CDMA*)

TF (*Transport Format*)

TFT (*Traffic Flow Template*)
TM (*Transparent Mode*)
TPC (*Transmit Power Control*)
TPMI (*Transmitted Precoding Matrix Indicator*)
TTI (*Time Transmission Interval*)
TX (*Transmit*)

U

UCI (*Uplink Control Information*)
UE (*User Equipment*)
UL (*Uplink*)
UL-SCH (*Uplink Shared Channel*)
UM (*Unacknowledged Mode*) UMB (*Ultra Mobile Broadband*)
UpPTS (*Uplink Pilot Time Slot*) USIM (*Universal Subscriber Identity Module*)

V

VRB (*Virtual Resource Block*)

W

WCDMA (*Wideband CDMA*)
WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	MOTIVAÇÃO	25
1.2	JUSTIFICATIVA	26
1.3	OBJETIVO	26
1.3.1	Objetivo Geral	Erro! Indicador não definido.
1.3.2	Objetivos específicos	Erro! Indicador não definido.
1.4	METODOLOGIA DA PESQUISA	27
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	28
2	ARQUITETURA DA REDE	29
2.1	EVOLUÇÃO DAS REDES CELULARES	29
2.1.1	SISTEMAS MÓVEIS DE PRIMEIRA GERAÇÃO	29
2.1.2	SISTEMAS MÓVEIS DE SEGUNDA GERAÇÃO	30
2.1.3	SISTEMAS MÓVEIS DE TERCEIRA GERAÇÃO	32
2.1.4	SISTEMAS MÓVEIS DE QUARTA GERAÇÃO	34
2.2	RELEASES 3GPP	36
2.2.1	PRE-RELEASE 99	37
2.2.2	RELEASE 99	37
2.2.3	RELEASE 4	38
2.2.4	RELEASE 5	38
2.2.5	RELEASE 6	39
2.2.6	RELEASE 7	40
2.2.7	RELEASE 8	41
2.2.8	RELEASE 9	42
2.3	ARQUITETURA E-UTRAN	43
2.3.1	USER EQUIPMENT	44
2.3.2	Evolved Node B – eNodeB	47
2.3.3	FEMTO CELLS	49
2.4	INTERFACES E PROTOCOLOS DA E-UTRAN	50
2.4.2	INTERFACE X2	54
2.4.3	INTERFACE S1	57
2.5	ARQUITETURA EPC	58
2.5.1	MOBILITY MANAGEMENT ENTITY	59

2.5.2	SERVING – GATEWAY	61
2.5.3	REDE DE PACOTES DE DADOS (<i>PACKET DATA NETWORK</i>) - GATEWAY	62
2.6	INTERFACES E PROTOCOLOS DO EPC.....	63
2.6.1	INTERFACE S11	63
2.6.2	INTERFACE S5/S8.....	64
2.6.3	INTERFACE S10	65
2.6.4	INTERFACE SGi.....	66
2.6.5	Elementos de Rede e Interfaces Adicionais	67
3	PRINCIPIOS DE INTERFACE AÉREA LTE.....	69
3.1	TÉCNICAS DA INTERFACE DE RÁDIO	69
3.1.1	FREQUENCY DIVISION MULTIPLE ACCESS.....	70
3.1.2	TIME DIVISION MULTIPLE ACESS	70
3.1.3	CODE DIVISION MULTIPLE ACESS	71
3.1.4	ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION MULTIPLE ACCESS	72
3.1.5	MODOS DE TRANSMISSÃO	73
3.2	PRINCÍPIOS DE OFDM	74
3.2.1	FREQUENCY DIVISION MULTIPLEXING	75
3.2.2	SUBPORTADORAS OFDM.....	76
3.2.3	FAST FOURIER TRANSFORMS–TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER	77
3.2.4	TAMANHOS DA FFT DE LTE.....	78
3.2.5	MAPEAMENTO DE SÍMBOLOS OFDM	79
3.2.6	INTERFERÊNCIA NO DOMÍNIO DO TEMPO	80
3.2.7	VANTAGENS E DESVANTAGENS DO OFDM	83
3.3	ESTRUTURA DE CANAIS LTE	83
3.3.1	CANAIIS LÓGICOS	84
3.3.2	CANAIIS DE TRANSPORTE	87
3.3.3	CANAIIS FÍSICOS	88
3.3.4	CANAIIS DE RÁDIO	90
3.3.5	MAPEAMENTO DE CANAIS	90
3.4	ESTRUTURA DO QUADRO LTE	92
3.4.1	QUADROS DE RÁDIO TIPO 1, SLOTS E SUB-QUADROS	92
3.4.2	QUADROS DE RÁDIO TIPO 2, SLOTS E SUB-QUADROS	94
3.5	OFDMA NO DOWNLINK.....	95
3.6	ESTRUTURA GERAL DO OFDMA.....	95

3.6.1	PHYSICAL RESOURCE BLOCKS E RESOURCE ELEMENTS.....	96
3.6.2	SINAIS FÍSICOS LTE	98
3.6.3	SINAIS DE REFERÊNCIA DE DOWNLINK.....	100
3.7	SC-FDMA NO UPLINK.....	101
3.7.1	GERAÇÃO DE SINAIS SC-FDMA.....	102
3.8	MULTIPLE INPUT E MULTIPLE OUTPUT	105
3.8.1	MULTIPLEXAÇÃO ESPACIAL	106
3.8.2	CODIFICAÇÃO TEMPO ESPAÇO	107
3.8.3	ADAPTATIVE MIMO SWITCH.....	107
3.9	MULTIMÍDIA BROADCAST MULTISERVICE	108
3.9.1	ARQUITETURA LÓGICA MBS	108
4	ESTUDO DE CASO – ATIVAÇÃO DA REDE LTE EM FLORIANÓPOLIS....	111
4.1	4G NO BRASIL.....	111
4.1.1	FREQUENCIAS 4G LICITADAS.....	111
4.1.2	PREMISSAS E OBJETIVOS DA LICITAÇÃO DO 4G.....	112
4.1.3	CRONOGRAMA DE EXECUÇÃO	114
4.2	IMPLANTAÇÃO DO SERVIÇO 4G EM FLORIANÓPOLIS.....	114
4.2.1	PLANEJAMENTO DA REDE LTE.....	114
4.2.2	LINK BUDGET	116
4.2.3	ELEMENTOS FÍSICOS DA eNODEB.....	147
4.2.4	ANTENAS	155
4.2.5	EXECUÇÃO DO PROJETO	162
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	172

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo será tratado da motivação, justificativas e objetivos gerais e específicos a serem desenvolvidos neste trabalho.

1.1 MOTIVAÇÃO

LTE é o acrônimo para *Long Term Evolution*, atualmente apresentado ao mercado como 4G.

Esta tecnologia é o caminho natural de upgrade optado pelas operadoras que possuem redes GSM e UMTS, pois sua compatibilidade torna mais “suave” a mudança do conceito da rede voz para uma rede baseada completamente em *dados*.

Na exponencial crescente demanda por serviços de dados, este padrão para redes sem fio tem como meta, apresentar elevadas taxas de dados nos aparelhos celulares. Tendo como base as tecnologias das redes legadas GSM/EDGE e UMTS/HSPA, o LTE tem incrementado consideravelmente a sua capacidade e velocidade ao utilizar técnicas de modulação na sua interface aérea diferente das tecnologias anteriores e agregando melhorias e simplificação na rede Core. Este padrão foi desenvolvido pelo 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) com especificações descritas nos documentos do release¹ 8 e com aprimoramentos nos releases 9 e 10.

O presente trabalho irá demonstrar de maneira sucinta os princípios de funcionamento da estrutura de uma rede LTE, bem como a sua ativação em Florianópolis/SC pela operadora VIVO. O objetivo principal será explicar a arquitetura desta rede e as técnicas de transmissão da mesma pela interface aérea.

¹ Release significa “liberar” novos avanços e melhorias de uma determinada tecnologia.

1.2 JUSTIFICATIVA

Das demandas crescentes por serviço de dados nas redes móveis citados anteriormente temos também outros fatores que incentivaram a implantação do serviço 4G no Brasil

Os fatores que colaboraram para aumentar este interesse foram à realização de grandes eventos no Brasil nestes próximos anos dentre os quais podemos citar a Copa do Mundo e as Olimpíadas.

Tendo em vista a esta grande demanda “internacional” a ANATEL abriu uma licitação ofertando novas frequências com o objetivo de serem utilizadas para o LTE.

No contexto da licitação, as operadoras ao adquirirem novas frequências adquiriram também obrigações contratuais, dentre os quais temos a ativação em um prazo gradativo pré-determinado do serviço 4G para alguns municípios no Brasil.

Termina no final de 2013 o prazo para as operadoras atenderem com 4G em todos os municípios sedes e subsedes da Copa do Mundo 2014. E Florianópolis ao ser selecionado como subsede, foi considerado uma prioridade na ativação do serviço LTE.

1.3 OBJETIVO

1.3.1 OBJETIVO GERAL

Realizar um estudo teórico do princípio de funcionamento da rede LTE e suas peculiaridades. Neste trabalho será apresentado uma introdução rápida sobre o desenvolvimento desta tecnologia, a fim de facilitar o entendimento. Faremos um estudo de caso da ativação da rede LTE em Florianópolis, apresentando graficamente os resultados com testes realizados e simulações de cobertura.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para conseguirmos atender o escopo deste trabalho, é necessário seguir o roteiro:

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre redes celulares;
- Fazer uma análise das frequências disponibilizadas para implantação do LTE;
- Descrever conceitualmente o funcionamento de uma rede LTE;
- Executar um estudo de caso da ativação do 4G na cidade de Florianópolis.

1.4 METODOLOGIA DA PESQUISA

Para obter um conhecimento específico sobre o tema proposto, é necessário fazer uma pesquisa bibliográfica sobre os conceitos de telecomunicações.

Fazer o uso de métodos científicos e técnicas a fim de encontrar esclarecimentos necessários para que se obtenha subsídio teórico, visando entender o funcionamento de uma rede LTE.

Estudar normas e conceitos da rede LTE no site do 3GPP² entre outros na internet.

Levantar informações junto a operadora de telefonia VIVO e no site da Anatel para o estudo de caso, referente à ativação da rede 4G em Florianópolis.

Apresentar simulações de cobertura geradas pela ferramenta *Wizard* e medidas coletadas por ferramenta de *“Drive Test”*.

² A 3GPP (3rd Generation Partnership Project) é uma colaboração entre grupos e associações de telecomunicações, formada em 1998 para fomentar a implantação de redes celulares que descendem do GSM.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho será dividido em cinco capítulos, e a estrutura será definida da seguinte forma:

Capítulo 1 – Introdução que será subdividido em delimitação do tema, motivação, justificativa, objetivos e metodologia, apresentados de maneira breve.

Capítulo 2 – Apresentará o conceito da arquitetura da rede LTE, descrevendo a evolução das redes celulares e sua evolução, explicando a arquitetura lógica, interfaces e protocolos de elementos de rede.

Capítulo 3 – Este capítulo irá discorrer sobre técnicas de interface de rádio utilizadas no LTE, às estruturas de canais na interface ar e processos de multiplexação espacial.

Capítulo 4 – Estudo de caso referente ativação da rede 4G em Florianópolis.

Capítulo 5 – Por fim, este capítulo mostra as considerações finais e conclusões.

2 ARQUITETURA DA REDE

Neste capítulo será descrito um resumo da evolução das redes celulares dos releases da 3GPP, dos 99 aos 9 e 10, a arquitetura lógica da E-UTRA com suas interfaces e protocolos associados. Nesta mesma linha também a arquitetura lógica do EPC.

2.1 EVOLUÇÃO DAS REDES CELULARES.

Redes móveis celulares têm evoluído por muitos anos. “Os sistemas iniciais, que são referidos como “Primeira Geração “, foram substituídos por soluções de” Segunda Geração” e “Terceira Geração” No entanto hoje, os sistemas 4G ou “Quarta Geração” estão sendo implantados.

Figura 1: EVOLUÇÃO DAS REDES CELULARES



Fonte: Autor, 2013

2.1.1 SISTEMAS MÓVEIS DE PRIMEIRA GERAÇÃO.

Os sistemas móveis 1G (Primeira Geração) não eram digitais, ou seja, eles utilizaram técnicas de modulação analógica. Os principais sistemas foram (COX, 2012):

- AMPS (*Advanced Mobile Telephone System*) – apareceu pela primeira vez em 1976 nos Estados Unidos e foi implementado principalmente nas Américas, Rússia e Ásia. Varias questões, incluindo recursos de segurança fracos tornaram o sistema propenso à clonagem do telefone.

- TACS (*Total Access Communications System*) – Esta foi à versão europeia do AMPS, mas com ligeiras modificações, incluindo a operação em

diferentes faixas de frequência. Foi utilizado principalmente no Reino Unido, bem como partes da Ásia.

- ETACS (*Extended total Access Communication System*) – Este sistema proporcionou uma versão melhorada do TACS. Permitiu um maior número de canais e, portanto, mais usuários.

Estes sistemas analógicos eram todos sistemas proprietários baseados em FM (*Frequency Modulation*) e, portanto, nenhum deles tinha segurança, qualquer serviço de dados significativos e capacidade de roaming internacional.

2.1.2 SISTEMAS MÓVEIS DE SEGUNDA GERAÇÃO.

Os sistemas 2G (Segunda Geração) utilizam a tecnologia de múltiplos acessos digital tais como TDMA (*Time Division Multiplique Access*) e CDMA (*CODE Division Multiplique Access*).

Figura 2 ilustra alguns dos diferentes sistemas móveis 2G, incluindo (COX, 2012):

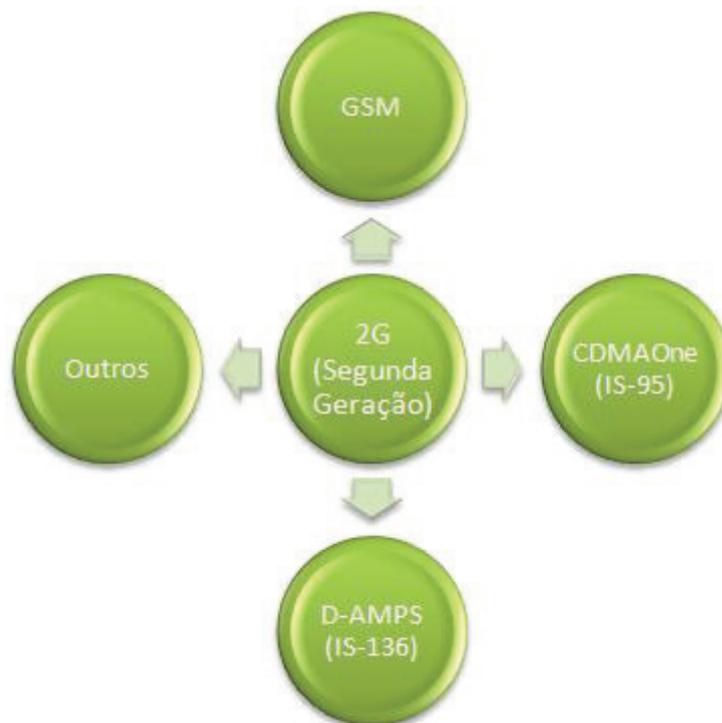
- GSM (*Global System for Mobile Communications*) – esta é a mais bem sucedida de todas as tecnologias 2G. Foi inicialmente desenvolvido pelo ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) para a Europa e projetado para operar nas faixas de frequências de 900 MHz e 1800 MHz. Ela agora tem apoio em todo o mundo e está disponível para implantação em muitas outras bandas de frequências, como 850 MHz. Um móvel descrito como tri-band indica suporte para múltiplas bandas de frequência no mesmo dispositivo. GSM utiliza TDMA e, com o tal, emprega oito *timeslots* em uma portadora de rádio 200 kHz.

- cdmaOne – este é um sistema CDMA (*Code Division Multiplique Acess*) com base no IS-95 (*Interim Standard 95*). Ele usa uma técnica de espelhamento espectral que incorpora uma mistura de códigos e de tempo para identificar as células e canais. A largura de banda do sistema é de 1,25 MHz.

- D-AMPS (*Digital Advanced Mobile Phone System*) – este é baseado no IS-136 (*Interim Standard 136*) e é efetivamente um aprimoramento ao AMPS.

Suportando uma técnica de acesso TDMA, D-AMPS é usado principalmente no continente Norte-Americano, bem como na Nova Zelândia e partes da região Ásia-Pacífico.

Figura 2: SISTEMAS MÓVEIS DE SEGUNDA GERAÇÃO



Fonte: Autor, 2013

Além de serem digitais, com as melhorias associadas na capacidade segurança, estes sistemas 2G também oferecem serviços avançados, tais como SMS (*Short Message Service*) e dados comutados por circuito.

2.1.2.1 Sistemas 2.5G

A maioria dos sistemas 2G já evoluiu. Por exemplo, o GSM foi estendido com o GPRS (*General Packet Rádio System*) para suportar de forma eficiente os serviços de dados em pacotes bem como aumentar as taxas de dados (HUAWEL, 2012).

Como esta funcionalidade não atende aos requisitos 3G, GPRS, portanto, é muitas vezes referido com 2,5G. Uma comparação entre sistemas 2G e 2.5G é ilustrado na tabela 1.

2.1.2.2 Sistemas 2.75G

Sistemas GSM/GPRS também acrescentaram EDGE (*Enhanced Data Rates for Global Evolution*). Isto quase quadruplica o *throughput* de GPRS. A taxa de dados teórica de 473.6 kbps permite aos provedores de serviços uma forma eficiente de oferecerem serviços multimídia. Como o GPRS, EDGE é geralmente classificado como 2.75G, uma vez que não preenche todos os requisitos de um sistema 3G (HUAWEI, 2012).

Tabela 1: Sistema 2G, 2.5G e 2.75G GSM/GPRS

Sistema	Serviço	Taxa de Dados Teóricos	Taxa de Dados Típicos
2G GSM	Comutação por Circuito	9.6 kbit/s or 14.4 kbit/s	9.6 kbit or 14.4 kbit/s
2.5G GPRS	Comutação por Pacotes	171.2 kbit/s	4 kbit/s para 50 kbit/s
2.75G EDGE	Comutação por Pacotes	473.6 kbit/s	120 kbit/s

Fonte: HUAWEI, 2012

2.1.3 SISTEMAS MÓVEIS DE TERCEIRA GERAÇÃO

Sistemas 3G (Terceira Geração), que são definidos pelo IMT2000 (*International Mobile Telecommunications – 2000*), afirmam que deverão ser capazes de fornecer maiores taxas de transmissão, por exemplo: 2 Mbps para uso fixo ou nômade e 384Kbps em um veículo em movimento.

As principais tecnologias 3G estão ilustradas na figura 3. Incluem (COX, 2012):

- W-CDMA (Wideband CDMA) – Este foi desenvolvido pelo 3GPP (*Third Generation Partnership Project*). Existem numerosas variações sobre esse padrão, incluindo TD-CDMA e TD-SCDMA. W-CDMA é o principal caminho evolutivo de redes GSM/GPRS. É um sistema com base FDD (*Frequency Division Duplex*) e ocupa uma portadora de 5 MHz. Implementações atuais estão principalmente em 2.1GHz, no entanto as implantações em frequências mais baixas também estão sendo aplicadas, por exemplo, UMTS1900, UMTS900, UMTS850, etc. W-CDMA suporta serviços de voz e multimídia com uma taxa inicial teórica de 2 Mbps, no

entanto, a maioria dos provedores de serviços inicialmente oferecem 348Kbps por usuário. Esta tecnologia continua evoluir e versões posteriores do 3GPP Têm aumentado as taxas para mais de 40 Mbps;

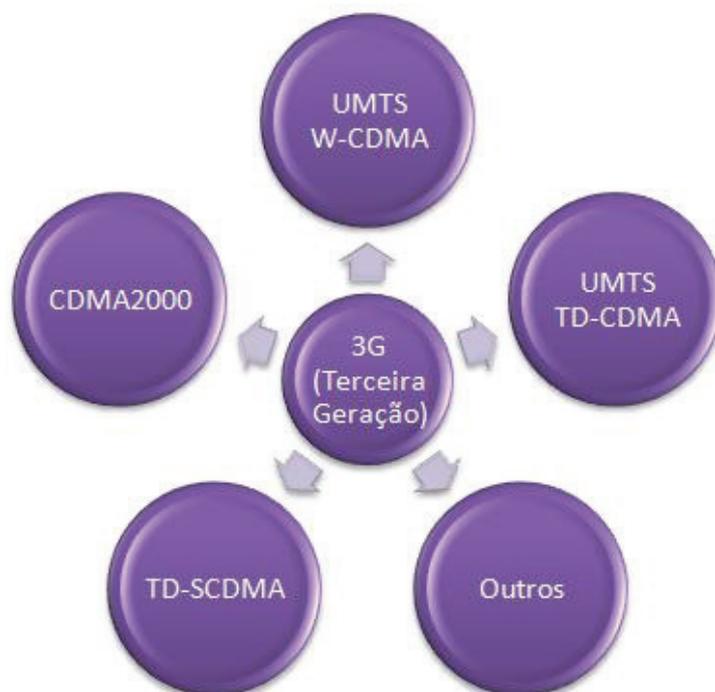
- TD-CDMA (*Time Division CDMA*) - Este é geralmente conhecido como UMTS TDD (*Time Division Duplex*) e faz parte das especificações do UMTS, porem tem suporte limitado. O sistema utiliza uma combinação de CDMA e TDMA para permitir a alocação eficiente dos recursos;

- TD-SCDMA (*Time Division Synchronous CDMA*) – Este foi desenvolvido em conjunto pela Siemens e CATT (*China Academy of Telecommunications Technology*);

- TD-SCDMA tem ligações com as especificações do UMTS e é frequentemente identificado como UMTS TDD-LCR (*Low Chip Rate*). Como TD-CDMA, também é mais adequado para os cenários de baixa mobilidade em micro ou pico células;

- CDMA2000 – Este é um padrão de tecnologia multi-portadora que usa CDMA. CDMA2000 é na verdade um conjunto de normas, incluindo CDMA2000 EV-DO (*Evolution-Data Optimized*), que tem varias “revisões”. É interessante notar que CDMA2000 é compatível com o *cdmaOne*;

Figura 3: Sistemas Móveis de Terceira Geração.



Fonte: Autor, 2013

- WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) – está é uma outra tecnologia sem fio que satisfaz os requisitos do IMT2000 3G. A interface aérea é parte do standard 802.16 do IEEE (Institute of Electronics Engineers) que originalmente definiu sistemas PTP (*Point-to-Point*) e PTM (*Point-to-Multipoint*). Isto foi posteriormente aprimorado para oferecer mobilidade e uma maior flexibilidade. O sucesso do WiMAX se deve principalmente ao “WiMAX Fórum”, uma organização formada para promover a conformidade e interoperabilidade entre os fornecedores.

2.1.4 SISTEMAS MÓVEIS DE QUARTA GERAÇÃO

Sistemas celulares sem fio 4G (Quarta Geração) precisam atender aos requisitos definidos pelo ITU (*International Telecommunication Union*) como parte do *IMTAdvanced* (*International Telecommunication Advanced*). Ilustrado na tabela 2, essas características permitem ao *IMT Advanced* atender as necessidades de evolução dos usuários (COX, 2012).

Tabela 2: Característica do IMT Advanced

Características Recursos Avançado IMT
Um alto grau de funcionalidade comum no mundo inteiro, mantendo a flexibilidade para suportar uma ampla gama de serviços e aplicações de uma forma economicamente eficiente.
Compatibilidade de serviços dentro do IMT e com as redes fixas.
Capacidade de interoperabilidade com outros sistemas de acesso por rádio.
Serviços móveis de alta qualidade.
Aparelho celular (<i>User Equipment</i>) adequado para uso em todo o mundo.
Aplicações amigáveis de serviços e equipamentos.
Capacidade de roaming mundial.
Pico de taxas de dados reforçadas para suportar serviços e aplicações avançadas (100 Mbit/s em alta e 1Gbit/s para baixa mobilidade).

Fonte: 3GPP, 2011

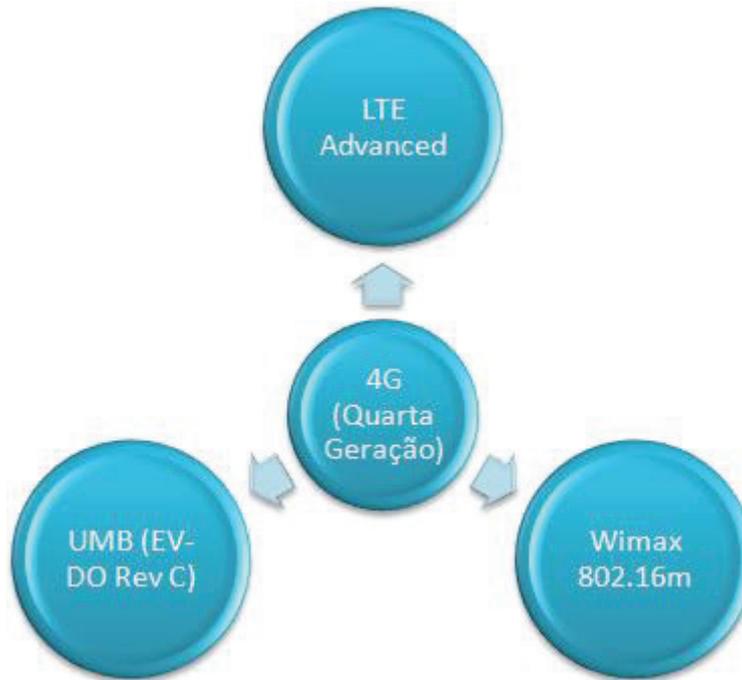
Os três principais sistemas 4G incluem (COX, 2012):

- LTE *Advanced* – LTE (*Long Term Evolution*) é parte da família de especificações do 3GPP, porém não atende todas as características do IMT Advanced, como tal, e por vezes referido como 3.99G. Em contraste, LTE *Advanced* faz parte de uma versão posterior do 3GPP e tem sido projetado especificamente para atender aos requisitos de 4G;

- Wimax 802.16m – IEEE e o WiMAX Fórum identificaram 802.16m como sua alternativa para um sistema 4G;

- UMB (*Ultra Mobile Broadband*) – Este é identificado como EV-DO Ver C. É parte do 3GPP2, no entanto a maioria dos fornecedores e fornecedores de serviços decidiu promover LTE ao invés do UMB;

Figura 4: Sistemas Móveis de Quarta Geração

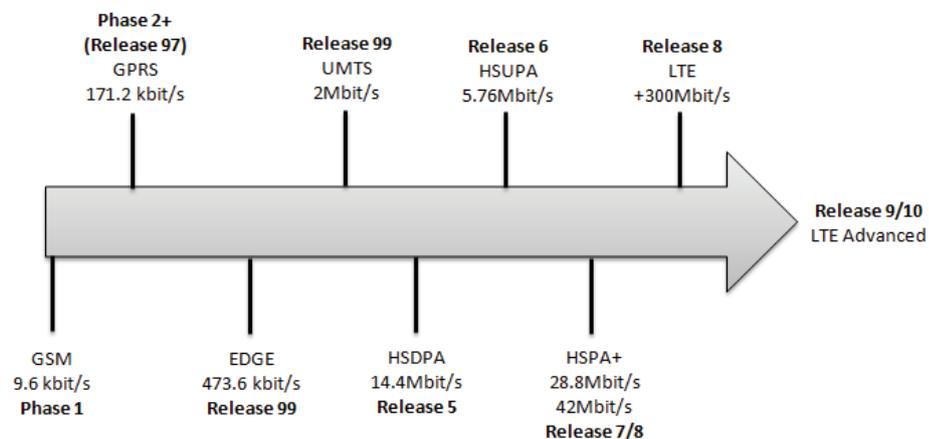


Fonte: Autor, 2013

2.2 RELEASES 3GPP

O desenvolvimento de GSM, GPRS, EDGE, UMTS, HSPA e LTE estão em estágios conhecidos como *Releases* 3GPP. Fornecedores de hardware e desenvolvedores de software usam esses releases como parte de seu roteiro de desenvolvimento. Figura 5 ilustra os principais Releases 3GPP, que incluem os principais aprimoramentos da interface de rádio (3GPP, 2011).

Figura 5: Releases 3GPP



Fonte: Autor, 2013

Releases 3GPP melhoram vários aspectos da rede e não apenas a interface de rádio. Por exemplo, Release5 começou a introdução do IMS (*IP Multimedia Subsystem*) na rede core.

2.2.1 PRE-RELEASE 99

Pré- Release 99 viu a introdução do GSM, bem como a adição de GPRS. As principais fases GSM e *Releases* 3GPP incluem (3GPP, 2011):

- GSM Fase 1;

- GSM Fase 2;

- GSM Fase 2+ (Release 96);

- GSM Fase 2+ (Release 97);

- GSM Fase 2+ (Release 98).

2.2.2 RELEASE 99

3GPP Release 99 testemunhou a introdução de UMTS, bem como a aprimoramento do EDGE para GPRS. UMTS contém todas as características necessárias para atender aos requisitos do IMT-2000 como os definidos pela ITU. É capaz de suportar serviços de vídeo e de voz CS (*Circuit Switched*), bem como serviços de dados PS (*Packet Switched*) sobre portadores (*bearers*) comuns e dedicados. Taxas iniciais de dados para UMTS foram 64Kbps, 128Kbps e 348Kbps. Note-se que o Máximo teórico é igual a 2 Mbps (3GPP, 2011).

2.2.3 RELEASE 4

Release 4 inclui melhorias na rede core e, em particular a noção de que seja independente do portador de serviço (*bearer*). Assim, o conceito “*All IP*” foi incluído e provedores de serviços foram capazes de implantar redes baseadas em Soft Switch, ou seja, MSC (*Mobile Switching Center*) foi substituído pelo MSC Server e MGW (*Media Gateways*) (3GPP, 2011).

2.2.4 RELEASE 5

Release 5 introduz a primeira adição importante para a interface aérea UMTS, especificando HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*), a fim de melhorar a capacidade e eficiência espectral . Figura 6 ilustra algumas das principais características associadas ao Release 5 e estas incluem (3GPP, 2011):

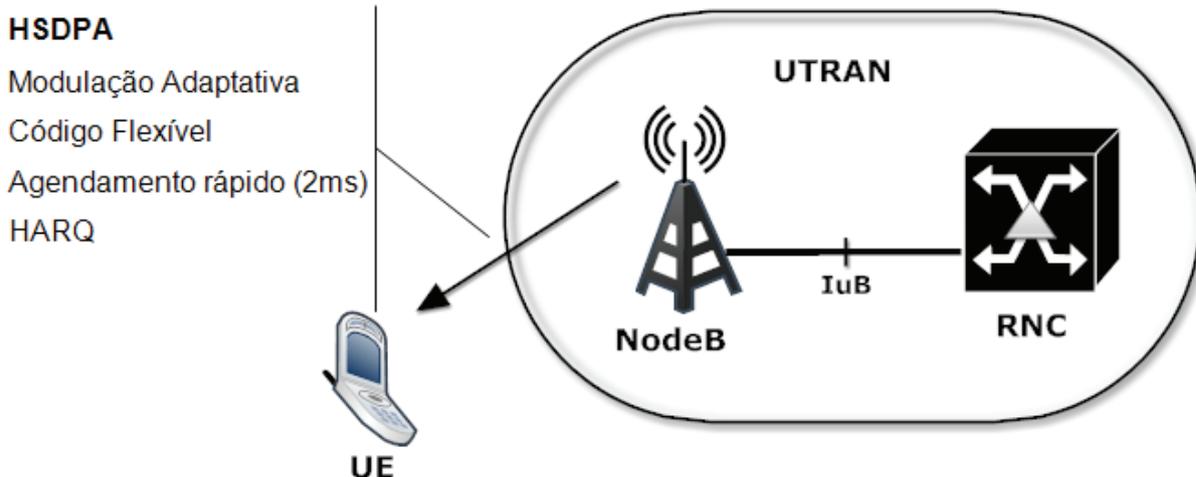
- Adaptive Modulation – Além do esquema de modulação do original UMTS, QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*), HSDPA também inclui suporte para 16 QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*);

- Flexible Coding – Com base no *feedback* rápido do móvel em forma de CQI (*Channel Quality Indicator*), a estação base UMTS, ou seja, o NodeB, é capaz de modificar a taxa efetiva de codificação e, assim, aumentar a eficiência do sistema;

- Fast Scheduling – HSDPA inclui TTI (*Transmission Time Interval*) de 2 ms que permite ao Schedule do NodeB, alocar recursos de forma rápida e eficiente para os moveis;

- HARQ (*Hybrid Automatic Repeat Request*) – No caso de um pacote não chegar ao EU (*User Equipment*) com sucesso, o sistema utiliza HARQ. Isso melhora o tempo de retransmissão, o que requer uma menor dependência do RNC (*Rádio Network Controller*).

Figura 6: HSDPA (Release5)



Fonte: Autor, 2013

2.2.5 RELEASE 6

Release 6 adiciona várias características, com HSUPA (*High Speed Uplink Packet Data*), sendo de maior interesse para o desenvolvimento de RAN. Mesmo que o termo HSUPA esteja difundido, esse aprimoramento 3GPP também é conhecido como “*Enhanced Uplink*”. É importante notar também que HSDPA e HSUPA trabalham em conjunto e, assim, o termo HSPA (*High Speed Packet Access*) é agora de uso comum.

HSUPA, como HSDPA acrescenta funcionalidade para melhorar os dados por pacotes. Figura 7 ilustra as três principais melhorias que incluem (3GPP, 2011):

- Flexibilidade *Coding* – HSUPA tem a capacidade de alterar dinamicamente a codificação e, portanto melhorar a eficiência do sistema;

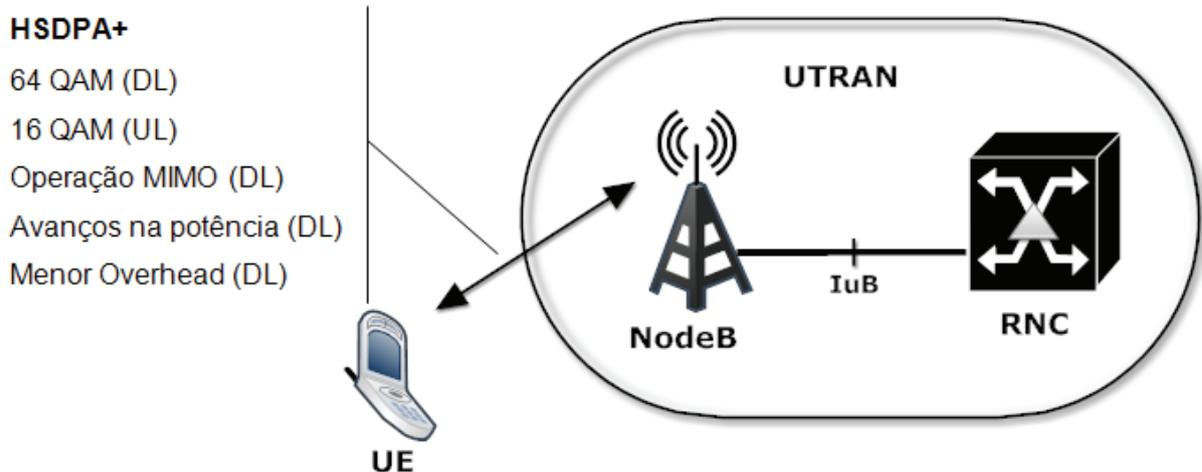
- Fast Power Scheduling* – Um fato fundamental de HSUPA é que ele oferece um método para agendar (ajustar) a potência a de moveis diferentes. Este agendamento pode utilizar um TTI 2ms ou 10ms;

- HARQ – Como HSDPA, HSUPA também utiliza HARQ. A principal diferença é a relação de tempo para retransmissão.

Less Operation, etc. coletivamente, tais praticas permitem melhorar o consumo da bateria dos celulares;

- *Less Overhead* – O *downlink* inclui um aperfeiçoamento a camada MAC (*Medium Access Control*) que na pratica significa são necessários menos cabeçalhos. Este por sua vez, reduz o overhead e, assim, melhora a eficiência do sistema.

Figura 8: HSDPA+ (Release7)



Fonte: Autor, 2013

2.2.7 RELEASE 8

Há muitas melhorias á funcionalidade de RAN no *Release 8*, como um aprimoramento para HSPA +. No entanto, o principal aspecto é a inclusão de LTE (*Long Term Evolution*). Figura 9 ilustra algumas das principais características para Release8, HSPA + e LTE.

Para o HSPA +, o *Release 8* permite diversas melhorias importantes, tais como (3GPP, 2011):

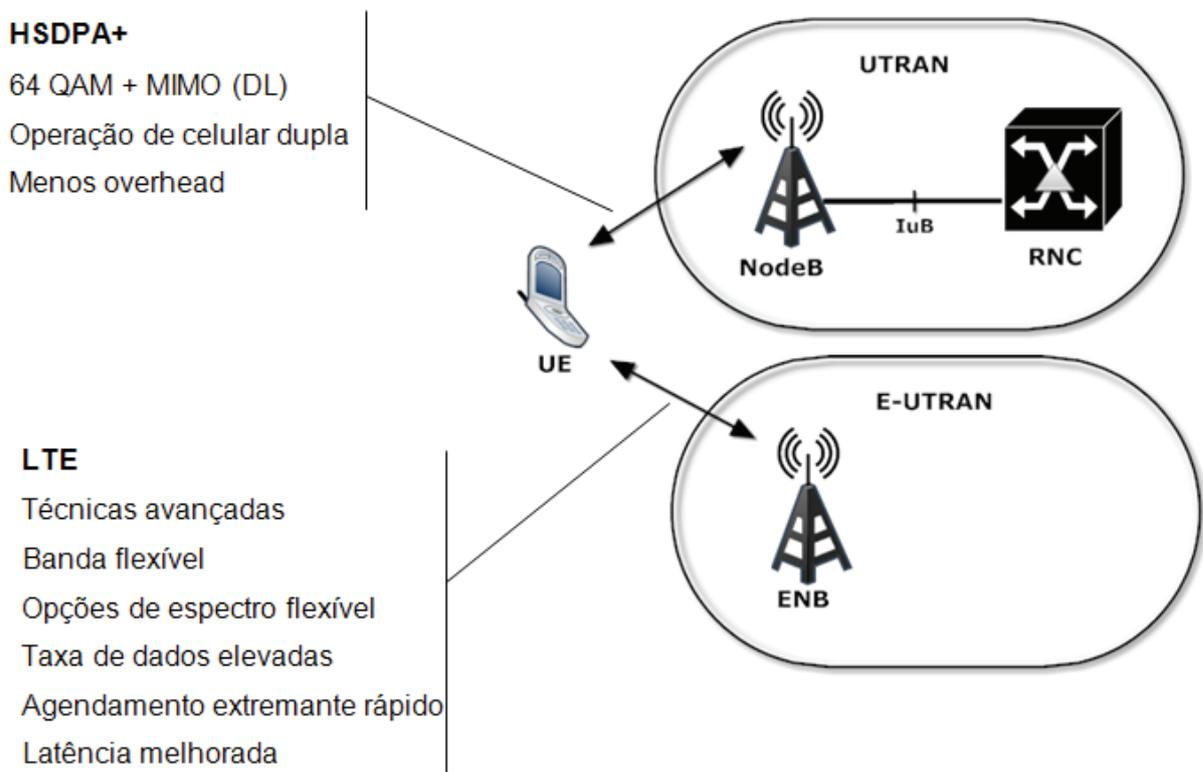
- 64 QAM e MIMO – *Release 8* permite a combinação de 64 QAM e MIMO, assim, chegando a uma taxa teórica de 42Mbps, ou seja, 2 x 21.6 Mbps;

- Dual Cell Operation* – DC – HSDPA (*Dual Cell* – HSDPA) é uma funcionalidade do Release 8 que é aprimorada no Release 9 e Release 10. Ela

permite a um móvel utilizar eficazmente duas portadoras UMTS de 5MHz. Supondo que ambos estão usando 64 QAM (21.6MBPS), o Máximo teórico é 42 Mbps. Note que no *Release 8*, um móvel não é capaz de combinar MIMO e DC-HSDPA;

•*Less Uplink Overhead* – De uma forma semelhante ao *downlink* no Release 7, o *uplink* no Release 8 também foi melhorado para reduzir overhead.

Figura 9: Release 8 - HSDPA+ e LTE



Fonte: Autor, 2013

LTE oferece uma nova técnica de acesso de rádio, bem como melhorias no E-UTRAN (*Evolved – Universal Terrestrial Rádio Acess Network*). Essas melhorias são discutidas como parte deste trabalho.

2.2.8 RELEASE 9

Apesar de o LTE ser um sistema do Release 8, ele é ainda mais aprimorado no Release 9. Há um número enorme das características no Release 9. Uma das mais importantes é o suporte de bandas de frequência adicionais.

Figura 10: Release 9 e Release 10



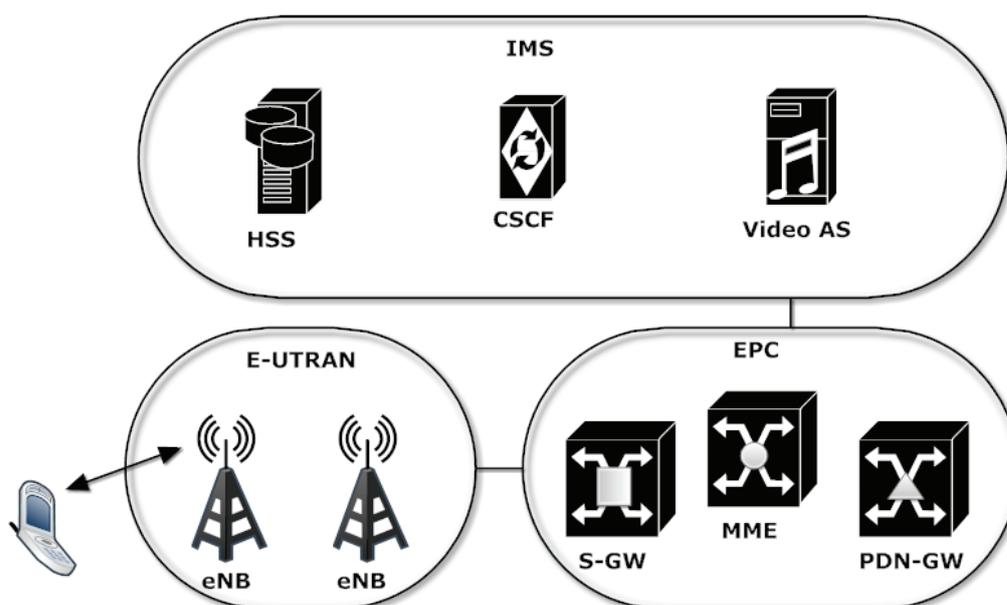
Fonte: Autor, 2013

Release 10 inclui a padronização de *LTE Advanced*, ou seja, a solução 3GPP para 4G, como tal, inclui a modificação do sistema LTE para fornecer serviços de 4G (3GPP, 2011).

2.3 ARQUITETURA E-UTRAN.

Em contraste com redes 2G e 3G definido pelo 3GPP, LTE pode ser simplesmente dividido em uma rede portadora baseada em IP, e em uma rede de habilitação de serviços. A primeira pode ser subdividida em E-UTRAN (*Evolved-Universal Terrestrial Rádio Access Network*) e EPC (*Evolved Packet Core*), onde o suporte ao fornecimento de serviços encontra-se no IMS (*IP Multimedia Subsystem*). Esta arquitetura de referencia pode ser vista na figura 11.

Figura 11: Arquitetura de Referência LTE



Fonte: Autor, 2013

Enquanto UMTS é baseada em tecnologia W-CDMA, o 3GPP desenvolveu novas especificações para a interface aérea LTE baseada em OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) no *downlink* e SC-FDMA (*Single Carrier – Frequency Division Multiple Access*) no *uplink*. Esta nova interface aérea é chamada de E-UTRA (*Evolved – Universal Terrestrial Radio Access*) (HUAWEI, 2012).

2.3.1 USER EQUIPMENT

Como o de UMTS, o dispositivo móvel em LTE é chamado de UE (*User Equipment*) e é composto de dois elementos distintos, o USIM (*Universal Subscriber Identity Module*) e ME (*Mobile Equipment*).

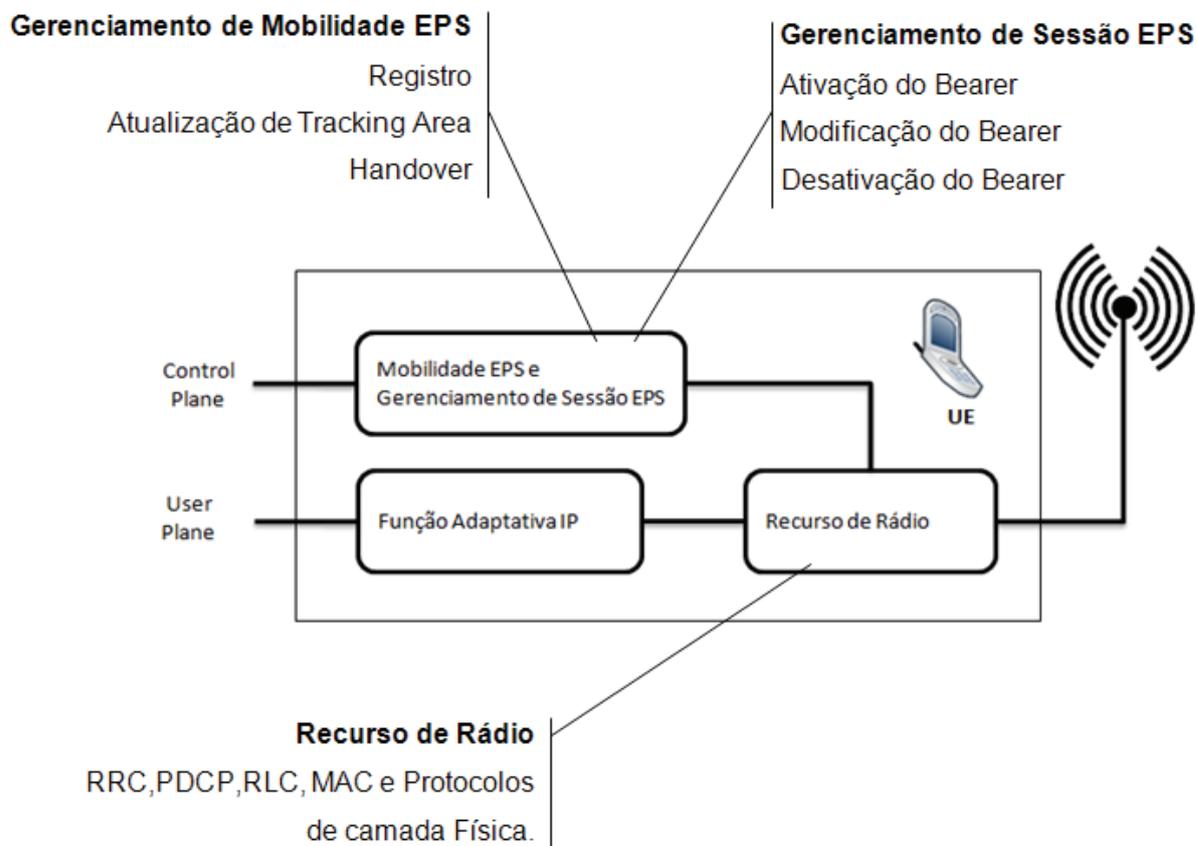
O ME suporta um número de entidades funcionais, incluindo (HUAWEI, 2012):

- RR (*Radio Resource*) – este suporta tanto o plano de controle quanto o plano de usuário e com isso. É responsável por todos os protocolos de baixo nível, incluindo RRC (*Radio Resource Control*), PDCP (*Packet Data Convergence Protocol*), RLC (*Radio Link Control*), MAC (*Medium Access Control*) e o *Phy Layer* (Física);

- EMM (*EPS Mobility Management*) – é uma entidade de plano de controle que gerencia os estados de mobility management em que o UE pode existir; LTE Idle, LTE Active e LTE *Detached*. Transições dentro desses estados incluem procedimentos como o TAU (Tracking Area Update) e *handovers*;

- ESM (*EPS Session Management*) – É uma atividade do plano de controle que gerencia a ativação, modificação e desativação dos contextos de *bearers* EPS. Este pode ser contexto de *bearer* EPS padrão contextos de *bearer* EPS dedicado;

Figura 12: Elementos Funcionais do User Equipment



Fonte: Autor, 2013

Em termos de camada Física as capacidades da UE podem ser definidas em termos de frequências e taxas de dados suportadas. Dispositivos podem também ser capazes de suportar modulação adaptável, incluindo QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*), 16QAM (*16 Quadrature Amplitude Modulation*) e 64QAM (*64 Quadrature Amplitude Modulation*).

Em termos de espectro de rádio, o UE é capaz de suportar vários canais, escalonáveis, incluindo: 1.4MHz, 3MHz, 5MHz, 10MHz, 15MHz e 20MHz enquanto operacional em FDD (*frequency Division Duplex*) e/ou TDD (*Time Division Duplex*). Além disso, o UE também pode suportar funcionalidades avançadas, tais como antena MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) que será discutido no capítulo 3.7.

Tabela 3: Categorias de UE.

Categoria de UE	Máxima taxa de dados no Downlink	Número de fluxo de dados no Downlink	Máxima taxa de dados no Uplink	Suporte de 64 QAM no Uplink
1	10.3Mbit/s	1	5.2Mbit/s	No
2	51.0Mbit/s	2	25.5Mbit/s	No
3	102.0Mbit/s	3	51.0Mbit/s	No
4	150.8Mbit/s	4	51.0Mbit/s	No
5	302.8Mbit/s	5	75.4Mbit/s	YES

Fonte: HUAWEI, 2012

2.3.1.1 IDENTIDADEDES DO UE.

Um UE com capacidade LTE irá utilizar um número de identidade durante a operação dentro da rede. Estes incluem (HUAWEI, 2012):

- IMSI (*International Mobile Subscriber Identity*) – este está conformidade com o formato padrão 3GPP e é composto pelo MCC (Mobile Contry Code), MNC (*Mobile Network Code*) e o MSIN (*Mobile Subscriber Identity Number*). Este identifica exclusivamente um assinante a partir da família de tecnologias 3GPP – GSM, GPRS, UMTS, etc;

- IMEI (*International Mobile Equipment Identity*) – é usado para identificar exclusivamente o ME. Pode ser subdividida em um TAC (Type Approval Code), FAC (Final Assembly Code) e SNR (Serial Number);

- GUTI (*Global Unique Temporary Identity*) – é atribuído ao UE pelo MME (*Mobility Management Entity*) e identifica um dispositivo para um MME específico. A identidade é composta por um GUMMEI (Globally Unique MME Identity). E um M-TMSI (*MME – Temporary Mobile Subscriber Identity*);

- S- TMSI (*Serving – Temporary Mobile Subscriber Identity*) – É usado para proteger o IMSI do assinante durante a sinalização NAS (*Non Acesso Stratum*) entre o UE e o MME, bem como identificar o MME a partir de um pool de MMEs. O S-TMSI é composto do MMEC (*MME Code*) e o M-TMSI;

- *IP Address* – O UE necessita de um endereço IP roteável do PDN (*Packet Data Network*) da qual ele está recebendo serviços de camada superior. Este pode ser um endereço IPV4 ou IPV6.

2.3.2 Evolved Node B – eNodeB.

Além da nova interface aérea, uma nova estação base é especificada pelo 3GPP e é referida como um eNB (*EvolvedNodeB*). Estes, juntamente com suas interfaces associadas formam a E-UTRAN e com isso, são responsáveis por (HUAWEI, 2012):

- *RRM (Rádio Resource Management)* – isso envolve a atribuição ao UE, dos recursos físicos no Uplink e Downlink, controle de acesso e controle de mobilidade;

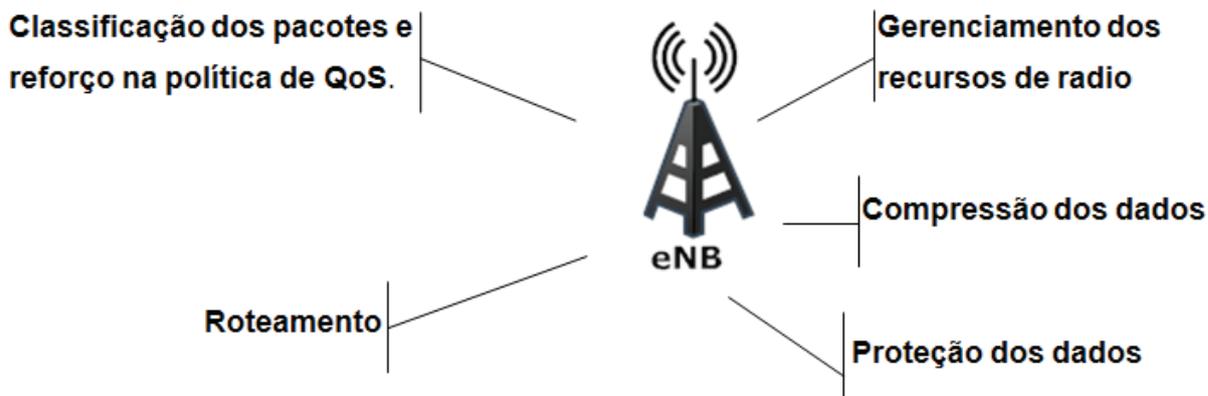
- *compressão de Dados* – é realizada em ambos o eNB e o UE, a fim de maximizar a quantidade de dados do usuário que podem ser transferidos sobre o recurso alocado. Este processo é realizado pelo PDCP;

- *proteção dos Dados* – é realizada no eNB e no UE, a fim de criptografar e proteger a integridade de sinalização RRC e criptografar os dados do usuário na interface de ar;

- *roteamento* - isso envolve o encaminhamento de sinalização de plano de controle para o MME e o tráfego de plano de usuário para o S-GW (*Serving – Gateway*);

- *classificação de pacotes e aplicação de política de QoS* – isso envolve a “marcação” de pacotes de uplink com base nas informações de assinatura ou políticas da operadora local. Aplicação de políticas de QoS (Quality of Service) é responsável por assegurar que essa política é aplicada na borda da rede.

Figura 13: Elementos Funcionais do Evolved Node B.



Fonte: Autor, 2013

Segurança em LTE não é apenas limitado à criptografia e proteção da integridade da informação que passa através da interface ar. Também ocorre a criptografia e proteção da integridade NAS entre o UE e o MME. Além disso, o IPSec também pode ser usado para proteger os dados do usuário, tanto na E-UTRAN quanto no EPC.

2.3.2.1 IDENTIDADES DO eNB

Além das unidades de UE já discutidas, há uma serie de identidades específicas associadas com o e NB. Estes incluem (HUAWEL, 2012):

- TAI (*Tracking Area Identity*) – é um grupo lógico de células vizinhas, definido pelo fornecedor de serviços em que um UE em modo LTE Idle, é capaz de se mover sem a necessidade de atualização da rede. Como tal, ele é semelhante a um RAI (*Routing Area Identity*) usado em redes PS 2G e 3G;

- ECGI (*Evolved Cell Global Identity*) – é composto pelo MCC, MNC e ECI (*Evolved Cell Identity*), o ultimo sendo codificados por cada provedor de serviços;

2.3.3 FEMTO CELLS

A fim de melhorar a cobertura e capacidade da rede, o 3GPP desenvolveu um novo tipo de estação-base para operar dentro da casa ou ambiente de pequena empresa. Denominado HeNB (*Home Evolved NodeB*), este elemento de rede faz parte do E-UTRAN e com isso, compatível com o padrão de interfaces E-UTRAN. No entanto, deve-se afirmar que HeNBs não suportam a interface X2.

A arquitetura pode incluir uma HeNB-GW (*Home Evolved NodeB – Gateway*), que reside entre o HeNB no E-UTRAN e o MME/S- GW no EPC, a fim de escala e de suportar um grande número de implementações de estações base (HUAWEI, 2012).

2.3.3.1 IDENTIDADES DE HeNB

Para ajudar na operação eficiente de ambos os UE e a rede, há uma série de identidades adicionais que foram introduzidas pelo 3GPP para operação de femto cells. Estes são (HUAWEI, 2012):

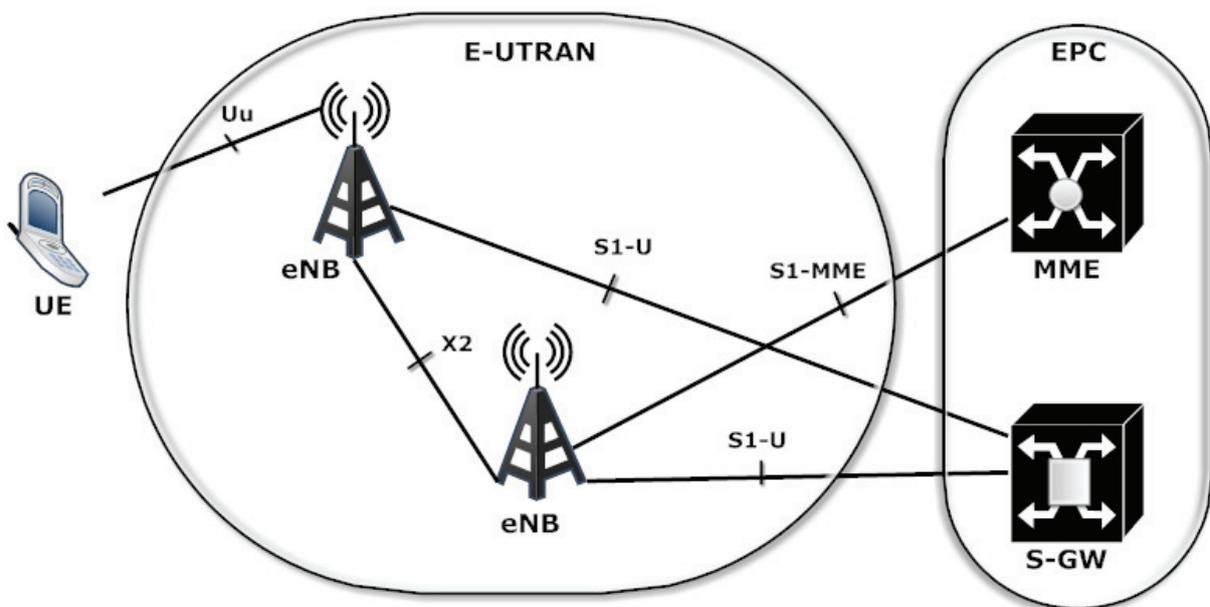
- CSG (*Closed Subscriber Group*) *Identity* – é usado por um UE para determinar se é permitido usar o HeNB. A identidade CSG é transmitido em mensagens SI (Informações do Sistema);

- Nome do HeNB – é um nome legível em texto livre transmitido pela HeNB para informar os assinantes da identidade do HeNB em que eles estão registrados, ou estão a registrar-se;

2.4 INTERFACES E PROTOCOLOS DA E-UTRAN

Tal como acontece com todas as tecnologias 3GPP, são as interfaces reais que são definidas em termos dos protocolos que suportam e as mensagens de sinalização associadas e tráfego de usuários que elas transportam.

Figura 14: Interfaces E-UTRAN



Fonte: Autor, 2013

A interface Uu suporta o plano de controle e o plano do usuário e se estende por toda a ligação entre o UE e os eNB/HeNB. O protocolo do plano de controle é o RRC enquanto o plano do usuário é projetado para transformar datagramas IP. No entanto, ambos os planos de controle e usuários utilizam os serviços de PDCP, RLC e MAC (HUAWEI, 2012).

2.4.1.1 Rádio Resource Control

RRC lida com todas as sinalizações entre o UE e a E-UTRAN, além de transportar sinalização NAS entre o UE e o MME. Ele também fornece a configuração principal e parâmetros para os protocolos de camada inferior. Por exemplo, a camada *Phy* receberá informações de RRC.

Sobre a forma de configuração de alguns dos seus aspectos. As principais responsabilidades do RRC incluem (HUAWEI, 2012):

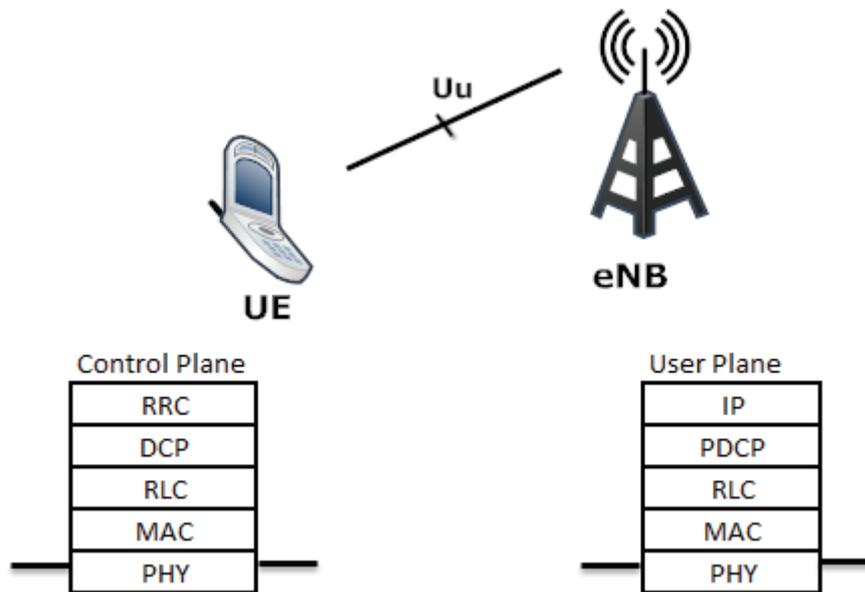
- Informações do Sistema.
- seleção de PLMN e a seleção de célula;
- controle de admissão;
- gerenciamento de segurança;
- re-seleção de célula;
- *measurement report*;
- *handovers* e mobilidade;
- transporte NAS.
- RRM – *Rádio Resource Management*.

2.4.1.2 PACKET DATA CONVERGENCE PROTOCOL

PDCP opera tanto no plano de controle e plano usuário. Além de compressão de cabeçalho IP e sequenciamento/detecção de pacotes duplicados, PDCP também é responsável pela segurança na interface aérea. Como tal, suas responsabilidades incluem (HUAWEI, 2012):

- Criptografia – plano de controle e plano de usuário.
- verificação da integridade – plano de controle.
- compressão de cabeçalho IP – plano de usuário.
- sequenciamento e Detecção de Duplicidade – plano de usuário.

Figura 15: Protocolo da Interface Uu.



Fonte: Autor, 2013

2.4.1.3 RÁDIO LINK CONTROL

Como o nome sugere, RLC oferece controle no “rádio link” entre UE e eNB e com isso, fornecer três tipos de serviços de entrega para camadas mais altas estas são (HUAWEI, 2012):

- TM (*Transparent Mode*) – Fornece um serviço sem conexão e utilizado para alguns dos canais de interface aérea, por exemplo, *broadcast* e *paging*;

- UM (*Unacknow Mode*) – Como o TM , este também oferece um serviço sem conexão, mas com funcionalidades adicionais incorporando segmentação, sequenciamento, e concatenação;

- AM (*Acknowledged Mode*) – suporta ARQ (*Automatic Repeat reQuest*) desse modo, operando em um modo de conexão orientada.

2.4.1.4 MEDIUM ACCESS CONTROL

MAC provê a interface entre os protocolos de E-UTRA e a camada *Phy* e suporta os seguintes serviços (HUAWEI, 2012):

- Mapeamento – é o “mapeamento” de informações entre os canais lógicos e de transporte;

- *Multiplexing* – a fim de aumentar a eficiência do sistema, as informações dos diferentes *Rádios Bearers* é multiplexada no mesmo TB (Bloco de Transporte);

- HARQ (*Hybrid Automatic Repeat Request*) – fornece serviços de correção de erro sobre a interface aérea. Este exige uma estreita interação com a camada física;

- *Rádio Resource Allocation* (Alocação de Recursos de Rádio) – é o agendamento de tráfego e de sinalização para usuários baseada em QoS.

2.4.1.5 PHYSICAL (FÍSICA)

A camada física incorpora uma serie de funções, incluindo (HUAWEI, 2012):

- Detecção de Erros

- codificação/ decodificação FEC (*Forward Error Correction*);

- *rate matching*;

- mapeamento de canais físicos;

- ponderação de potência;

- modulação e demodulação de RF;

- sincronização de tempo e frequência;
- mediações de rádio;
- processamento de MIMO;
- diversidade de transmissão;
- beamforming*;
- processamento de RF,

2.4.2 INTERFACE X2

A interface X2 interliga duas eNBs a assim suporta tanto o plano de controle quanto o plano de usuário. Ela também estende a interface S1 quando dois ou mais eNBs estão entre o UE e o EPC. O protocolo X2AP(*X2 Application Protocol*) de plano de controle utiliza SCTP (Stream Control Transmission Protocol), e o plano usuário utiliza os serviços de GTP-U (*GPRS Tunneling Protocol – User*) e UDP (*User Datagram Protocol*) (HUAWEI, 2012).

2.4.2.1 X2 Application Protocol

O X2AP é responsável pelas seguintes funções (HUAWEI, 2012):

- Gerenciamento de mobilidade – isso permite ao eNB servidor mover a responsabilidade de um UE específico para um eNB alvo. Isto inclui encaminhamento do plano de usuário, transferência de estado e funções de liberação de contexto do EU;

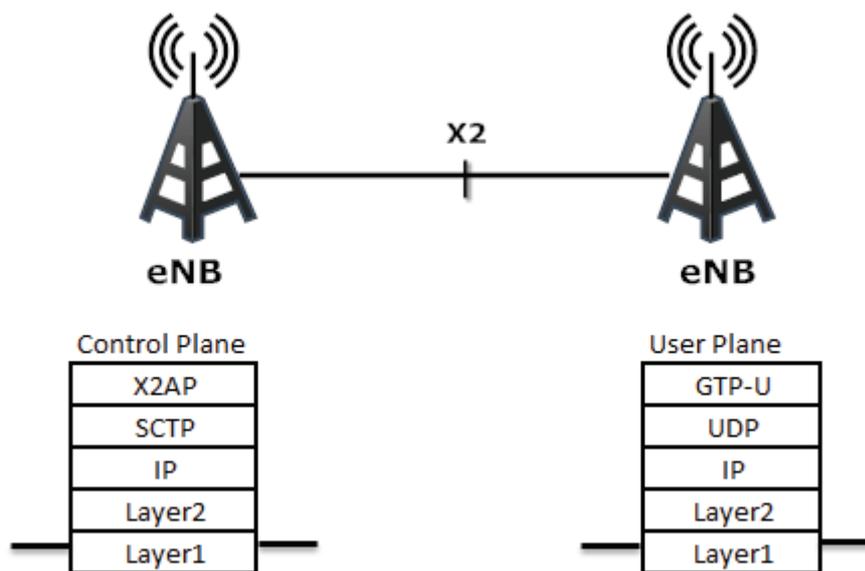
- gerenciamento de carga – esta função permite aos eNBs se comunicar uns com os outros, a fim de relatar o status dos recursos, as indicações de sobrecarga e de carga de tráfego atual;

- relatório de Erros – permite o relato de situações de erro geral para o qual mecanismos de relatórios específicos de erro não foram definidos;

- configuração/ Reconfiguração de X2 – Isso proporciona um meio pelo qual a interface X2 pode ser configurada/reconfigurada, trocando as informações necessárias entre os eNBs;

- atualização de Configuração – Isso permite a atualização dos dados no nível do aplicativo, que e necessário por duas eNBs para interoperar através da interface X2.

Figura 16: Protocolo da Interface X2.



Fonte: Autor, 2013

2.4.2.2 STEAM CONTROL TRANSMISSION PROTOCOL

Definido pelo IETF (*Internet Engineering Task Force*) em vez do 3GPP, SCTP foi desenvolvido para superar as deficiências no TCP (*Transmission Control Protocol*) e UDP na transferência de informações de sinalização sobre uma portadora IP. Funções fornecidas pelo SCTP incluem (HUAWEI, 2012):

- Entrega confiável de *payloads* de camada superior;
- entrega sequencial de *payloads* de camada superior;
- resiliência melhorada através do *multihoming*;
- controle de Fluxo;
- segurança aprimorada.

SCTP também é encontrado na interface S1 – MME, que liga o eNB ao MME.

2.4.2.3 GPRS TUNNELING PROTOCOL – USER.

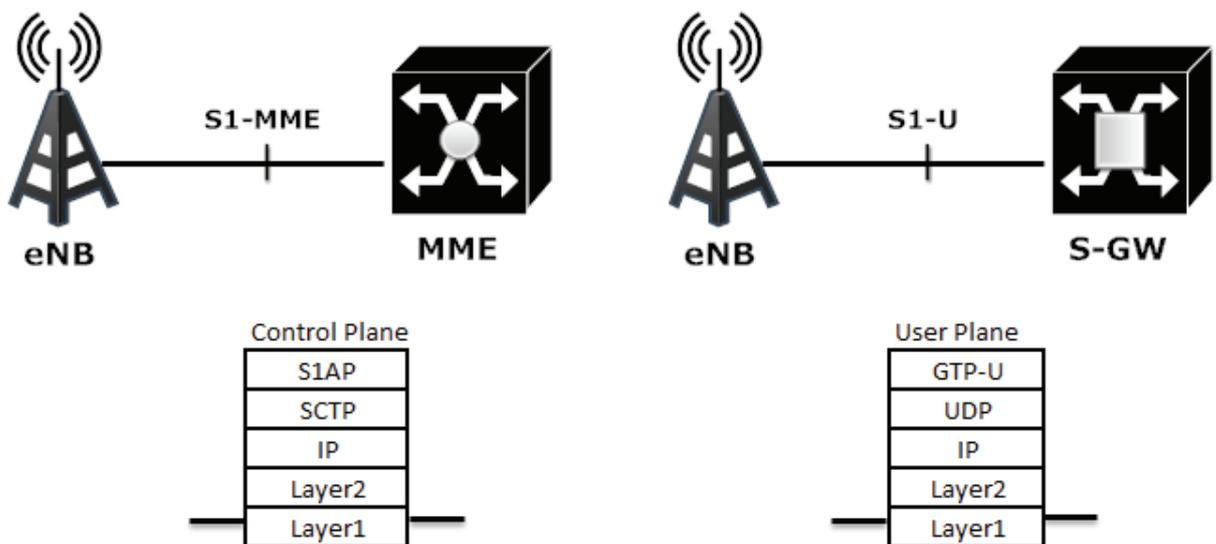
Túneis GTP-U são usados para transportar PDU (*Protocol Data Unit*) encapsulados e mensagens de sinalização entre os terminais ou, no caso da interface X2, entre eNBs. Numerosos túneis GTP-U podem existir para diferenciar entre os contextos de portadora EPS e estes são identificados através de uma TEID (*Tunnel Endpoint Identifier*).

GTP-U também é encontrado na interface S1-U que liga o eNB ao S-GW e também pode ser usado na interface S5 que liga o S-GW ao PDN-GW (HUAWEI, 2012).

2.4.3 INTERFACE S1

A Interface S1 pode ser subdividida em de interfaces: S1-MME que suporta sinalização do plano de controle entre o eNB e o MME e a interface S1-U que suporta o tráfego do plano de usuário entre eNB e o S-GW (HUAWEI, 2012).

Figura 17: Protocolo da Interface S1.



Fonte: Autor, 2013

2.4.3.1 S1 APPLICATION PROTOCOL

O S1AP abrange a interface S1-MME e ao fazê-lo, suporta as seguintes funções (HUAWEI, 2012):

- Gerenciamento de E-RAB (*Evolved – Rádio Access Bearer*) – inclui o estabelecimento, modificação e liberação dos E-RABS pelo MME;

- transferência de Contexto Inicial – é usado para estabelecer um contexto S1UE na eNB, configurar a conectividade IP padrão e transferência de sinalização relacionada a NAS;

- indicação de Informação de Capacidade do UE – é usado para informar o MME da informação de capacidade do UE;

- mobilidade – este inclui recursos de mobilidade para suportar uma mudança na eNB ou mudança de RAT;

- paging;

- gerenciamento da interface S1 – incorpora uma serie de subfunções como redefinições, balanceamento de carga e configuração do sistema, etc;

- transporte de Sinalização NAS – transporte de sinalização relacionada a NAS sobre a interface S1-MME;

- modificação e Liberação do Contexto do UE – Isso permite a modificação e liberação do contexto UE estabelecida na eNB e MME, respectivamente;

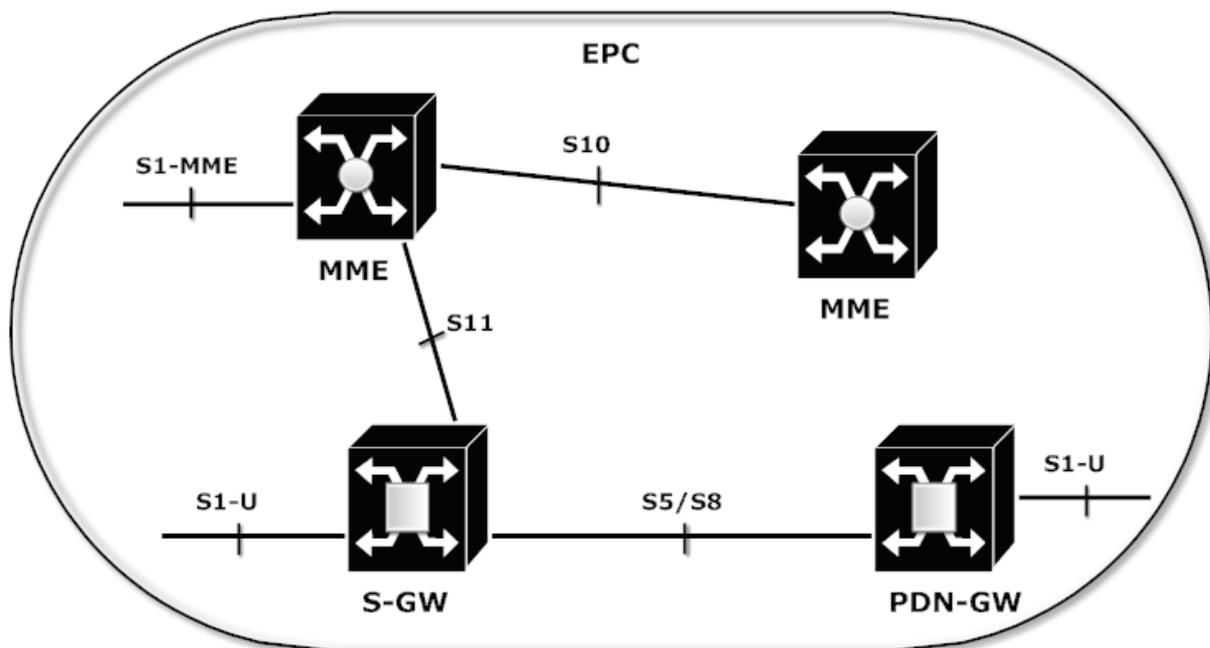
- relatório de Localização – permite ao MME ser informado da localização atual do UE dentro da rede.

2.5 ARQUITETURA EPC

Além do LTE, o 3GPP definiu também o SAE (*System Architecture Evolution*), como parte da estrutura de Release 8, para uma evolução ou migração de rede core, para fornecer uma arquitetura de pacotes otimizada que suporta maiores taxas de dados, baixa latência e conectividade *multi-RAT*. Dentro desta arquitetura, a funcionalidade da rede core é muito “plana”, com grande parte da inteligência necessária para suportar a prestação de serviços sendo colocados dentro de domínios como IMS. Em essência, isso remove a maior parte do controle de chamada/sessão feito pelo core.

Figura 18 ilustra a arquitetura fundamental do EPC e assim identificar as principais interfaces que existem entre os elementos de rede. É importante salientar, porém, que existem interfaces adicionais que ligam o EPC com o IMS e arquiteturas legadas 3GPP/ Não-3GPP (HUAWEI, 2012).

Figura 18: Arquitetura e Interfaces EPC



Fonte: Autor, 2013

2.5.1 MOBILITY MANAGEMENT ENTITY

O MME é uma entidade do plano de controle dentro do EPC e como tal é responsável pelas seguintes funções (HUAWEI, 2012):

- Segurança e Sinalização NAS – Incorpora tanto EMM (*Evolved Mobility Management*) e ESM (*Evolved Session Management*) e, portanto, inclui procedimentos como *Tracking Area Updates* e *EPS Bearer Management*. O MME também é responsável pela segurança do NAS;

- seleção de S-GW e PDN- GW – após a recepção de um pedido do UE para alocar um recurso (*bearer*), o MME irá selecionar o S-GW e o PDN-GW mais apropriados. Este critério de seleção é baseado na localização do UE, além de condições de carga atual da rede;

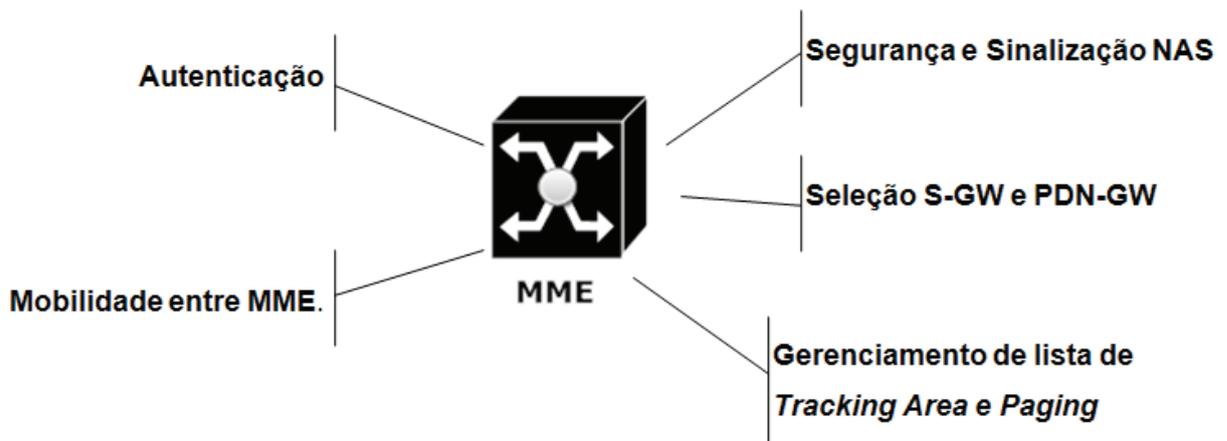
- gerenciamento de lista de *Tracking Area* e *Paging* – enquanto que no estado LTE Idle, o UE é monitorado pelo MME com a granularidade de uma *Tracking Area*.

Enquanto o UE permanece dentro da *Tracking Area*, que lhe é atribuída sob a forma de uma lista de *Tracking Area*, não há nenhuma exigência para ele notificar o MME. O MME também é responsável por iniciar o processo de *paging*;

- mobilidade Inter MME – se um *handover* envolver a mudança o ponto de ligação dentro do EPC, pode ser necessário envolver um *handover inter* MME. Nesta situação, o MME servidor irá selecionar um MME destino para a realização desse processom

- autenticação – isso envolve a interoperabilidade com o HSS (*Home Subscriber Server*) do assinante, a fim de obter informações AAA (*Acess Authorization and Accounting*) para autenticar o assinante. Com em outro sistema 3GPP, a autenticação é baseada em AKA (*Authentication and Key Agreement*).

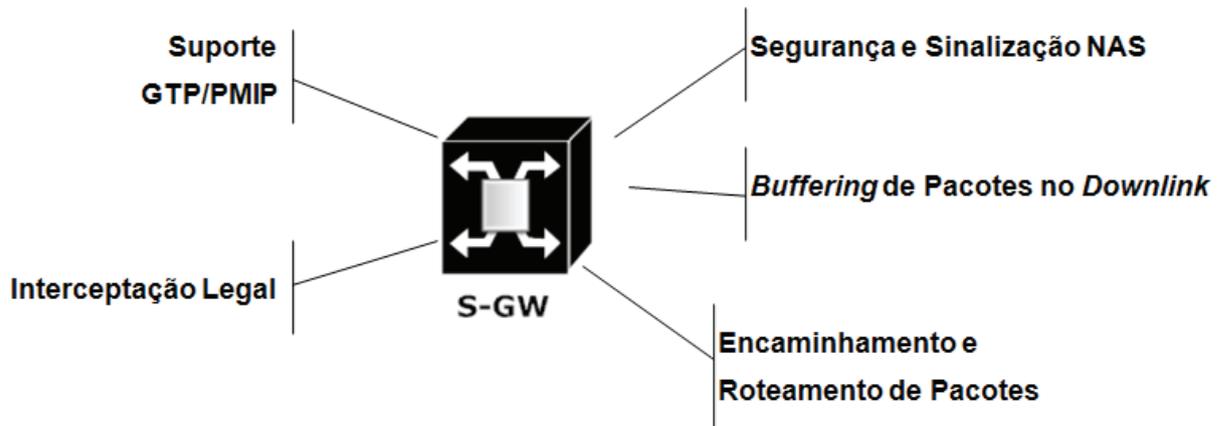
Figura 19: Elementos Funcionais do MME.



Fonte: Autor, 2013

2.5.2 SERVING – GATEWAY

Figura 20: Elementos Funcionais do S-GW



Fonte: Autor, 2013

O S-GW termina a interface S1-U do E-UTRAN e a o fazê-lo, fornecer as seguintes funções (HUAWEI, 2012):

- Ancoragem para Mobilidade – para *handovers inter* eNB, o S-GW funciona como um ponto de ancoragem para o plano do usuário. Além disso, também atua como uma ancora para *handovers inter* 3GPP para redes legadas – GPRS e UMTS;

- buffer para pacotes no *downlink* – quando o tráfego chega para uma UE no S-GW, ele pode precisar ser bufferizado a fim de dar tempo para o MME enviar o *paging* ao UE e para que este possa entrar no estado de LTE Active;

- Roteamento e Encaminhamento de Pacotes – o tráfego deve ser encaminhado para o eNB correto no *downlink* e PDN-GW específico no uplink;

- intercepção Legal – inclui o monitoramento de VoIP (*Voice over IP*) e outros serviços de pacotes;

- suporte a GTP/PMIP – se PMIP (*Proxy Mobile IP*) é usada nas interfaces S5/S8, o S-GW suporte a GTP/PMIP também pode ser necessário;

2.5.3 REDE DE PACOTES DE DADOS (*PACKET DATA NETWORK*) - *GATEWAY*

O PDN-GW é o elemento de rede que termina a interface SGi em direção ao PDN (*Packet Data Network*). Se um UE está acessando PDNs múltiplos, pode haver uma exigência para vários PDN-GWS estarem envolvidos. Funções associadas ao PDN-GW incluem (HUAWEI, 2012):

- Filtragem de pacotes – esta incorpora a inspeção profunda de pacotes de data gramas IP que chegam do PDN, a fim de determinar à quais TFT (*Traffic Flow Template*), eles devem ser associados;

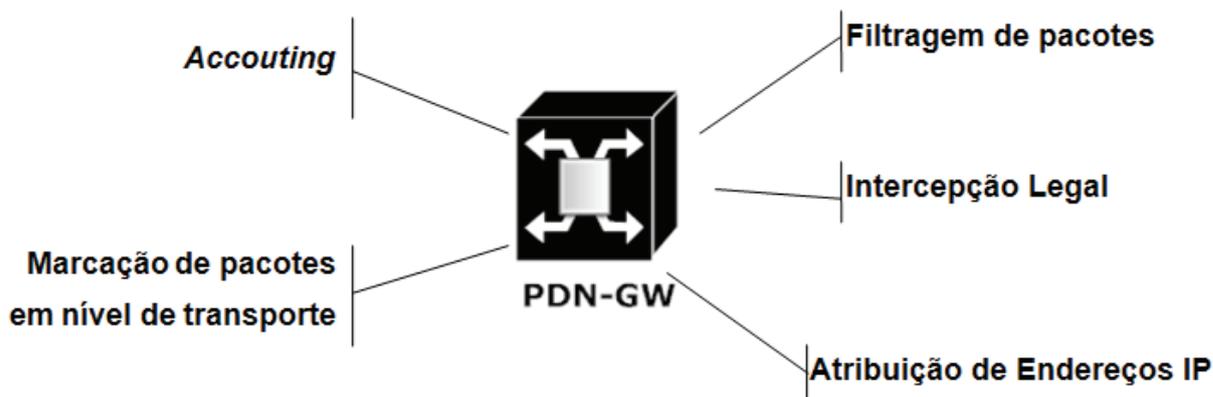
- intercepção Legal – como com o S-GW, o PDN-GW também pode monitorar o trafego que passa através dele;

- atribuição de Endereços IP- Endereços IP podem ser atribuídos aos UEs pelo PDN-GW. Isto é, incluído como parte da fase inicial de estabelecimento da *bearer* ou quando os UEs se movimentam entre diferentes tecnologias de acesso;

- marcação de pacotes em nível de transporte – envolve a marcação de pacotes de *uplink* e *downlink* com o *tag* apropriada, por exemplo, DSCP (*Differentiated Service Code Point*) com base no QCI (*QoS Class Identifier*) do *bearer* EPS associados;

accounting – Através da interação com uma PCRF (*Policy Rules and Charging Function*), o PDN-GW irá monitorar os volumes e tipos de trafego.

Figura 21: Elementos Funcionais do PDN-GW



Fonte: Autor, 2013

2.6 INTERFACES E PROTOCOLOS DO EPC

2.6.1 INTERFACE S11

A interface S11 conecta o MME com a S-GW para suportar sinalização do plano de controle. Ao fazer isso, ele utiliza GTPv2-C (*GPRS Tunneling Protocol version 2 – Control*) que , como todas as outras interfaces que usam variantes do GTP, utilizam os serviços de UDP e IP (HUAWEI, 2012).

2.6.1.1 GPRS TUNNELING PROTOCOL VERISION 2 – CONTROL

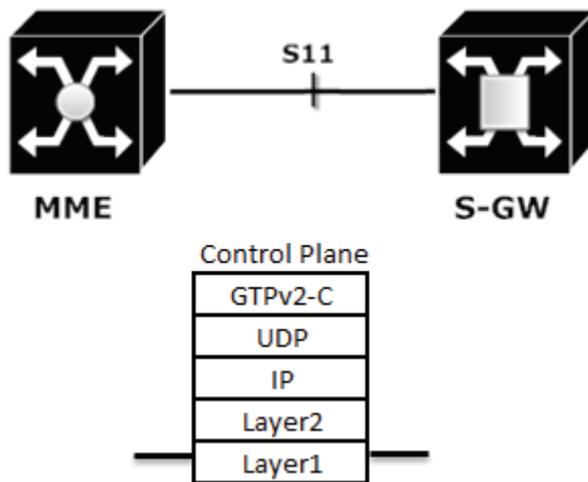
GTPv2-C suporta a transferência de mensagem de sinalização entre o MME e a S-GW, e como tal é responsável pela troca dos seguintes tipos de mensagens (HUAWEI, 2012):

- Gerenciamento de trajeto – inclui mensagens de *Echo Request* e *Response* para garantir a conectividade em curso em todo o link;
- gerenciamento de Túneis – essas mensagens são usadas para ativar, modificar e excluir EPS *bearers* e sessões, abrangendo a rede;

- gerenciamento de mobilidade – estas mensagens garantem que a mobilidade é suportada através de uma combinação de procedimentos de realocação e de notificação.

- CS (*Circuit Switched*) *Fallback* – inclui suspender e retornar o procedimento de túneis para encaminhar dados em pacotes entre as redes 3GPP e não-3GPP.

Figura 22: Protocolos da Interface S11



Fonte: Autor, 2013

GTPv2-C também é encontrado na interface S5/S8 entre o S-GW e o PDN-GW e a interface S10 entre MMES. Além disso, ele também pode ser encontrado nas interfaces S3 e S4 quando há interconexão com um SGSN (*Serving GPRS Support Node*).

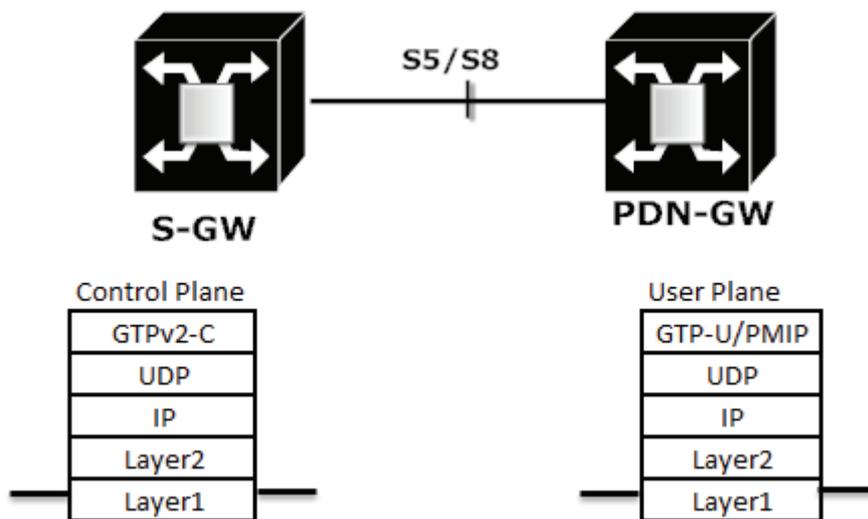
2.6.2 INTERFACE S5/S8

A interface S5/S8 conecta o S-GW com o PDN-GW e suporta tanto o plano de controle e o plano do usuário. O termo S5 é usado quando esses elementos residem dentro da mesma PLMN (*Public Land Mobile Network*) e S8 quando a interface abrange uma HPLMN (Home Public Land Mobile Network) / VPLMN (*Visited Public Mobile Network*). O protocolo GTPv2-C opera no plano de controle para ambas interfaces enquanto GTP-U ou PMIP é utilizada no plano de usuário (HUAWEI, 2012).

2.6.2.1 PROXY MOBILE IP

Definido pelo IETF, PMIP suporta a mobilidade quando um UE se desloca de um S-GW para outro durante um procedimento de *handover*. Dados são encapsulados entre o PDN-GE, que suporta a funcionalidade de HA (Home Agent) e o S-GW, que atua como FA (*Foreign Agent*) (HUAWEI, 2012).

Figura 23: Protocolo da Interface S5/S8.

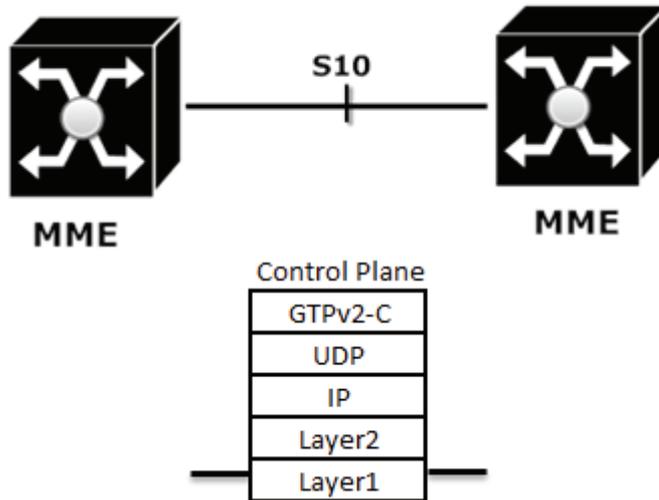


Fonte: Autor, 2013

2.6.3 INTERFACE S10

A interface S10 conecta duas MMES a fim de passar a sinalização de plano de controle. Ao fazer isso, ele utiliza os serviços de GTPv2-C (HUAWEI, 2012).

Figura 24: Protocolo da Interface S10

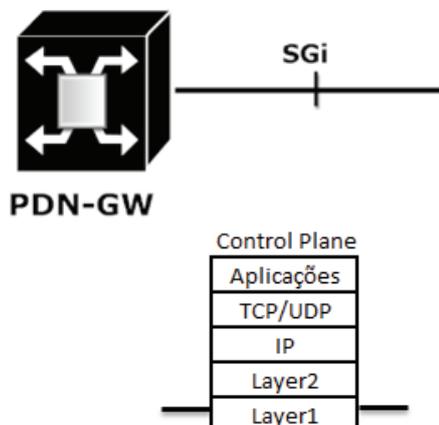


Fonte: Autor, 2013

2.6.4 INTERFACE SGI

A interface SGI conecta o PDN-GW um PDN externo. Este poderia se a internet, intranets corporativas ou serviços de um provedor de serviços de rede que suportam IMS. Embora definido pelo 3GPP, os protocolos que operam ao longo da interface SGI são definidos pelo IETF e incluem TCP, UDP, além de uma série de protocolos de aplicação específica (HUAWEI, 2012).

Figura 25: Protocolo da Interface SGI



Fonte: Autor, 2013

2.6.5 Elementos de Rede e Interfaces Adicionais

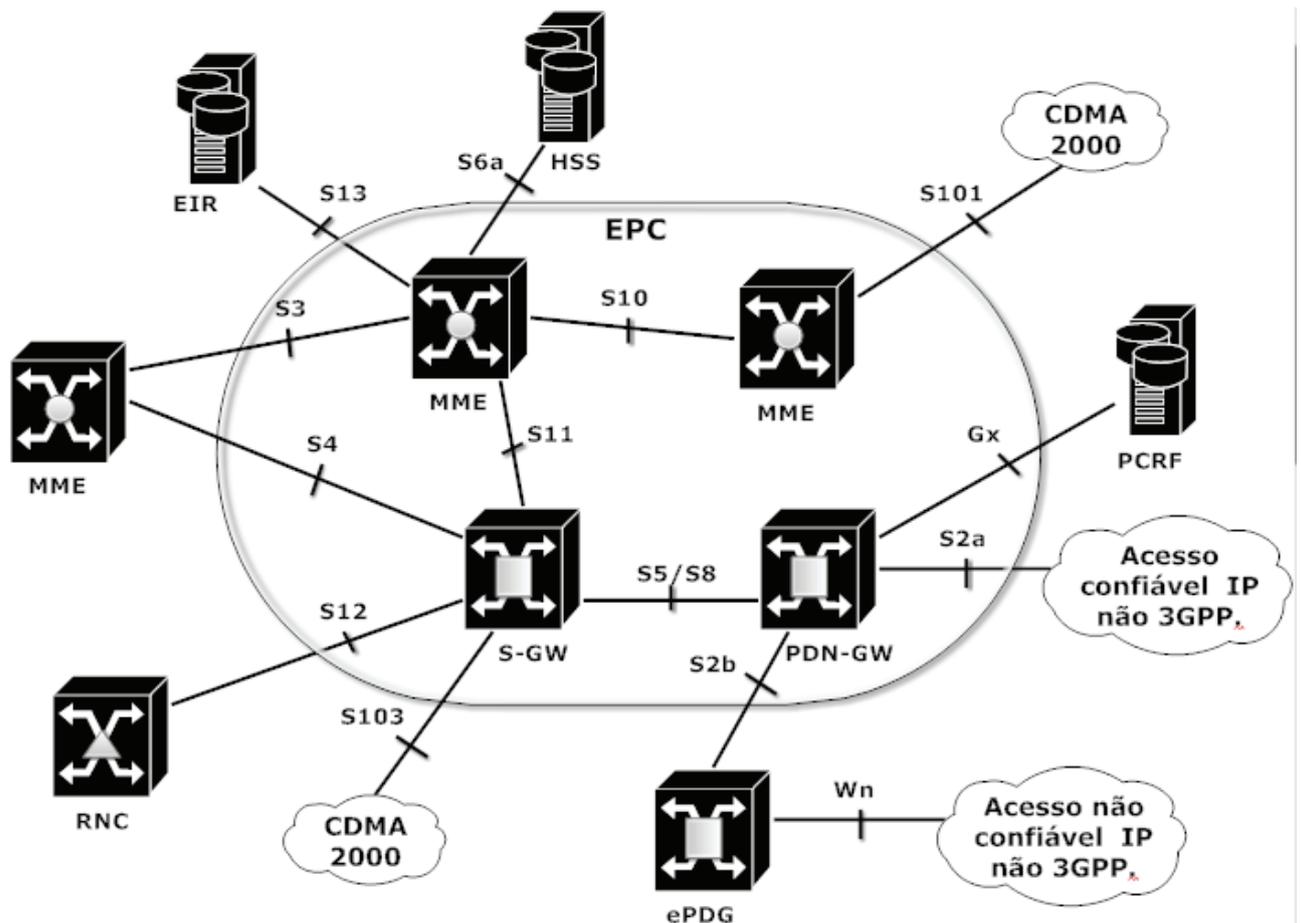
Além dos elementos de rede, interfaces e protocolos associados discutidos até agora, o EPC se conecta com vários outros nós e redes. Estes estão ilustrados na Figura 26.

Estes incluem, mas não estão limitados ao (HUAWEI, 2012):

- HSS (*Home Subscriber Server*) – pode ser considerado um banco de dados “mestre” dentro da PLMN. Embora logicamente é considerado como uma entidade, o HSS, na prática é composta de vários bancos de dados físicos, dependendo do número de assinantes e dos requisitos de redundância. O HSS contém variáveis e identidades para o suporte, estabelecimento e manutenção de chamadas e sessões feitas pelos assinantes. É ligado ao MME através da Interface S6a que usa o protocolo Diameter;
- PCRF (*Policy and Charging Rules Function*) – suporta a funcionalidade de controle de política através do PDF (*Policy Decision Function*). Como tal, ele oferece controle de *bearer* de rede em termos de QoS e a alocação dos vetores associados a tarifação. O PCRF transfere esta informação sobre a interface Gx usando o protocolo *Diameter*;
- EPDG (*Evolved Packet Data Gateway*) - é usado na conexão com redes de acesso IP não confiáveis não-3GPP. Ele fornece a funcionalidade para alocar endereços IP, além de encapsular/de-encapsular túneis IPSec (*IP Security Epmip*). Ele se conecta ao PDN-GW através da interface S2b;
- RNC (*Rádio Network Controller*) – faz parte da UTRAN (*Universal Terrestrial Radio Access Network*) 3GPP, o RNC se conecta ao S-GW para suportar o tunelamento de tráfego do plano do usuário usando GTP-U. A interface que liga esses elementos de rede é a interface S12;

- SGSN (*Serving GPRS Support Node*)- faz parte de rede core de pacotes OS 3GPP, 2G e 3G. Ele conecta-se a ambos os MME e S-GW, a fim de suportar a mobilidade de comutação de pacotes e usa os protocolos GTPv2-C e GTP-U respectivamente. O SGSN conecta ao MME através da interface S3 e o S-GW através da interface S4;
- EIR (*Equipment Identity Register*)- esta base de dados permite aos provedores de serviços validar um IMEI (*International Mobile Equipment Identity*) particular presente em listas armazenadas. Ele se conecta ao MME através da interface S13 e usa o protocolo *Diameter* para transferência de mensagens;

Figura 26: Elementos de Rede e Interfaces Adicionais



Fonte: Autor, 2013

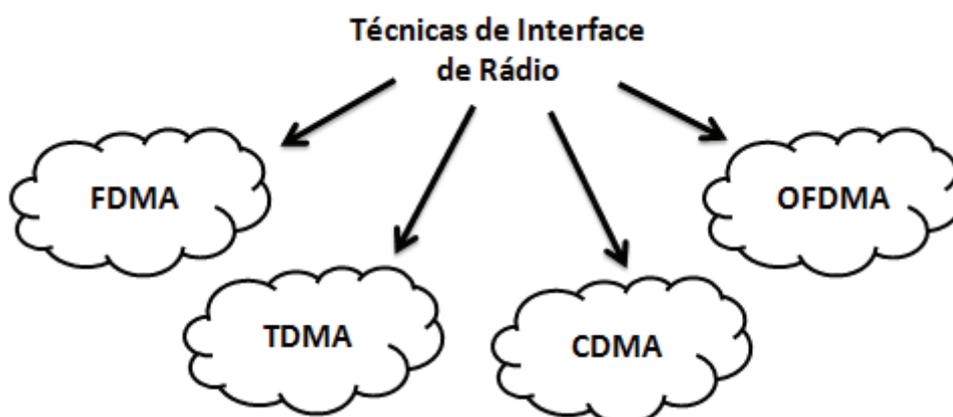
3 PRINCIPIOS DE INTERFACE AÉREA LTE

Neste capítulo será descrito as técnicas de interface de rádio utilizadas no *uplink* e *dowlink* considerando os princípios de OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) e a sua estrutura de canais de interface de ar. Com detalhamento na estrutura no domínio do tempo da interface de rádio no *uplink* e *downlink* para os modos FDD (*Frequency Division Duplex*) e TDD (*Time Division Duplex*). Serão explicados também os princípios do OFDMA no *downlink*, SC-FDMA no *uplink*, MIMO (Multiple Input Multiple Output) e o papel do MBMS (*Multimedia Broadcast Multicast Service*) no LTE

3.1 TÉCNICAS DA INTERFACE DE RÁDIO

Em sistemas celulares wireless, UEs tem que compartilhar um meio comum para a transmissão. Existem varias técnicas de acesso, mas as quatro principais são: FDMA (*Frequency Division Multiple Access*), TDMA (*Time Division Multiple Access*), CDMA (*Code Division Multiple Access*) e OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*).

Figura 27: Elementos de Rede e Interfaces Adicionais

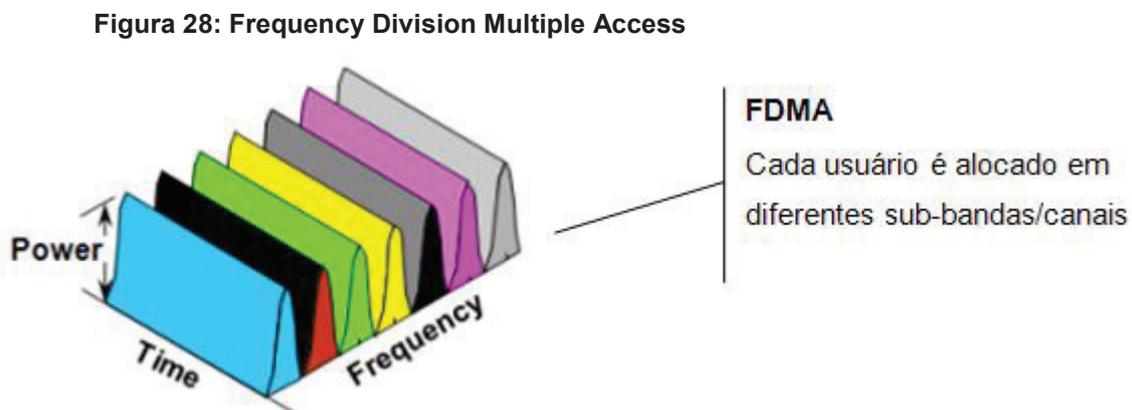


Fonte: Autor, 2013

3.1.1 FREQUENCY DIVISION MULTIPLE ACCESS

A fim de acomodar vários dispositivos na mesma rede sem fio, FDMA divide o espectro disponível em sub-bandas ou canais. O conceito de FDMA é ilustrado na figura 27. Usando esta técnica, um canal dedicado pode ser atribuído a um usuário, enquanto outros usuários ocupam outros canais, ou seja, outras frequências.

Em um sistema celular, móveis geralmente ocupam dois canais, um para o *downlink* e um para o *uplink*. Este, por sua vez, torna o FDMA menos eficiente, uma vez que a maioria das aplicações de dados é baseada em *downlink*.



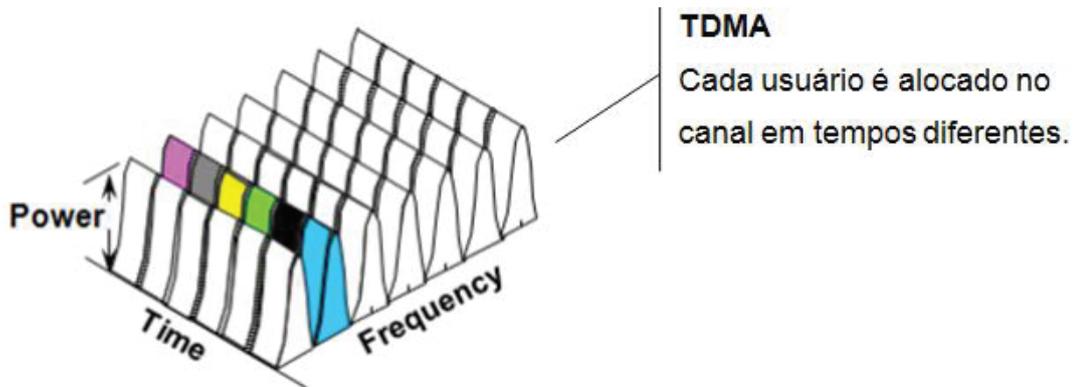
Fonte: HAYKIN, 2004

Canais FDMA também sofrem interferência e não podem se demasiado “próximos”, uma vez que a energia de um canal afeta os canais adjacentes /vizinhos. Para combater isso, bandas de guarda adicionais entre os canais são obrigatórias, o que reduz a eficiência espectral do sistema (HUAWEI, 2012).

3.1.2 TIME DIVISION MULTIPLE ACCESS

Em sistemas TDMA, a largura do canal é compartilhada no domínio do tempo. A figura 28 ilustra o conceito de TDMA. Para cada dispositivo é atribuído um tempo do canal, referido como um “*timeslot*”. Estes são agrupadas em um frame TDMA. O número de *timeslots* em um frame TDMA é dependente do sistema, por exemplo, GSM utiliza oito *timeslots*.

Figura 29: Time Division Multiple Access



Fonte: HAYKIN, 2004

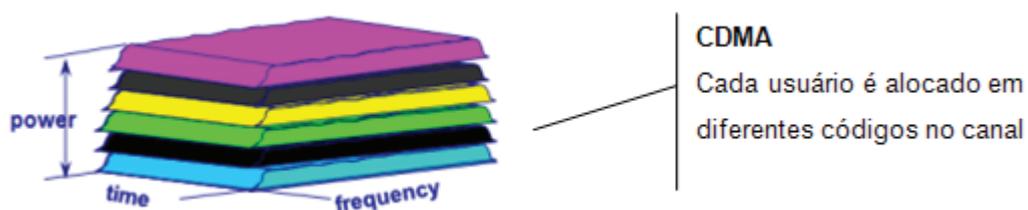
Aos dispositivos devem ser atribuídos *timeslots*, portanto é normal ter um ou mais *timeslots* reservados para o controle comum e de acesso ao sistema.

Sistemas TDMA são tipicamente digitais e, portanto, oferecem funcionalidades adicionais, tais como cifragem e proteção de integridade. Além disso, podem empregar detecção de erros aprimorada e esquemas de correção, como FEC (*Forward Error Correction*). Isso permite ao sistema ser mais resistente a ruídos e interferências e, portanto, tendem a oferecer maior eficiência espectral quando comparado aos sistemas FDMA (HUAWEI, 2012).

3.1.3 CODE DIVISION MULTIPLE ACESS

O conceito de CDMA é pouco diferente do FDMA e do TDMA. Em vez de partilha de recursos no domínio do tempo ou frequência, dispositivos CDMA operam na mesma faixa de frequência ao mesmo tempo. Isto é possível devido ao fato de que cada transmissão é separada usando um código único.

Figura 30: Code Division Multiple Access



Fonte: HAYKIN, 2004

Existem dois tipos principais de CDMA, FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrum*) e DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*), no entanto todos os atuais grandes sistemas celulares utilizam DSSS.

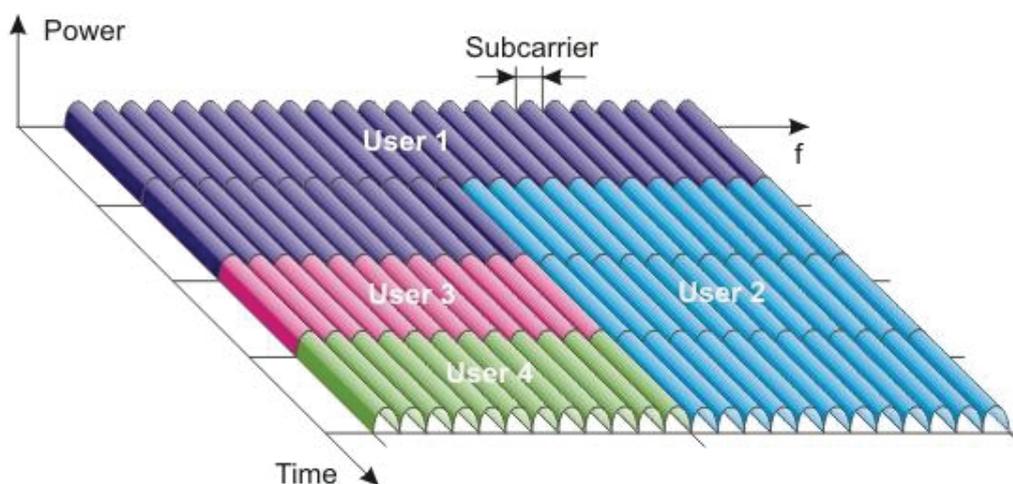
UMTS, CDMA2000 e cdmaOne, todos utilizam o CDMA. No entanto, a aplicação dos códigos e as larguras de banda utilizadas são diferentes. Por exemplo, UMTS utiliza uma largura de banda do canal de 5MHz, no enquanto cdmaOne usa apenas 1,25MHz (HUAWEI, 2012).

3.1.4 ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION MULTIPLE ACCESS

OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) é a mais recente adição para os sistemas celulares. Ele fornece uma técnica de múltiplo acesso baseada em OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). A figura 30 ilustra a visão básica de OFDMA. Aqui se pode observar que a largura de banda é dividida em unidades menores conhecidas como “subcarriers”. Estas são agrupadas e alocadas como um recurso a um dispositivo. Também pode ser visto que um dispositivo pode ser dotado de recursos diferentes no tempo e no domínio da frequência.

Detalhes adicionais sobre OFDM e OFDMA são fornecidos posteriormente neste capítulo.

Figura 31: Orthogonal Frequency Division Multiple Access



Fonte: SESIA, 2013

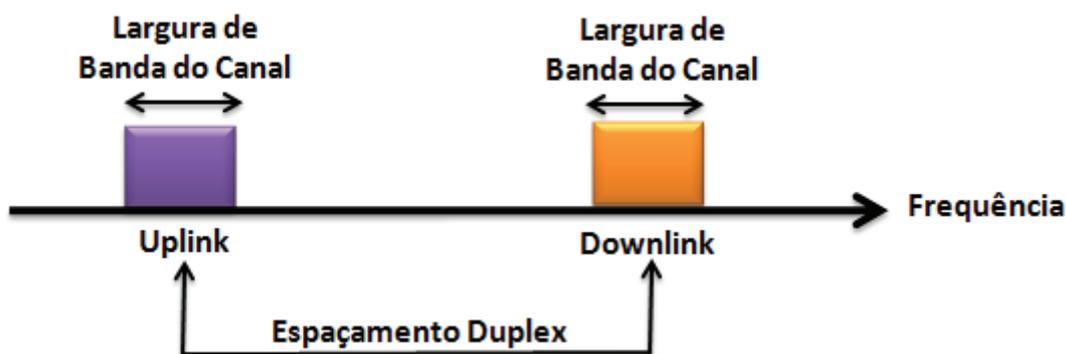
3.1.5 MODOS DE TRANSMISSÃO

Sistemas celulares podem ser projetados para operar em dois modos de transmissão principais: FDD (*Frequency Division Duplex*) e TDD (*Time Division Duplex*).

3.1.5.1 Frequency Division Duplex

O conceito de FDD é ilustrado na Figura 31. Os canais utilizados para *uplink* e *downlink* são separados, permitindo que um dispositivo possa transmitir e receber dados ao mesmo tempo (assumindo que o dispositivo inclui um *duplexador*). O espaçamento entre o canal de *uplink* e o canal de *downlink* é referido como o espaçamento duplex.

Figura 32: Frequency Division Duplex



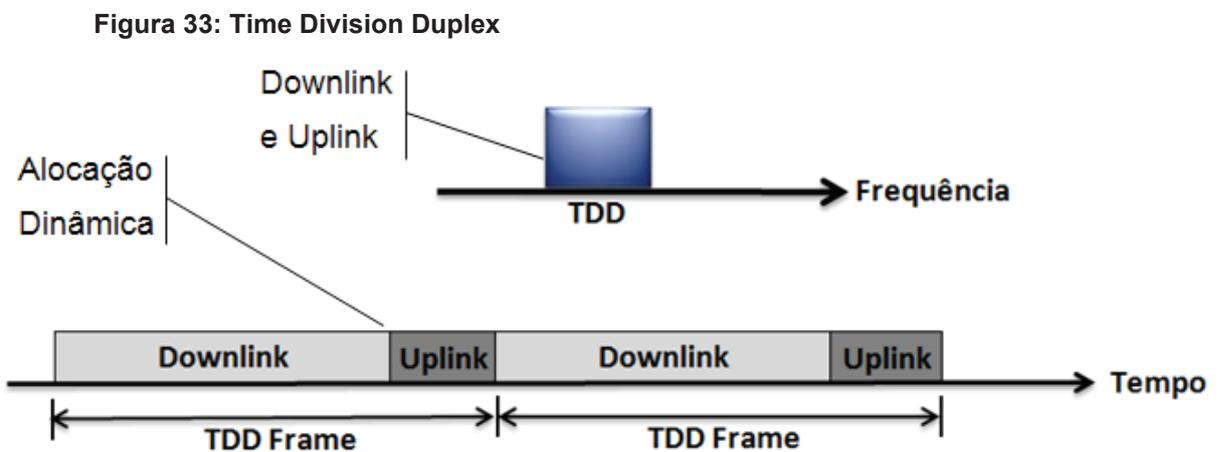
Fonte: Autor, 2013

Normalmente, o canal de *uplink* (transmissão móvel) opera na frequência mais baixa. Isso é feito porque frequências mais altas sofrem maior atenuação do que frequências mais baixas e, portanto, permite ao móvel utilizar níveis mais baixos de potências de transmissão.

Alguns sistemas também oferecem modo *half-Duplex* FDD, onde duas frequências são utilizadas, porém o móvel só pode transmitir ou receber, ou seja, não transmitir e receber ao mesmo tempo. Isso permite uma complexidade reduzida aos móveis, uma vez que nenhum filtro duplex é necessário.

3.1.5.2 Time Division Duplex

O modo TDD permite a operação *full duplex* usando a banda da frequência com multiplexação por divisão de tempo para os sinais de *uplink* e *downlink*. Uma vantagem de TDD é a capacidade para fornecer alocação dinâmica, o aumento da eficiência espectral, e uma melhor utilização de técnicas *beamforming*. O atraso ocorre devido à portadora ter as mesmas características de frequência para *uplink* e *downlink*.



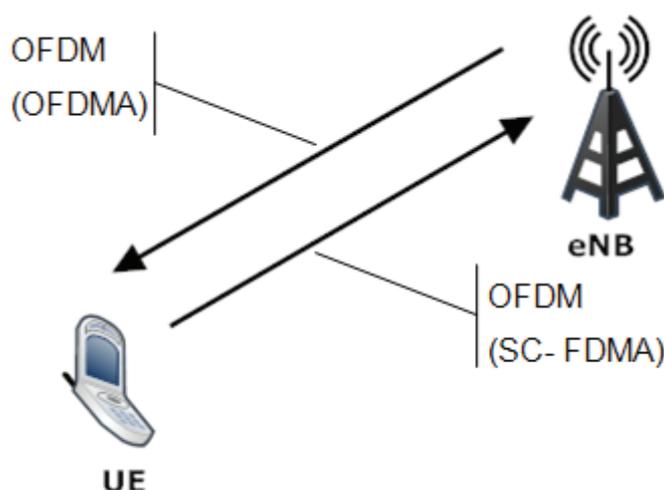
Fonte: Autor, 2013

3.2 PRINCÍPIOS DE OFDM

A interface aérea LTE utiliza duas diferentes técnicas de acesso múltiplo, as quais são baseadas em OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplex*). Estas são:

- OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) - usada no downlink.
- SC-FDMA (*Single Carrier – Frequency Division Multiple Access*) - usada no uplink.

Figura 34: Uso de OFDM em LTE



Fonte: Autor, 2013

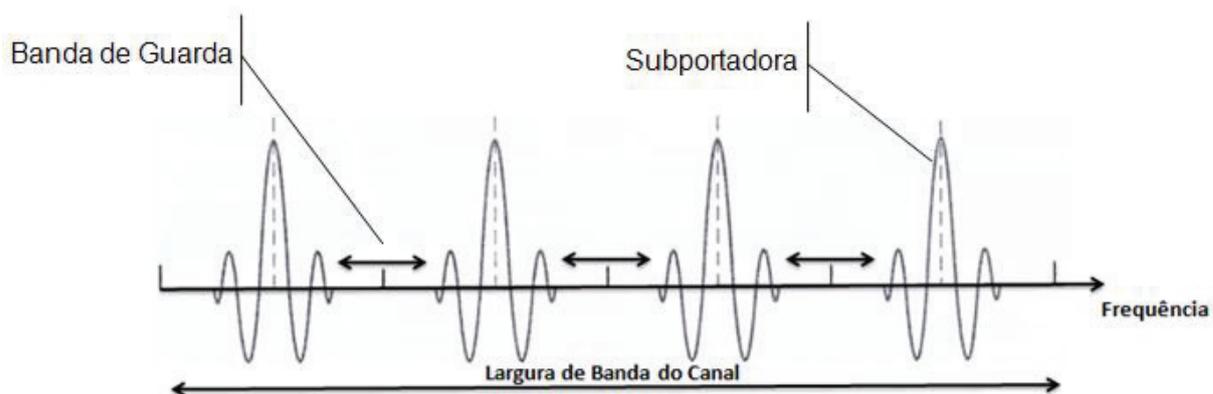
O conceito de OFDM não é novidade e está sendo usada em vários sistemas, tais como Wi-Fi (*Wireless Fidelity*) e WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*). Além disso, foi ainda considerado para UMTS em 1998. Uma das principais razões pelas quais ele não foi escolhido no momento, foi a capacidade de processamento limitada de aparelhos e a capacidade limitada de baterias.

LTE pode trabalhar com acesso baseado em OFDM devido ao fato de as capacidades de processamento dos moveis e o desempenho das baterias terem ambos melhorados significativamente ao longo dos anos. Além disso, há uma pressão contínua para a produção de sistemas cada vez com maior eficiência espectral.

3.2.1 FREQUENCY DIVISION MULTIPLEXING

OFDM é baseado em FDM (*Frequency Division Multiplexing*) e é um método pelo qual múltiplas frequências são utilizadas para transmitir informações simultaneamente. A figura 2-9 ilustra um exemplo de FDM com quatro subportadora não interfere com as subportadoras adjacentes, uma faixa de guarda é utilizado. Além, disso, cada subportadora tem a características de rádio um pouco diferentes e isso pode ser usado para fornecer diversidade.

Figura 35: Subportadoras FDM.



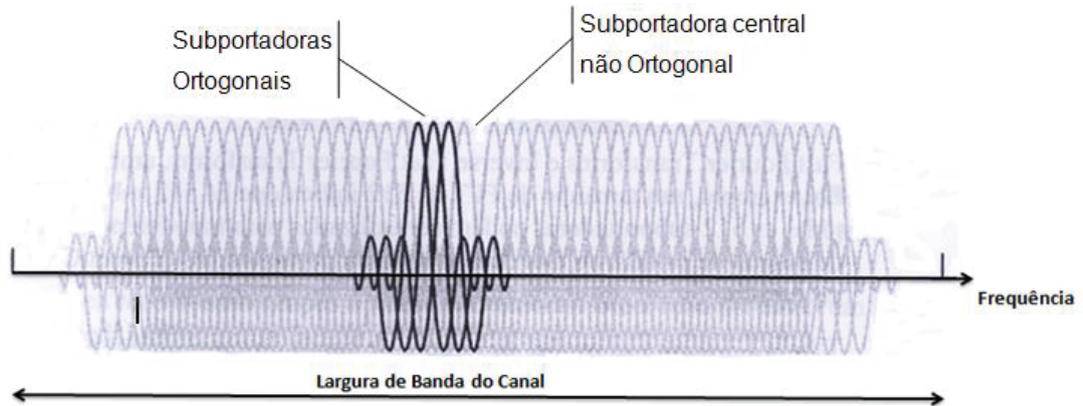
Fonte: Autor, 2013

Sistemas FDM não têm uma eficiência espectral tão boa, já que múltiplas bandas de guarda são necessárias.

3.2.2 SUBPORTADORAS OFDM

OFDM segue o mesmo conceito do OFDM, mas aumenta drasticamente a eficiência espectral, reduzindo o espaçamento entre as subportadoras. Figura 35 ilustra como as subportadoras podem sobrepor-se devido à sua ortogonalidade com outras subportadoras, pois são matematicamente perpendiculares entre si. Com isso, quando uma subportadora está em seu Máximo, as duas subportadoras adjacentes estão passando por zero. Além disso, sistemas OFDM empregam ainda bandas de guarda. Estas, porém, estão localizadas na parte superior e inferior do canal, a fim de reduzir a interferência de canal adjacente.

Figura 36: Subportadoras OFDM



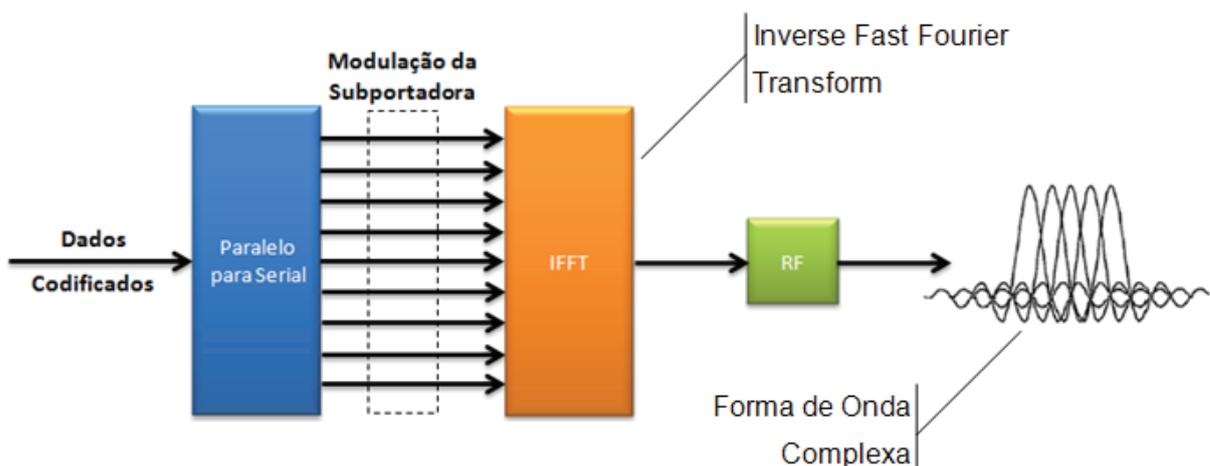
Fonte: Autor, 2013

A Subportadora central, conhecida como subportadora DC (*Direct Current*), normalmente não é usado em sistemas OFDM devido a sua falta de ortogonalidade.

3.2.3 FAST FOURIER TRANSFORMS—TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER

Subportadora OFDM são gerados e decodificados usando funções matemáticas chamadas de FFT (*Fast Fourier*) e IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*). O IFFT é usado no transmissor para gerar a onda. Figura 36 ilustra como os dados codificados são primeiramente mapeados para fluxos paralelos, antes de serem modulados e processados pela IFFT.

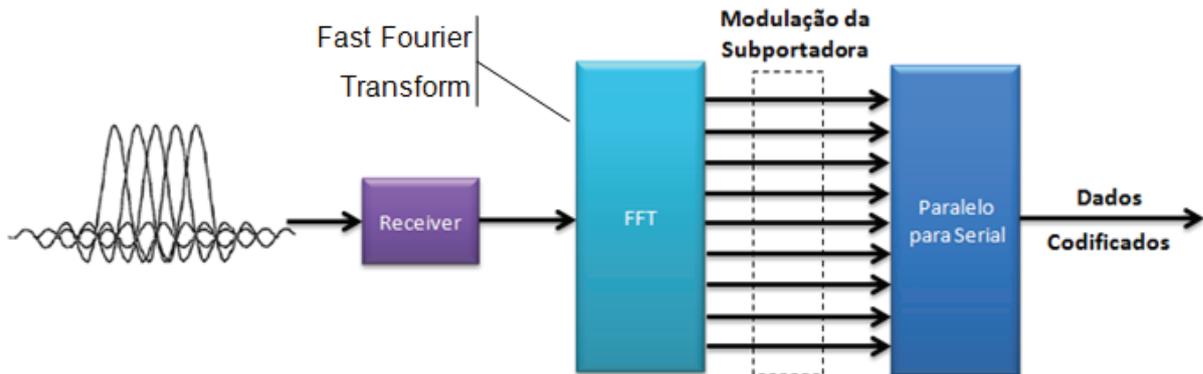
Figura 37: Inverse Fast Fourier Transform



Fonte: Autor, 2013

No lado do receptor, este sinal é passado pela FFT, que analisa a forma de onda complexa/ combinada para gerar os fluxos originais. Figura 37 ilustra o processo de FFT.

Figura 38: Fast Fourier Transform



Fonte: Autor, 2013

3.2.4 TAMANHOS DA FFT DE LTE

Fast Fourier Transforms e *Inverse Fast Fourier Transforms*, ambas têm um tamanho definido. Por exemplo, um tamanho de FFT de 512 indica que há 512 subportadoras. Na realidade, nem todas as 512 subportadoras podem ser utilizadas para transferência de dados devido às bandas de guarda de canal e ao fato de que uma subportadora DC (*Direct Current*) também ser necessária.

Tabela 2-1 ilustra as opções de banda do local disponível para LTE, assim como o tamanho da FFT e taxas de amostragem associado. Usando a taxa de amostragem e o tamanho da FFT, o espaçamento da subportadora pode ser calculado, por exemplo, $7.68\text{MHz}/512 = 15\text{KHz}$.

Tabela 4: Canal LTE e Tamanhos de FFT.

Largura Banda Canal	Tamanho do FFT	Largura Banda Subportadora	Taxa de Amostragem
1.4MHz	128	15KHz	1.92MHz
3MHz	256		3.84MHz
5MHz	512		7.68MHz
10MHz	1024		15.36MHz
15MHz	1536		23.04MHz
20MHz	2048		30.72MHz

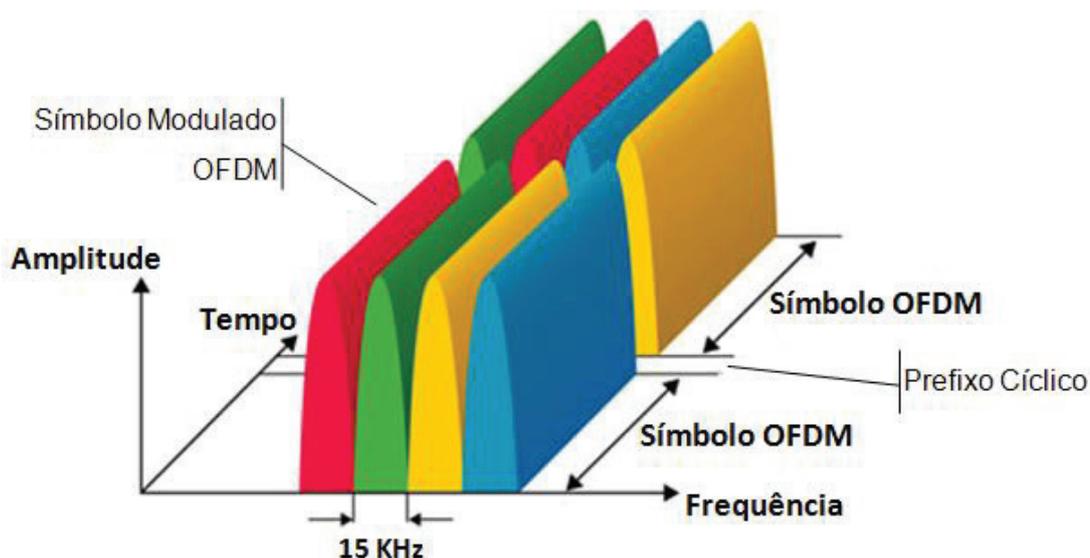
Fonte: Huawei, 2012

O espaçamento de subportadora de 15KHz também é usado para a duração do símbolo OFDM.

3.2.5 MAPEAMENTO DE SÍMBOLOS OFDM

O mapeamento dos símbolos OFDM para subportadoras é dependente do projeto do sistema. Os primeiros 12 símbolos OFDM módulos são mapeados para 12 subportadoras, ou seja, eles são transmitidos ao mesmo tempo, mas usando subportadoras diferentes. As próximas 12 subportadoras são mapeadas para o período de símbolo OFDM seguinte. Além disso, o CP (*Cyclic Prefix*) é adicionado entre os símbolos.

Figura 39: Mapeamento de Símbolo OFDM

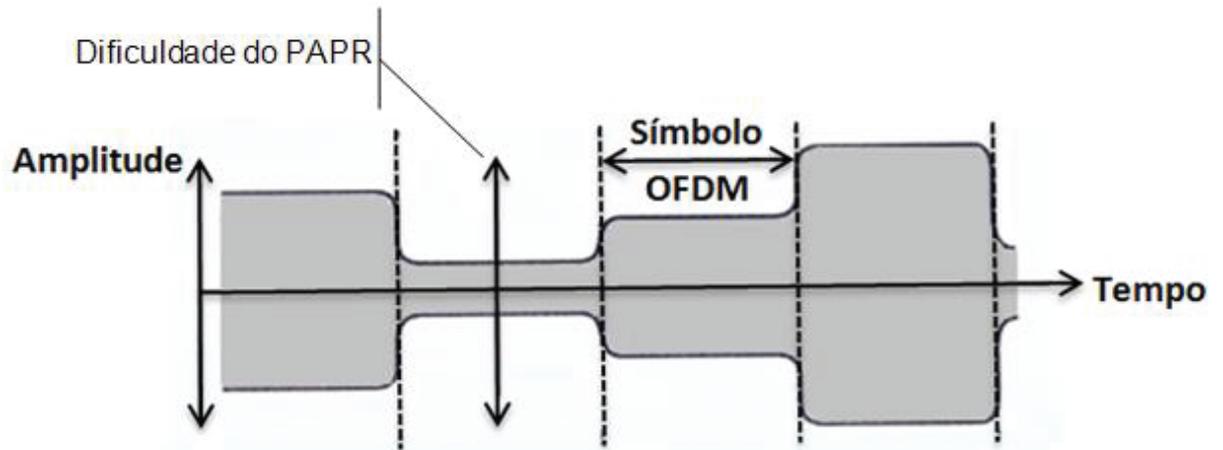


Fonte: Autor, 2013

LTE aloca recursos em grupos de 12 subportadoras. Isto é referido como um PRB (*Physical Resource Block*).

A figura 39 ilustra como a energia combinada a partir disso iria resultar em picos construtivos (quando os símbolos são os mesmos) ou nulos destrutivos (quando os símbolos são diferentes).

Figura 40: OFDM PAPR (Peak to Average Power Ratio)



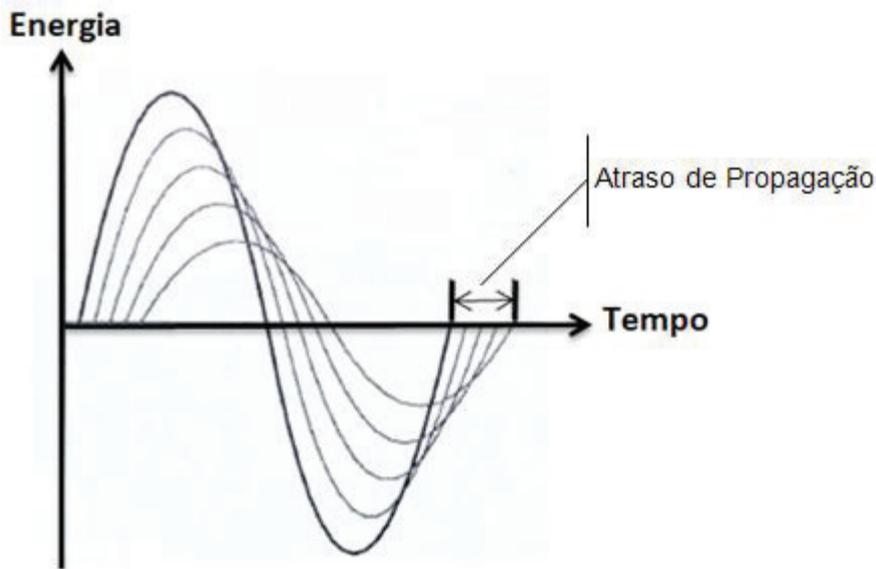
Fonte: Autor, 2013

3.2.6 INTERFERÊNCIA NO DOMÍNIO DO TEMPO

O sinal OFDM fornece alguma proteção no domínio da frequência devido à ortogonalidade das subportadoras. O principal problema a superar, porém, é o atraso de propagação, ou seja, a interferência *multipath*.

Figura 40 ilustra dois dos principais efeitos *multipath*, atraso e atenuação. O sinal atrasado pode se manifestar como ISI (*Inter Symbol Interference*), em que um símbolo interfere no próximo.

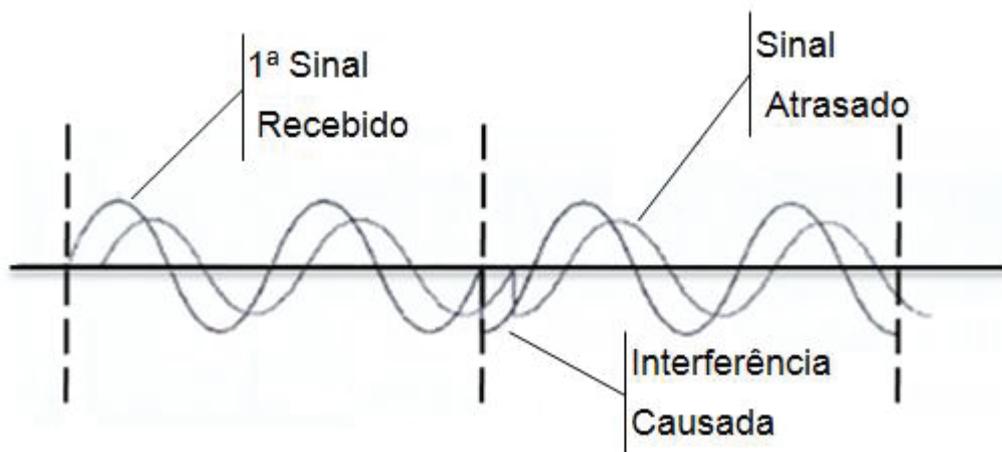
Figura 41: Atraso de Propagação



Fonte: Autor, 2013

ISI normalmente é combatida com “equalizadores”. No entanto, para o equalizador ser eficaz, um padrão de bits conhecido ou “sequência de treinamento” é necessário. Isto reduz a capacidade do sistema, bem como tem impacto sobre o processamento requerido pelo dispositivo. Em vez disso, sistemas OFDM empregam um CP (*Cyclic Prefix*).

Figura 42: Inter Symbol Interference – Interferência Inter Simbólica

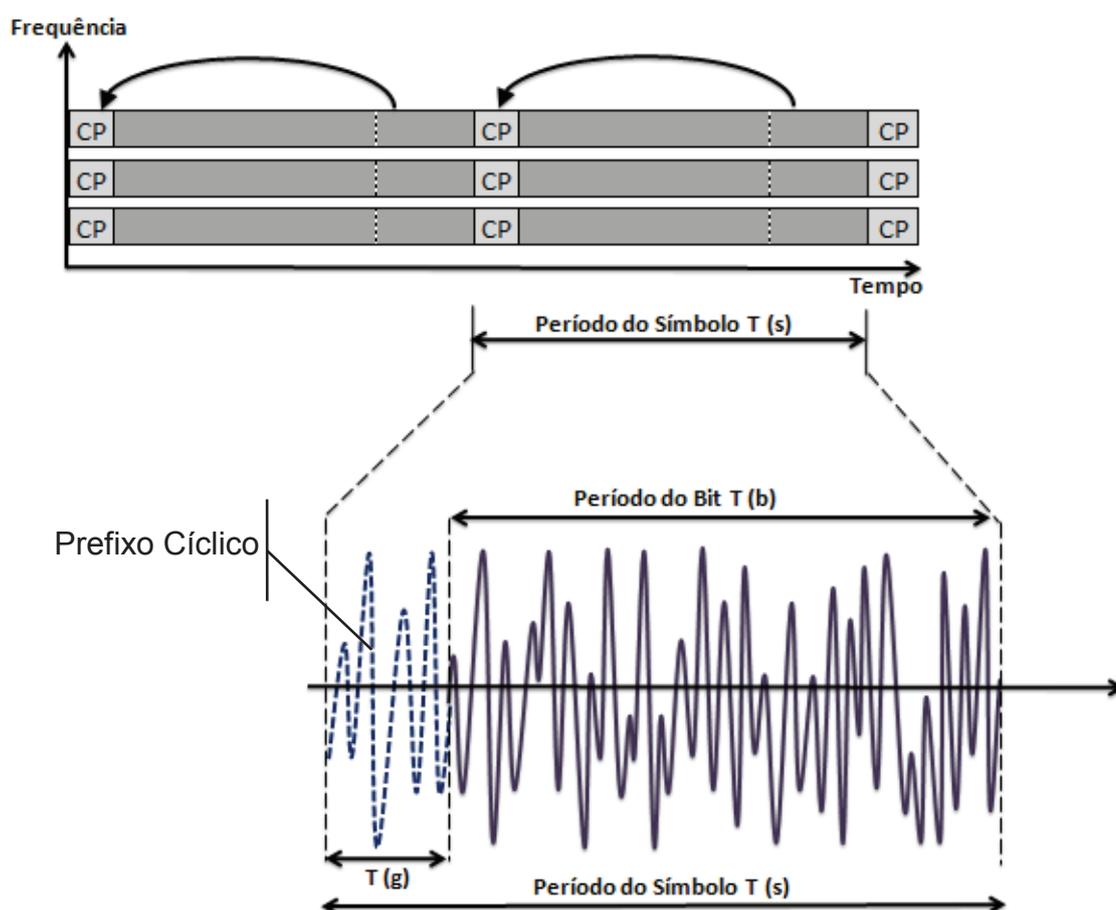


Fonte: Autor, 2013

3.2.6.1 CYCLIC PREFIX – PREFIXO CÍCLICO

Um prefixo cíclico é utilizado na maioria dos sistemas OFDM para combater atrasos *multipath*. Ele efetivamente fornece um período de guarda para cada símbolo OFDM. Figura 42 ilustra o prefixo cíclico e identifica a sua localização no símbolo OFDM. Observe que o prefixo cíclico é efetivamente uma copia da parte de trás do símbolo original, que é então colocado na frente para formar o símbolo OFDM (T_s).

Figura 43: Prefixo Cíclico



Fonte: Autor, 2013

LTE tem dois tamanhos definidos de *Cyclic Prefix*, normal e prolongados. O prefixo cíclico prolongado é projetado para células maiores. O tamanho do prefixo cíclico está relacionado ao atraso máximo de propagação que o sistema pode tolerar. Como tal, os sistemas projetados para cobertura macro, ou seja, células com grande raio de cobertura devem ter um CP Prolongado. Este tem, no entanto

impacto sobre a capacidade do sistema como o número de símbolos por segundo que será reduzido.

3.2.7 VANTAGENS E DESVANTAGENS DO OFDM

Vantagens do OFDM

Sistemas OFDM têm tipicamente uma série de vantagens:

- OFDM é quase completamente resistente a interferência *multipath* devido a sua duração de símbolos muito longa.
- Maior eficiência espectral para os canais de banda larga - acima de 5MHz.
- Utilização flexível de espectro.
- Aplicação relativamente simples, usando FFT e IFFT.

Desvantagens OFDM

OFDM também tem algumas desvantagens:

- Erros de frequência e ruído de faz podem causar problemas
- Efeito Doppler impacta na ortogonalidade das subportadoras.
- Alguns sistemas OFDM podem sofrer de alta PAPR (*Peak to Average Power Ratio*).
- Necessidade de frequência precisa e sincronização de tempo.

3.3 ESTRUTURA DE CANAIS LTE

Ao conceito de canais não é novo. Ambos GSM e UMTS definiram várias categorias de canais, no entanto, a terminologia LTE é terminologia UMTS. Em termos gerais, existem quatro categorias de canais.

Figura 44: Canais LTE

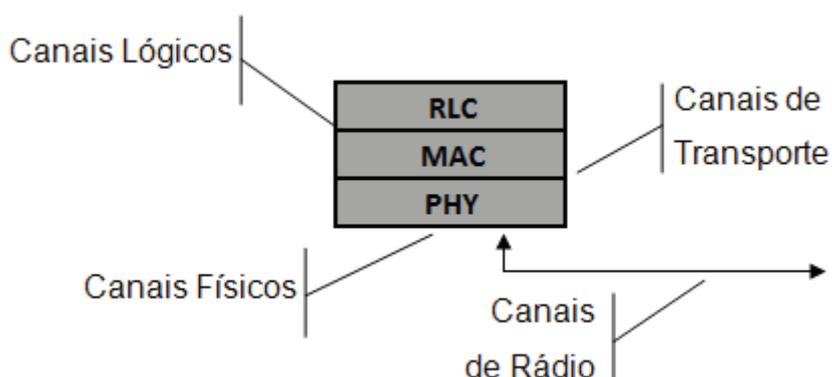


Fonte: Autor, 2013

3.3.1 CANAIS LÓGICOS

Para descrever canais lógicos é necessário primeiro identificar onde estão localizados os canais lógicos em relação aos protocolos de LTE e os outros tipos de canal. Figura 2-19 ilustra os canais lógicos localizados entre a camada RLC (*Rádio Link Control*) e a camada MAC (*Medium Access Control*).

Figura 45: Localização dos Canais



Fonte: Autor, 2013

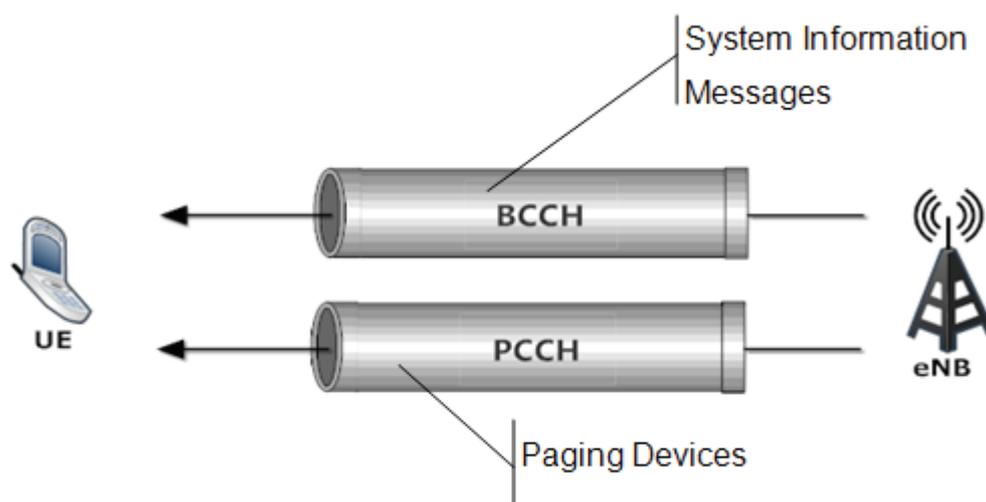
Canais lógicos são classificados como canais lógicos de controle, que carregam os dados de controle, tais como sinalização RRC (*Rádio Resource Control*), ou canais lógicos de tráfego que transportam dados do plano de usuário.

3.3.1.1 CANAIS LÓGICOS DE CONTROLE

As diversas formas dos canais lógicos de controle incluem:

- BCCH (*Broadcast Control Channel*) – este é um canal de downlink usado para enviar as mensagens de SI (*System Information*) do eNB (*Evolved node B*). Estes são definidos por RRC.
- PCCH (*Paging Control Channel*) – este é um canal de downlink utilizado pelo eNB para transmitir informações de *paging*.

Figura 46: Canais Lógicos BCCH e PCCH



Fonte: Autor, 2013

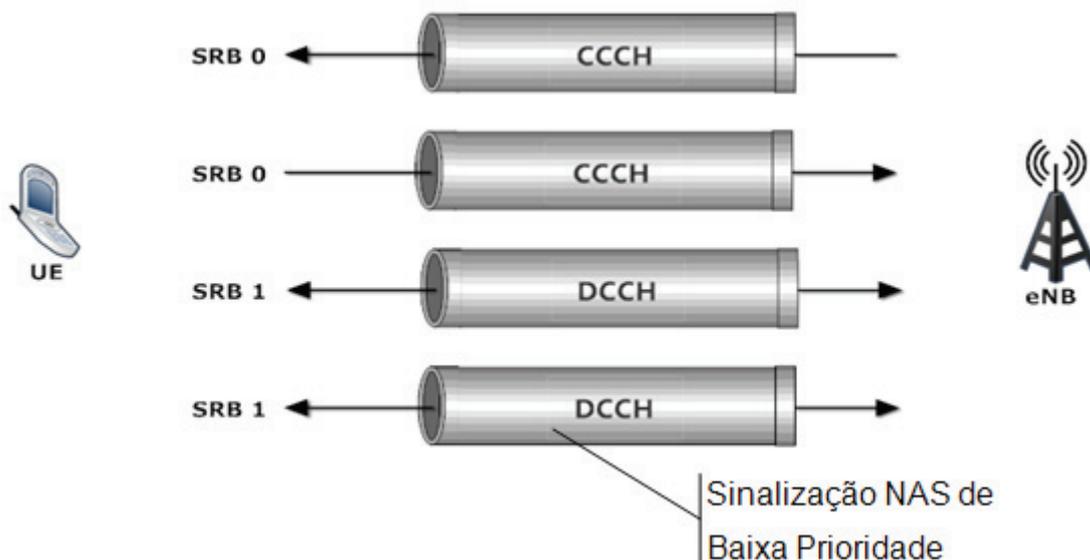
•CCCH (*Common Control Channel*) – este canal é usado para estabelecer uma conexão RRC ou especificamente um SRB (*Signal Radio Bearer*). Ele também é usado para procedimentos de reestabelecimento. Note, SRB 0 é mapeado para o CCCH;

•DCCH (*Dedicated Control Channel*) – este canal prove um canal bi-direcional para sinalização. Logicamente existem dois DCCH ativado:

- SRB 1 – É usado para mensagens de RRC, bem como mensagens RRC que carregam sinalização NAS de alta prioridade.

- SRB 2 – É usado pelo RRC para carregar sinalização NAS de baixa prioridade. Antes do seu estabelecimento, a sinalização de baixa prioridade é enviada através do SRB1.

Figura 47: Sinalização em CCCH e DCCH

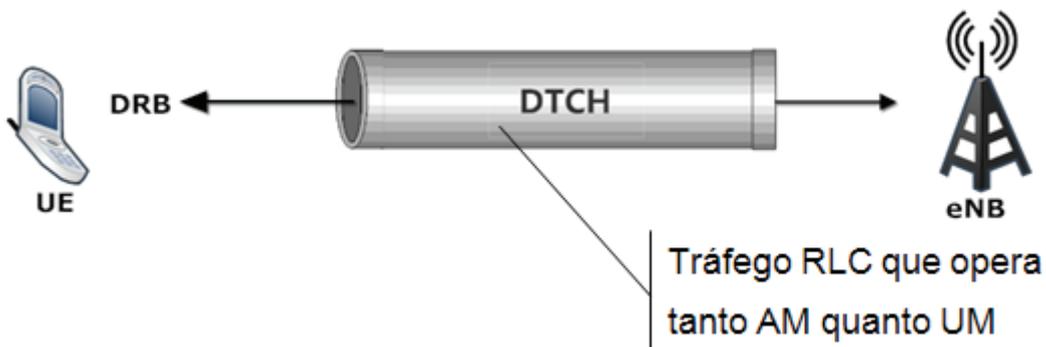


Fonte: Autor, 2013

3.3.1.2 CANAIS LÓGICOS DE TRÁFEGO

LTE no release8 do 3GPP tem um tipo de canal lógico transportando trafego, ou seja, o DTCH (*Dedicated Radio Bearer*), ou seja, datagramas IP.

Figura 48: *Dedicated Traffic Channel*



Fonte: Autor, 2013

O DTCH é um canal bidirecional que pode operar tanto no RLC AM (*Acknowledged Mode*) ou UM (*Unacknowledged Mode*). Isso é configurado por RRC e é baseado no QoS (*Quality of Service*) aplicada ao E-RAB (*EPS Rádio Access Bearer*).

3.3.2 CANAIS DE TRANSPORTE

Historicamente, os canais de transporte foram divididos entre canais comuns e dedicados. No entanto, LTE se afastou dos canais comuns/ compartilhados, devido às eficiências associadas que estes proporcionam. Os principais Canais de Transporte do Release 8 do 3GPP incluem:

- BCH (*Broadcast Channel*)- este é um canal de formato fixo que ocorre uma vez por quadro e é utilizado para transportar o MIB (*Master Information Block*). Nota-se que a maioria das mensagens de informação do sistema são transportadas pelo DL- SCH (*Downlink-Shared Channel*);

- PCH (*Paging Channel*) - e utilizado para transportar as mensagens de *paging* do PCCH. Também utiliza DRX (*Discontinuous Reception*) para melhorar a vida útil da bateria do UE;

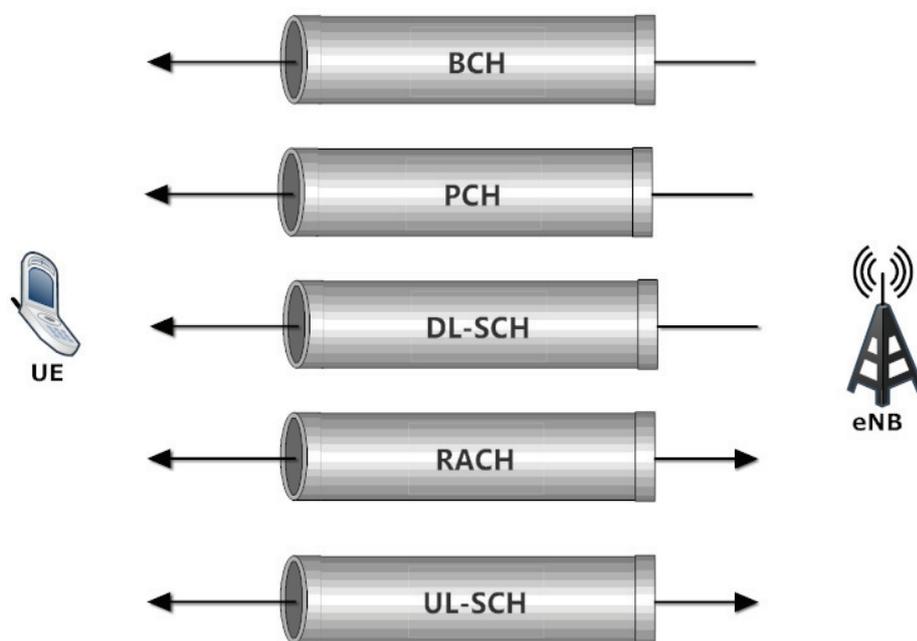
- DL-SCH (*Downlink – Shared Channel*) – é o principal canal de *downlink* para dados e sinalização. Ele suporta “dynamic scheduling”, bem como “*dynamic link adaptation*”;

Alem disso, utiliza a operação HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request) para melhorar a performance. conforme indicado anteriormente, ele também facilita o envio de mensagens de informações do sistema.

- RACH (*Randon Access Channel*) – carrega informação limitada e é usada em conjunto com canais físicos e preâmbulos para fornecer procedimentos de resolução de contenção.

•UL-SCH (*Uplink Shared Channel*) – semelhante ao DL-SCH, este canal suporta o agendamento dinâmico (eNB controlada) e adaptação dinâmica de link ao variar a modulação e codificação. Além disso, ele também suporta a operação HARQ (*Hybrid Automatic Repeat Request*) para melhorar o desempenho do sistema.

Figura 49: Canais de Transporte do LTE em Release 8



Fonte: Autor, 2013

3.3.3 CANAIS FÍSICOS

A camada *Phy* (Física) facilita o transporte de canais de transporte MAC bem como fornece a formatação, agendamento e indicadores de controle.

3.3.3.1 CANAIS FÍSICOS DE DOWNLINK

Canais físicos no downlink incluem:

•PBCH (*Physical Broadcast Channel*) – utilizado para transportar o BCH;

- PCFICH (*Physical Control Format Indicator Channel*)- é usado para indicar o numero de símbolos OFDM utilizados pelo PDCCH;

- PDCCH (*Physical Downlink Control Channel*) – usado para alocação de recursos;

- PHICH (*Physical Hybrid ARQ Indicator Channel*) – usado pelo processo HARQ;

- PDSCH (*Physical Downlink Shared Channel*) – usado para transportar o DL-SCH;

3.3.3.2 CANAIS FÍSICOS DE UPLINK

Há um numero de canais físicos de uplink em LTE. Estes incluem:

- PRACH (*Physical Random Access Channel*) – este canal transporta o preâmbulo de acesso aleatório. A localização do PRACH é definida pela sinalização da camada superior, ou seja, RRC;

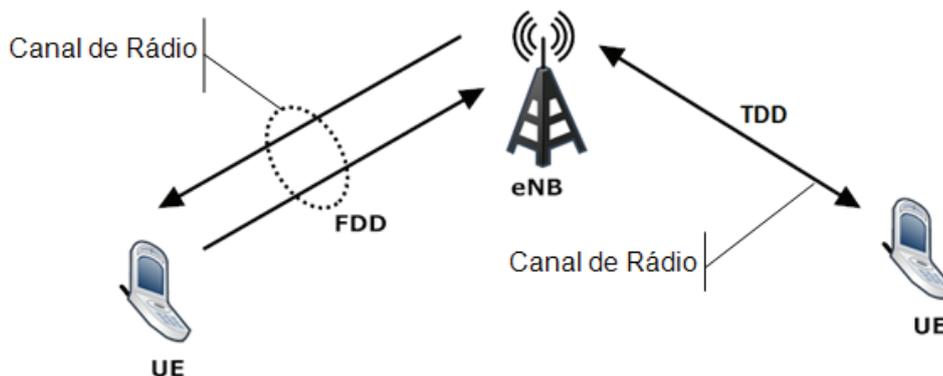
- PUCCH (*Physical Uplink Control Channel*) – leva o controle de *uplink* e o feedback. Também pode levar os pedidos de agendamento para o e.NB;

- PUSCH (*Physical Uplink Shared Channel*) – que é o principal canal de *uplink* e é utilizado para transportar o UL-SCH. Ele transporta tanto sinalização quanto dados do usuário, além do controle de *uplink*. É interessante notar que o UE não tem permissão para transmitir o PCCH e PUSCH ao mesmo tempo.

3.3.4 CANAIS DE RÁDIO

O termo “canal de rádio” é geralmente usado para descrever o canal global ou seja, os portadores de *downlink* para operação FDD e portadora para a operação TDD.

Figura 50: Canais de Rádio

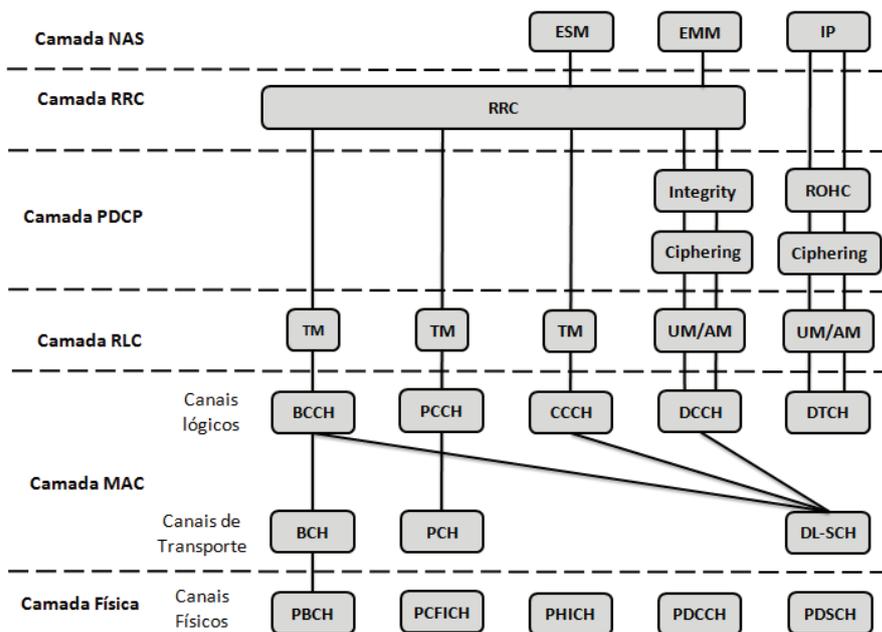


Fonte: Autor, 2013

3.3.5 MAPEAMENTO DE CANAIS

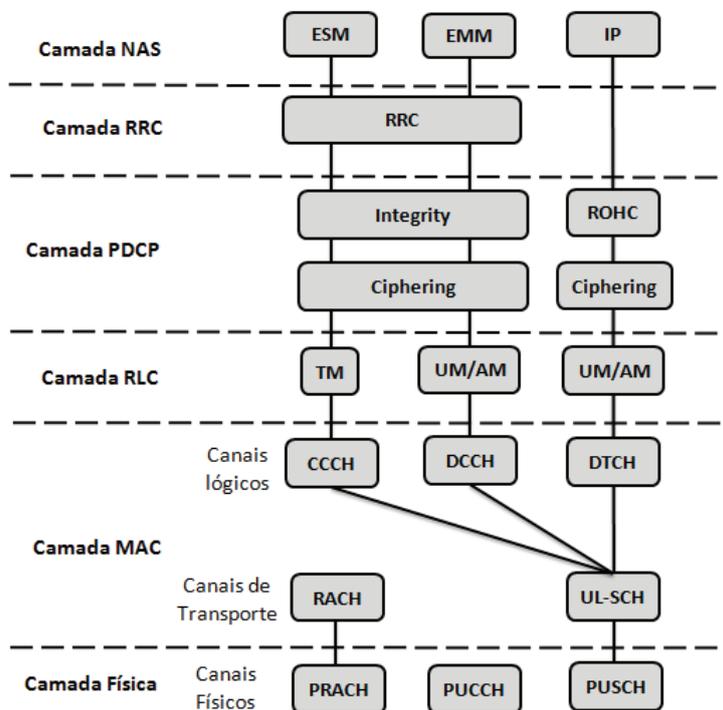
Existem varias opções para multiplexação múltiplas portadoras juntas, de tal forma que canais lógicos podem ser mapeados em um ou mais canais de transporte. Estes, por sua vez são mapeados em canais físicos.

Figura 51: Mapeamento dos Canais de Downlink



Fonte: Autor, 2013

Figura 52: Mapeamento dos Canais de Uplink



Fonte: Autor, 2013

A fim de facilitar a multiplexação de canais lógicos em canais de transporte, a camada MAC normalmente adiciona um LCID (*Logical Channel Identifier*).

3.4 ESTRUTURA DO QUADRO LTE

Em LTE, os dispositivos têm alocados blocos de subportadoras por um período de tempo. Estes são referidas como um PRB (*Physical Resource Block*). Os blocos de recursos estão contidos dentro da estrutura genérica de quadro LTE, em que dois tipos são definidos: quadros contidos de rádio Tipo 1 e Tipo 2.

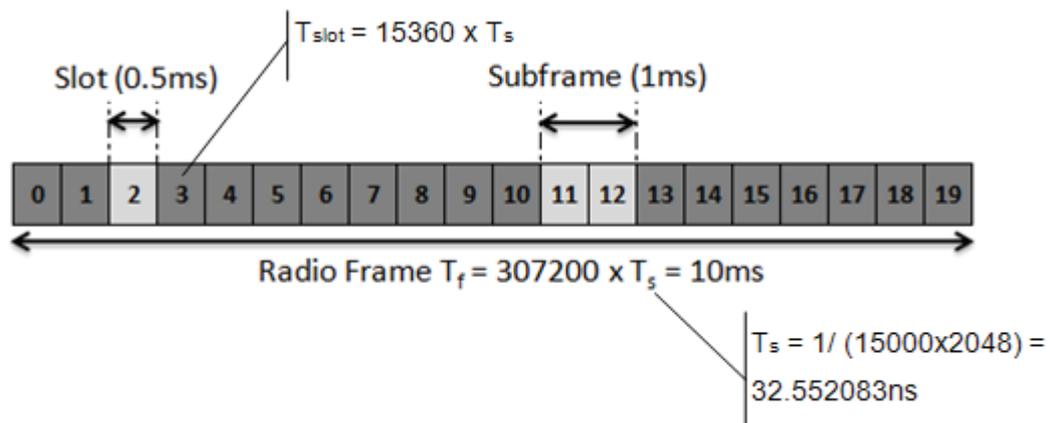
3.4.1 QUADROS DE RÁDIO TIPO 1, SLOTS E SUB-QUADROS

A estrutura do frame de rádio Tipo 1 é usado pelo FDD e é de 10ms de duração. É composto de 20 slots, cada um com 0,5 ms de duração. Dois slots adjacentes formam um subframe para a operação FDD, 10 subframes estão disponíveis para a transmissão de uplink, com cada transmissão separada no domínio da frequência.

Figura 52 ilustra a estrutura do FDD, bem como destaca os conceitos de slots e subframe.

Além disso, ilustra como os slots estão numerados de 0 a 19.

Figura 53: Estrutura do Quadro LTE.



Fonte: Autor, 2013

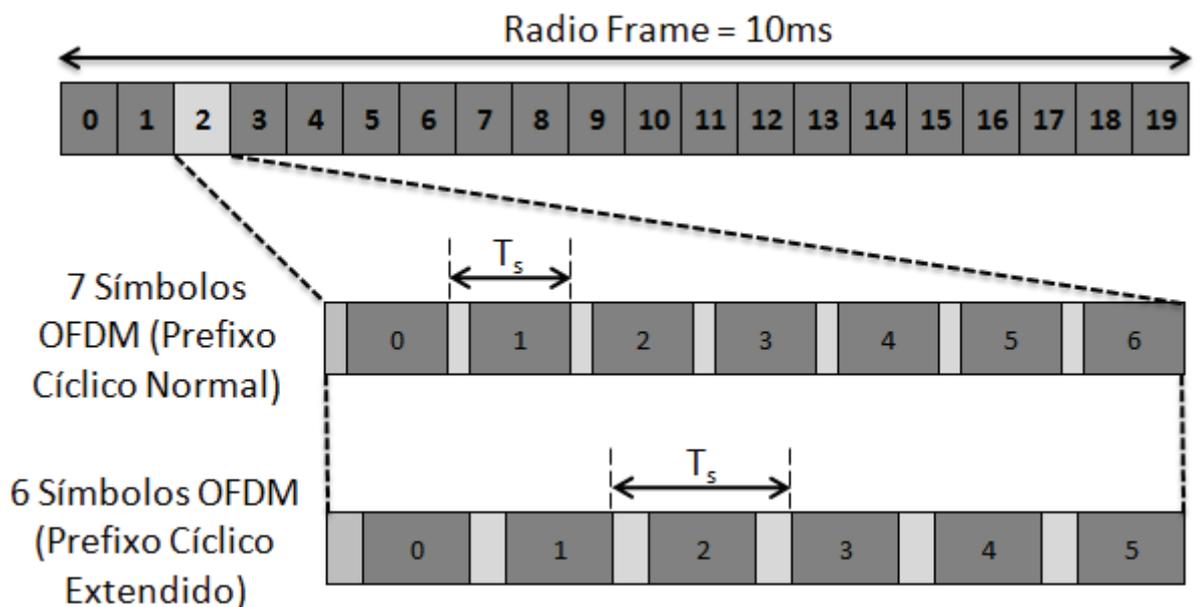
3.4.1.1 UNIDADE DE TEMPO LTE

A unidade de tempo LTE é identificada como T_s e é calculado com $1/(15000 \times 2048)$, o que equivale a cerca de 32.552083ns. Vários aspectos da LTE utilizam este parâmetro, ou múltiplos do mesmo, para identificar tempo e informações de configuração.

3.4.1.2 OPÇÕES DE PREFIXO CICLICO

O conceito de um CP (*Cyclic Prefix*) dentro de sistemas OFDM já foi discutido. Em LTE, dois tamanhos diferentes de prefixo cíclicos, ou seja, “Normal” e “Extended” foram selecionados. A fim de facilitar, dois formatos de slot diferente são obrigatórios. Figura 53 ilustra as opções de seis e sete símbolos OFDM. Obviamente, para facilitar um maior prefixo cíclico, um dos símbolos é sacrificado, assim a taxa de símbolos e reduzida.

Figura 54: Cyclic Prefix Normal e Prolongado



Fonte: Autor, 2013

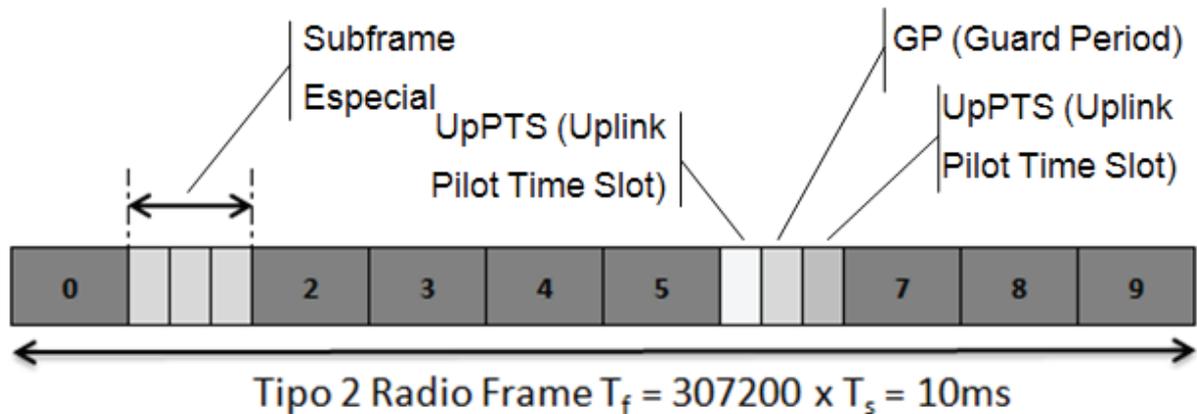
O uso de prefixo cíclico prolongado destina-se a situações em que o alcance da célula precisa ser estendido, por exemplo, para fins de planejamento de cobertura ou quando os serviços de multicast estão sendo empregados na célula.

3.4.2 QUADROS DE RÁDIO TIPO 2, SLOTS E SUB-QUADROS

O estrutura do frame de rádio Tipo 2 é usado para TDD. Uma importante adição a estrutura do frame TDD é o conceito de “subframes especiais”. Isso inclui um DwPTS (*Dowlink Pilot Time Slot*), GP (*Guard Period*) e UpPTS (*Uplink Pilot Time Slot*). Estes têm comprimentos individuais configuráveis e um comprimento total combinado de 1 ms.

Para a operação TDD, os dez subframes são compartilhados entre o uplink e o downlink. Ambas periodicidades de comutação de 5ms e 10ms são suportadas, no entanto subframes 0 e 5 devem ser alocados para o downlink pois estes contem o PSS (*Primary Synchronization Signal*) e SSS (*Secondary Synchronization Signal*), bem como a informação de broadcast transmitida no frame 0.

Figura 55: Quadro de Rádio Tipo 2 TDD



Fonte: Autor, 2013

Existem varias opções configuração de quadros disponíveis para operação TDD. Tabela 2-2 ilustra estas diferentes opções. Opções de configuração 0, 1, 2 e 6 têm um ponto de comutação de 5ms e, portanto, requerem dois subframes especiais. O restante é baseado em um ponto de comutação de 10ms. Na tabela, a letra “D” é reservada para as transmissões de downlink, “U” transmissões de uplink e “S” indica um subframe especial com três campos DwPTS,GP e UpPTS.

Tabela 5: Pontos de Comutação para Quadro de Rádio Tipo 2

Configuração	Período do Ponto de Comutação	Número de Subframes									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	5ms	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
1	5ms	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D
2	5ms	D	S	U	U	U	D	S	U	D	D
3	10ms	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
4	10ms	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
5	10ms	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
6	5ms	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

Fonte: Huawei, 2012

O DwPTS e UpPTS em um quadro especial podem ser utilizados para transportar informações . Por exemplo, o DwPTS podem incluir as informações de agendamento e os UpPTS pode ser configurado para facilitar a rajadas de acesso aleatório.

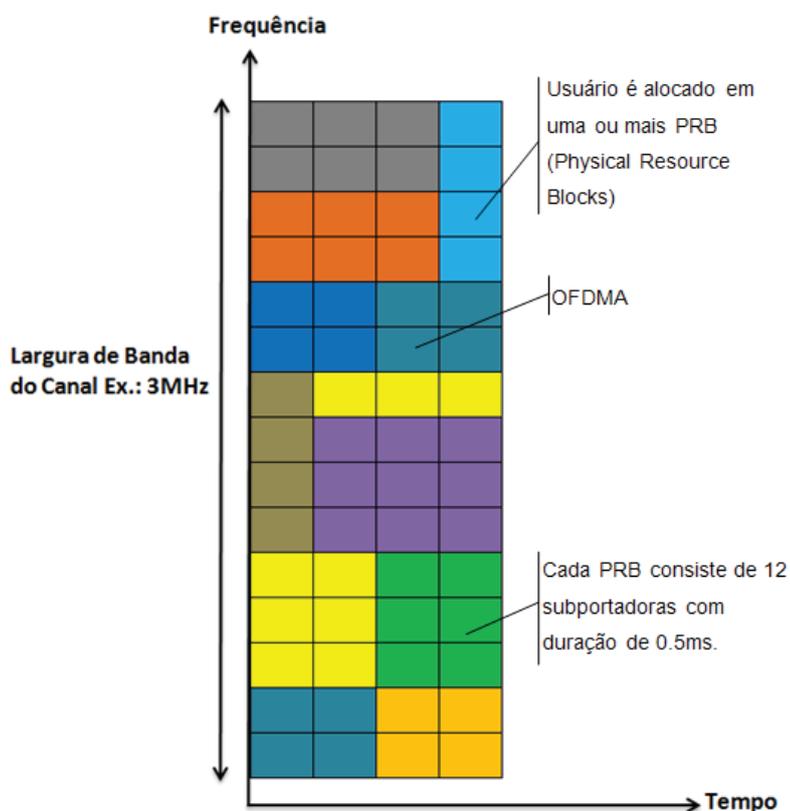
3.5 OFDMA NO DOWNLINK

3.6 ESTRUTURA GERAL DO OFDMA

O downlink E-UTRAN é baseado em OFDMA. Como tal, vários dispositivos são capazes de receber informações ao mesmo tempo, mas em partes diferentes do canal de rádio. Na maioria dos sistemas OFDMA, isto é referido como “ subcanais” , ou seja, um conjunto de subportadoras. No entanto, em E-UTRAN,o termo “subcanais “ é substituído pelo termo PRB (PHYSICAL Resource Block)

Figura 54 ilustra o conceito de OFDMA, segundo o qual, a diferentes usuários são atribuídos um ou mais blocos de recursos no tempo e no domínio da frequência, permitindo assim o agendamento eficiente dos recursos disponíveis.

Figura 56: OFDMA em LTE.



Fonte: Autor, 2013

É importante notar também que a um dispositivo é geralmente atribuído 1 ms de tempo, ou seja, um subframe, e não uma PRB individual.

3.6.1 PHYSICAL RESOURCE BLOCKS E RESOURCE ELEMENTS

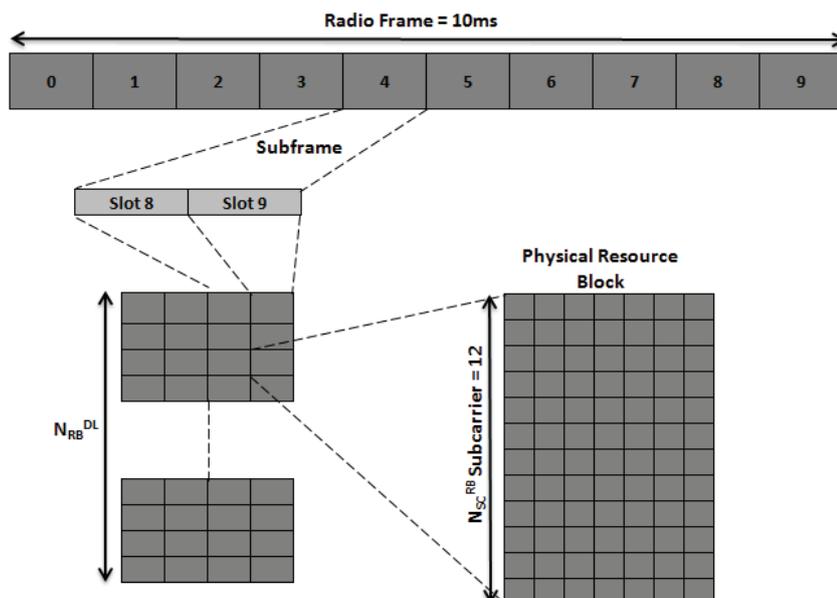
Um PRB (*Physical Resource Block*) consiste em 12 subportadoras consecutivas e tem a duração de um slot, ou seja, 0,5 ms.

Figura 56 ilustra o tamanho de uma PRB. O parâmetro N_{RB}^{DL} é usado para definir o número de RB (*Resource Block*) usado no DL (*Downlink*). Este é dependente da largura de banda do canal. Em constante, N_{RB}^{UL} é usado para identificar o número de blocos de recursos no UL (*Uplink*). Cada *Resource Block* consiste em N_{SC}^{RB} subportadoras, que para a operação padrão é definido como 12. Além disso, outra configuração está disponível quando utiliza MBSFN (*Multimedia Broadcast Multicast Service Single Frequency Network*) e um espaçamento de subportadora de 7.5kHz.

O PRB é usado para identificar uma atribuição. Tipicamente inclui seis ou sete símbolos, dependendo se um prefixo cíclico prolongado ou normal e configurado.

O termo RE (*Resource Element*) é usado para descrever uma subportadora com um símbolo de duração. Este pode então ser atribuído a transportar informações modulada, informações de referencia ou nada.

Figura 57: Physical Resource Block e Resource Element



Fonte: Autor, 2013

As diferentes configurações para o PRB E-UTRAN de downlink estão ilustradas na tabela 6.

Figura 58: Parâmetros de PRB de Downlink

Configuração		N_{SC}^{RB}	N_{Symbo}^{DL}
Prefixo Cíclico Normal	$\Delta f = 15\text{kHz}$	12	7
Prefixo Cíclico Prolongado	$\Delta f = 15\text{kHz}$		6
		$\Delta f = 7.5\text{kHz}$	24

Fonte: HUAWEI, 2013

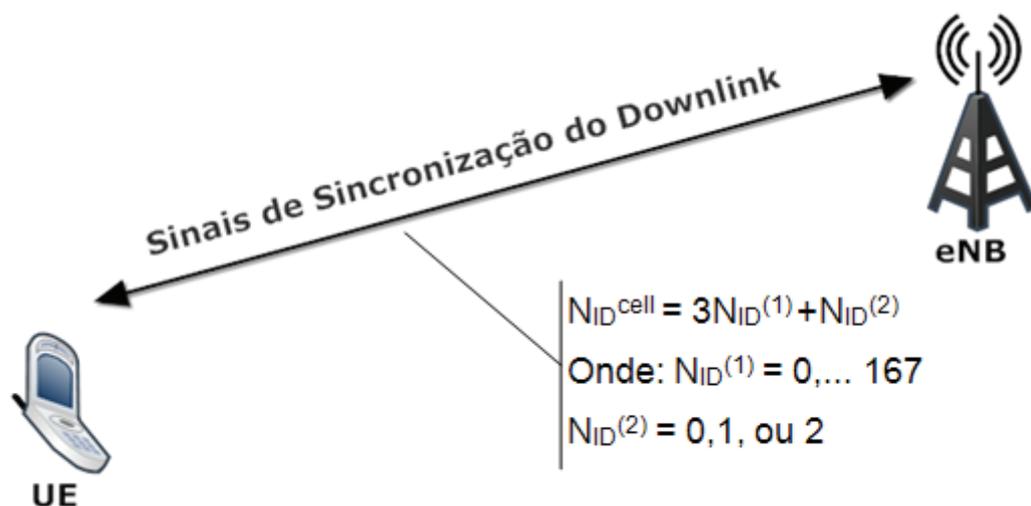
A configuração PRB de Uplink é semelhante ao mostrado, no entanto a opção 7.5KHz não está disponível.

3.6.2 SINAIS FÍSICOS LTE

Para que o UE seja capaz de acessar a rede, o eNB deve transmitir vários sinais de downlink. Como o downlink pode atender desde 1.4MHz a 20MHz e o dispositivo pode não estar ciente da configuração do eNB, o método para encontrar o sistema precisa ser consistente.

Conseqüentemente, sincronização e informação de identidade da célula devem aparecer no downlink em um local fixo, independente da configuração do espectro rádioelétrico. Figura 57 ilustra a estrutura do N_{ID}^{cell} (Cell Identity).

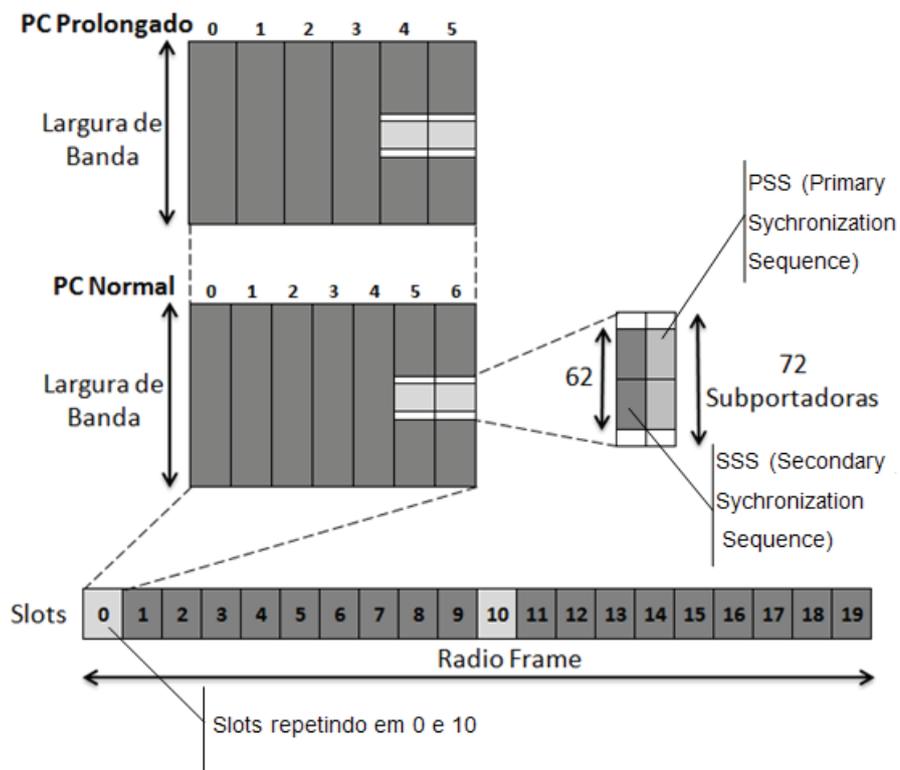
Figura 59: Downlink Cell ID



Fonte: Autor, 2013

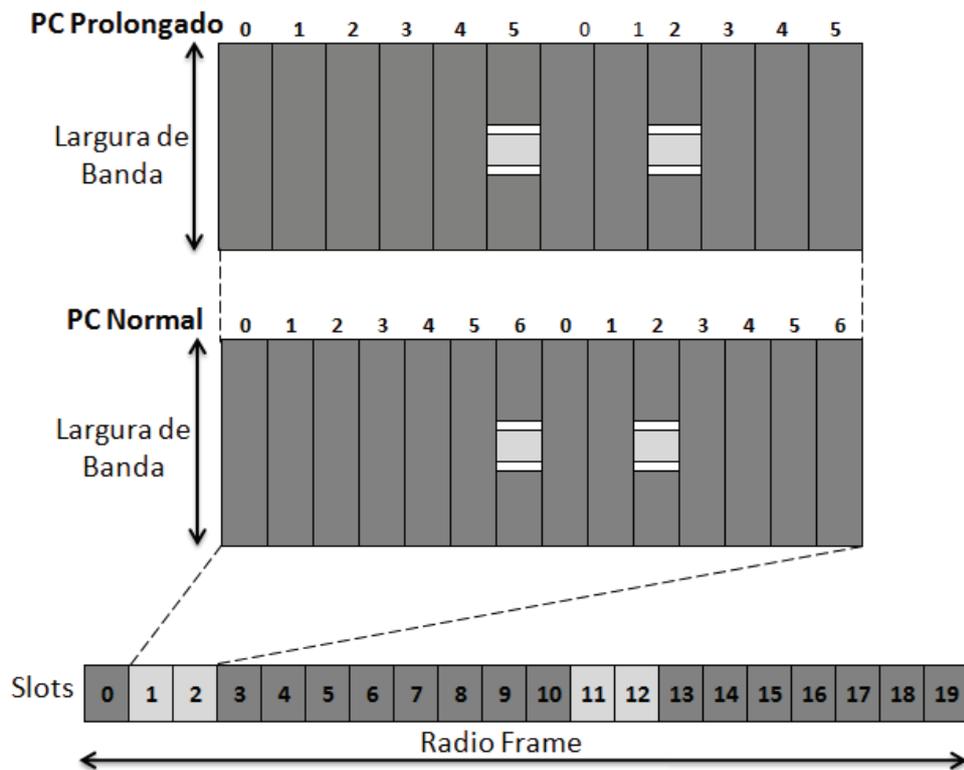
Em LTE, existem duas seqüências de sincronização. Estes são referidos como o PSS (*Primary Synchronization Signal*). A localização destes é dependente do modo de transmissão, ou seja, FDD ou TDD, bem como o uso do prefixo cíclico normal ou prolongado.

Figura 60: Localização do PSS e SSS para FDD



Fonte: Autor, 2013

Figura 61: Localização do PSS e SSS para TDD



Fonte: Autor, 2013

3.6.2.1 PRIMARY SYNCHRONIZATION SIGNAL

O PSS fornece informações de sincronização de downlink para o UE. O sinal enviado é uma das três sequências de ZC (Zadoff-Chu). Isso fornece um pseudo padrão de ruído em que os dispositivos podem correlacionar, em que os dispositivos podem correlacionar, enquanto ao mesmo tempo permite que as células /setores adjacentes no eNB utilizem sinais de sincronização diferente. O N_{ID} (0, 1 ou 2) é mapeado para um índice de raiz Zadoff-Chu, que é usado no processo de geração de sequência.

3.6.2.2 SECONDARY SYNCHRONIZATION SIGNAL

O SSS é gerado a partir da concatenação de duas sequências binárias intercaladas, com 31 bits que são alteradas ciclicamente com base no valor do N_{ID} .

3.6.3 SINAIS DE REFERÊNCIA DE DOWNLINK

Ao contrario de outros sistemas, a interface aérea LTE não emprega um preâmbulo de frame. Em vez disso, utiliza diversos RS (*Reference Signal*) para facilitar a demodulação coerente, a estimativa de canal, as medições de qualidade do canal e tempo de sincronização, etc.

Fundamentalmente, existem três tipos de sinais de referencia de downlink:

- Específico a célula (não – MBSFN).
- MBSFN (Multimedia Broadcast Multicast Service Single Frequency Network).
- Específico ao UE.

3.6.3.1 SINAIS DE REFERÊNCIA ESPECÍFICOS DE CÉLULAS

Em LTE, os sinais de referencia específicos de células são dispostos em uma estrutura bidirecional de tempo e frequência. Isso tem sido feito de modo que eles são equivalentes e, portanto, fornece uma estimativa média de erro mínimo quadrado para o canal. Além disso, o sincronismo entre os símbolos de referencia é um fator importante para a estimativa de canal e se relaciona com o Doppler suportado, ou seja, velocidade. Em LTE, isso funciona com dois símbolos de referencia por slot.

O espaçamento no domínio da frequência também é um fator importante, como isso se relaciona com a largura de coerência prevista e o atraso de propagação do canal. Em LTE há uma separação de seis subportadora entre os sinais de referencia, no entanto estes são selecionados no tempo de tal forma que eles aparecem a cada três subportadoras.

3.6.3.2 SINAIS DE REFERÊNCIA MBSFN

O sistema LTE também define um conjunto de sinais de referencia para MBSFN. Estes só estão presentes quando o PMCH (*Physical Multicast Channel*) está presente e utiliza o prefixo cíclico prolongado.

3.6.3.3 SINAIS DE REFERÊNCIA ESPECÍFICOS DE UE

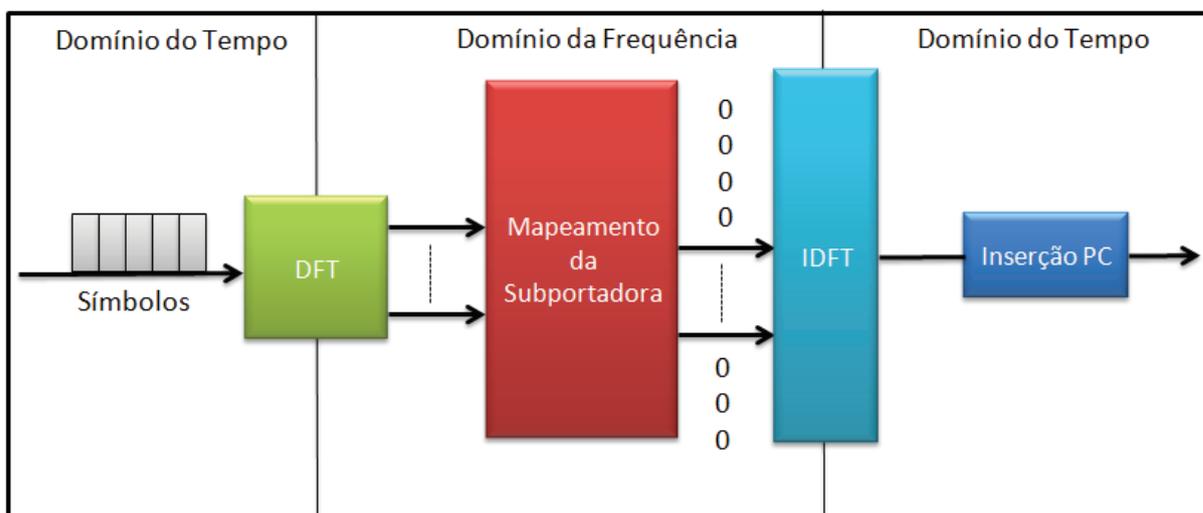
Sinais de referencia específicos do UE são suportados para transmissão por antena única no PDSCH e são transmitidos pela porta de antena 5. É normalmente utilizado para beamforming quando pré-codificação não baseada em codebook é aplicada.

3.7 SC-FDMA NO UPLINK

O uplink em LTE, como mencionado anteriormente, é baseado em SC-FDMA (*Single Carrier – Frequency Division Multiple Access*). Este foi por sua baixa PAPR (*Peak to Average Power Ratio*) e flexibilidade que reduziu a complexidade da UE e melhorou a performance de potência e vida útil da bateria. SC-FDMA tenha combinar as melhores características dos sistemas de portadora única, com baixa relação de potência “peak-to-average”, com as vantagens de multi-portadora do OFDM e, como tal, é bem adequado para o uplink de LTE.

3.7.1 GERAÇÃO DE SINAIS SC-FDMA

Figura 62: Conceito de Mapeamento de Subportadora SC-FDMA.



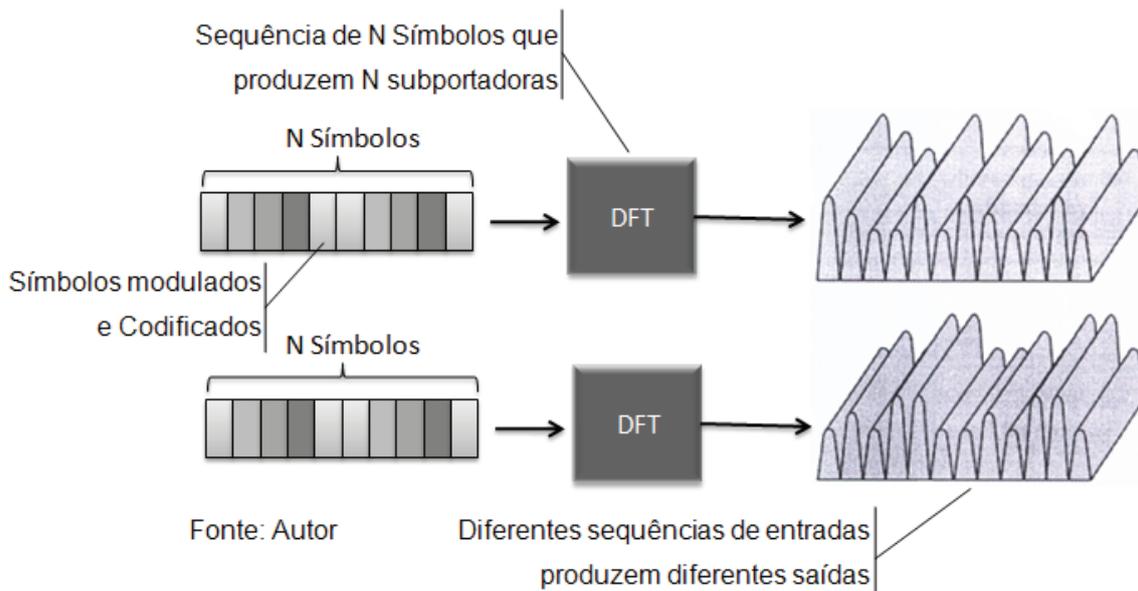
Fonte: Autor, 2013

O transmissor básico e a arquitetura do receptor é muito semelhante (quase idêntico) ao OFDM, e oferece o mesmo grau de proteção multipath importante, porque a forma de onda subjacente é essencialmente uma única portadora, e o PAPR é menor. É muito difícil representar visualmente SC-FDMA no tempo e no domínio da frequência, no entanto esta seção tem como objetivo ilustrar o conceito.

Na figura 59, a processo de geração de sinal SC-FDMA começa criando no domínio do tempo uma forma de onda dos símbolos dos dados a serem transmitidos. Este é então convertido para o domínio da frequência, usando uma DFT (*Discrete Fourier Transform*). Comprimento e taxa de amostragem DFT são escolhidos de modo que o sinal está totalmente representado, bem como sendo espaçadas 15kHz.cada subportadora terá sua própria amplitude e fase fixas para a duração do símbolo SC-FDMA. Em seguida o sinal é deslocado para o local desejado na largura de banda de canal utilizando o conceito de inserção zero, ou seja, mapeamento de subportadora. O sinal é então convertido a uma única portadora usando uma IDFT (Inverse Discrete Fourier Transform), além de outras funções. Finalmente, um prefixo cíclico pode ser adicionado. Note-se que funções adicionais, tais como conversores SP (Serial para Paralelo) e PS (Paralelo para Serial) também são necessários como parte de uma descrição detalhada funcional.

Figura 61 ilustra o conceito da DFT, de tal forma que um grupo de N símbolos são mapeados para N subportadoras. No entanto, dependendo da combinação dos N símbolos na DFT, a saída vai variar. Como tal, a amplitude real e fase das N subportadoras é mais como uma “palavra de código”.

Figura 63: Geração de Sinais SC-FDMA

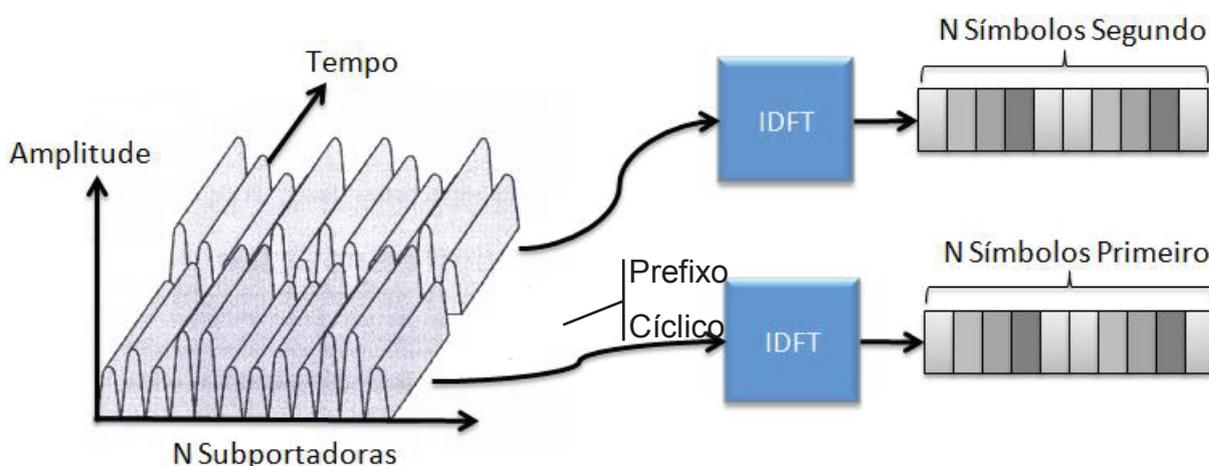


Fonte: Autor

No eNB, o receptor toma N subportadoras e inverte o processo . Isto é conseguido usando uma IDFT (*Inverse Discrete Fourier Transform*) que efetivamente reproduz os N símbolos originais. Figura 62 ilustra a visão básica de como as subportadoras recebidas no eNB são convertidas de volta para os sinais originais.

Note que os símbolos SC-FDMA têm amplitude e fase constantes como OFDMA, um PC (Prefixo Cíclico) ainda é necessário.

Figura 64: SC-FDMA e o eNB



Fonte: Autor, 2013

OFDMA VERSUS SC-FDMA

A principal razão de o SC-FDMA ser especificado para uplink foi devido a suas características de PA (Power Amplifier). Normalmente, o sinal de SC-FDMA vai operar com uma PAPR de 2 a 3 dB mais baixos. Isso torna o sistema mais eficiente, aumentando a vida útil da bateria do UE. SC-FDMA também tem melhor desempenho quando em células maiores.

Deve-se notar que OFDMA é melhor em várias áreas, como ortogonalidade inter-simbólica, e a capacidade de prover um mecanismo de agendamento mais flexível no domínio da frequência. Isso aumenta o desempenho do sistema. Além disso, OFDMA é mais adequado para a operação com o MIMO (Multiple Input Multiple Output) no downlink. A tabela 7 destaca três características principais e indica qual a tecnologia é mais adequada.

Tabela 6: SC-FDMA versus OFDMA

Características	SC- FDMA	OFDMA
Baixo PAPR	SIM	NÃO
Desempenho	NÃO	SIM
Uplink MIMO	NÃO	SIM

Fonte, HUAWEI, 2012

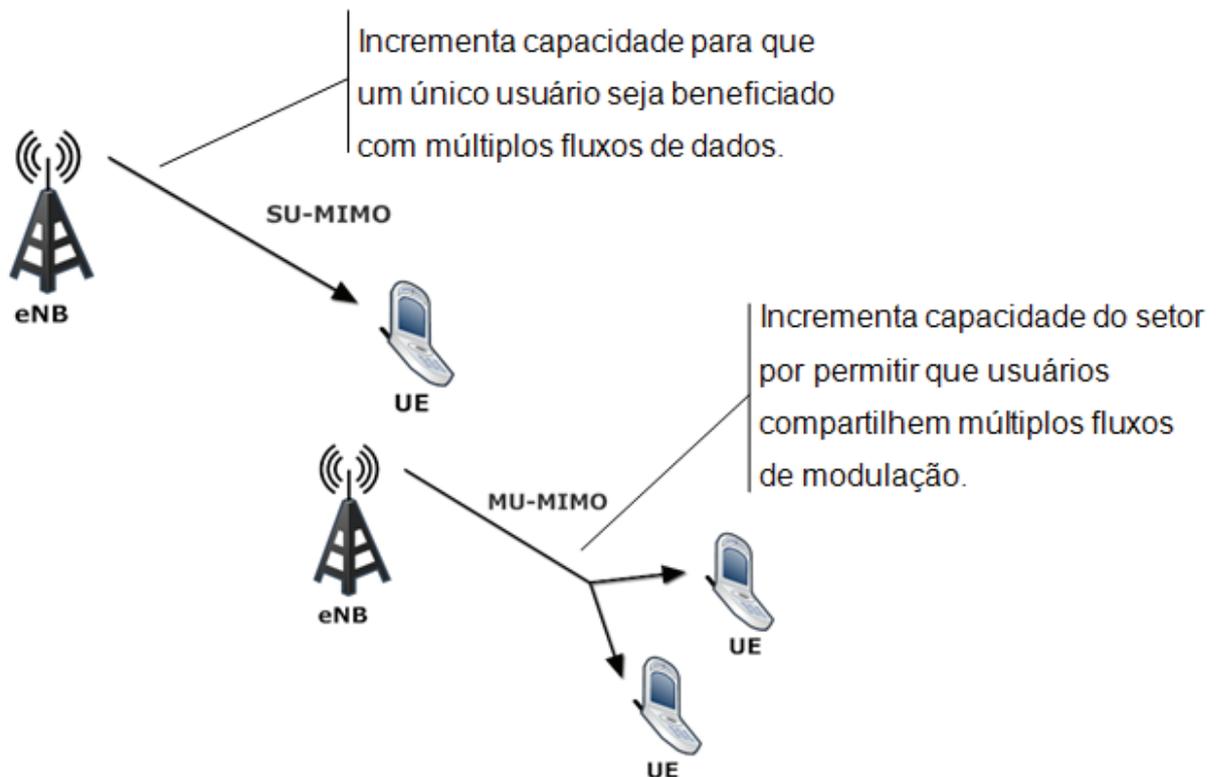
3.8 MULTIPLE INPUT E MULTIPLE OUTPUT

MIMO diz respeito ao uso de múltiplas antenas no transmissor (Multiple Input) e receptor (Multiple Output). A terminologia e os métodos utilizados no MIMO podem diferir de sistema para sistema, no entanto a maioria cai em uma das duas categorias:

- SU- MIMO (*Single User – Multiple Input Multiple Output*) – utiliza a tecnologia MIMO para melhorar o desempenho para um único usuário.

- UM-MIMO (*Multi User – Multiple Input Multiple Output*) – permite a múltiplos usuários serem servidos através do uso de técnicas de multiplexação espacial.

Figura 65: SU-MIMO e UM-MIMO

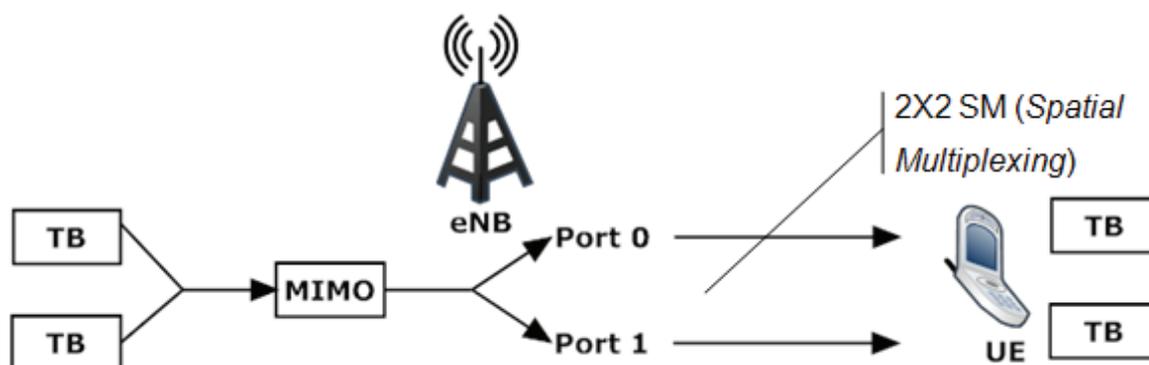


Fonte: Autor, 2013

3.8.1 MULTIPLEXAÇÃO ESPACIAL

A categoria mais comum de MIMO é referida como SM (*Spatial Multiplexing*). Isso permite aos múltiplos fluxos de modulação de símbolos serem enviados para um único UE usando os mesmos parâmetros de tempo e de frequência. A diferenciação de sinais é realizada pelos sinais de referência diferentes, que foram enviados como parte do PRB (*Physical Resource Block*). Figura 64 ilustra o conceito de multiplexação espacial usando um sistema MIMO 2X2.

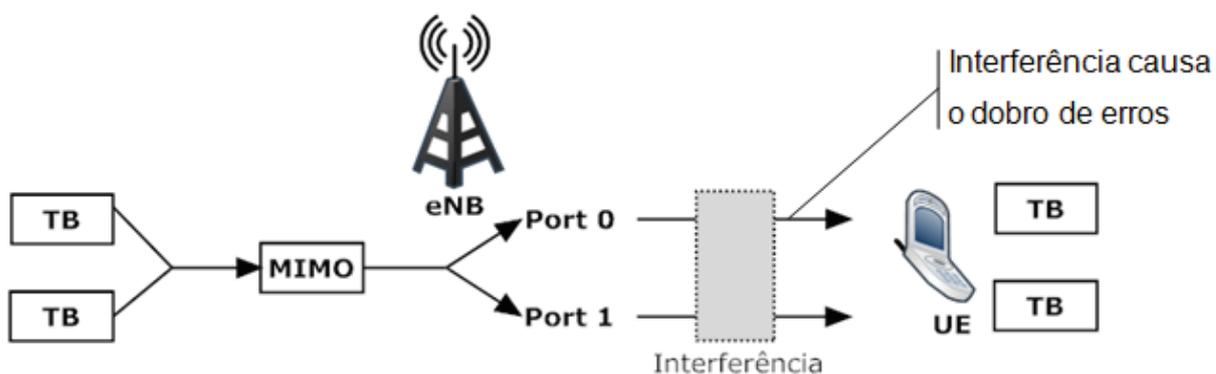
Figura 66: Multiplexação de Espacial do MIMO.



Fonte: Autor, 2013

O principal problema com multiplexação espacial em um sistema celular é o alto nível de interferência que pode ser experimentado, especialmente na borda da célula. Infelizmente isso pode afetar ambos os fluxos espaciais, introduzindo, assim o dobro de erros. Por esta razão, multiplexação espacial é tipicamente usado perto do eNB, ou seja, não no limite da célula.

Figura 67: Problemas de interferência devido a Multiplexação Espacial

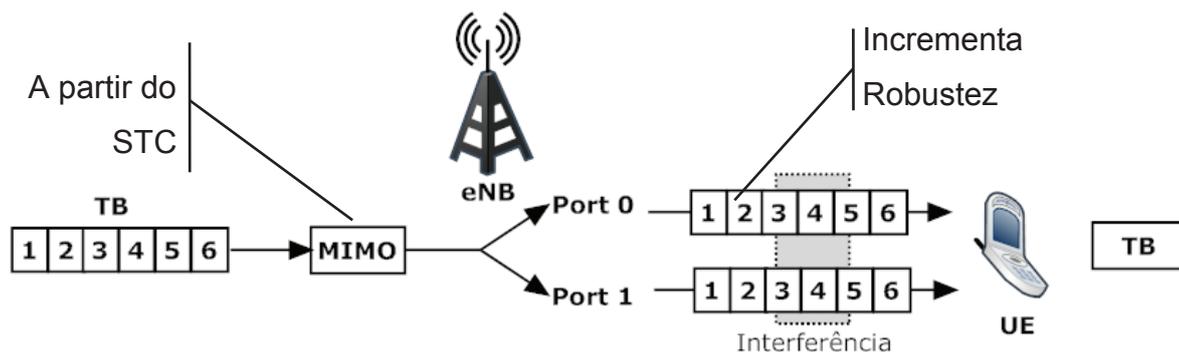


Fonte: Autor, 2013

3.8.2 CODIFICAÇÃO TEMPO ESPAÇO

Se um UE está no limite da célula poderia ainda beneficiar-se de MIMO. No entanto, deveria contar com implementações diferentes, como STC (*Space Time Coding*). Figura 66 ilustra o conceito básico de STC em um sistema MIMO.

Figura 68: Codificação Tempo Espaço

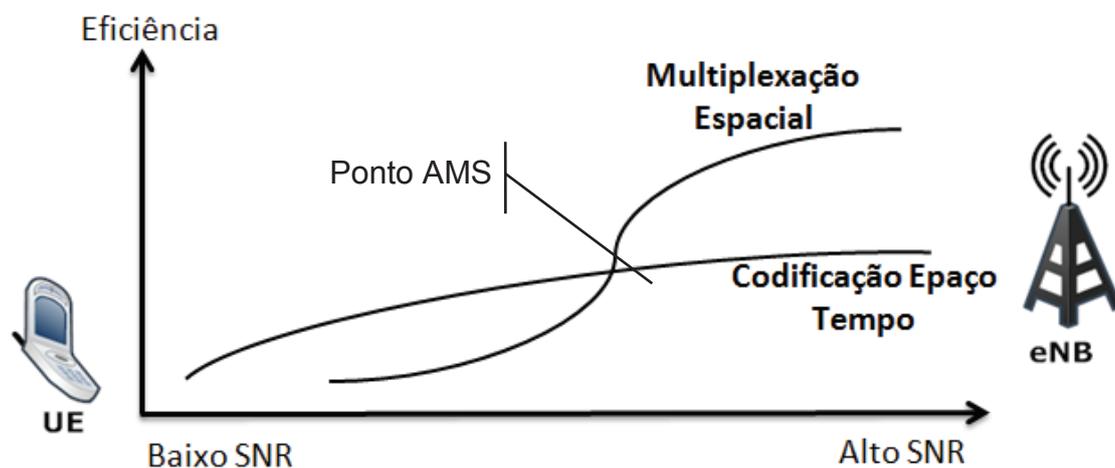


Fonte: Autor, 2013

3.8.3 ADAPTATIVE MIMO SWITCH

Para realmente otimizar a eficiência do canal, alguns sistemas ofereçam a capacidade de suporte MAS (*Adaptive MIMO Switch*). Figura 67 ilustra como um sistema pode utilizar uma combinação de multiplexação espacial e codificação espaço tempo para otimizar o desempenho do e.NB

Figura 69: Adaptive MIMO Switch



Fonte: Autor, 2013

3.9 MULTIMÍDIA BROADCAST MULTISERVICE

MBMS (*Multimídia Broadcast Multicast Service*) é um serviço ponto-a-ponto em que os dados são transmitidos de uma única fonte para múltiplos destinatários. Isto fornece um mecanismo mais eficiente para o fornecimento de serviços como TV móvel e fluxos de texto, etc.

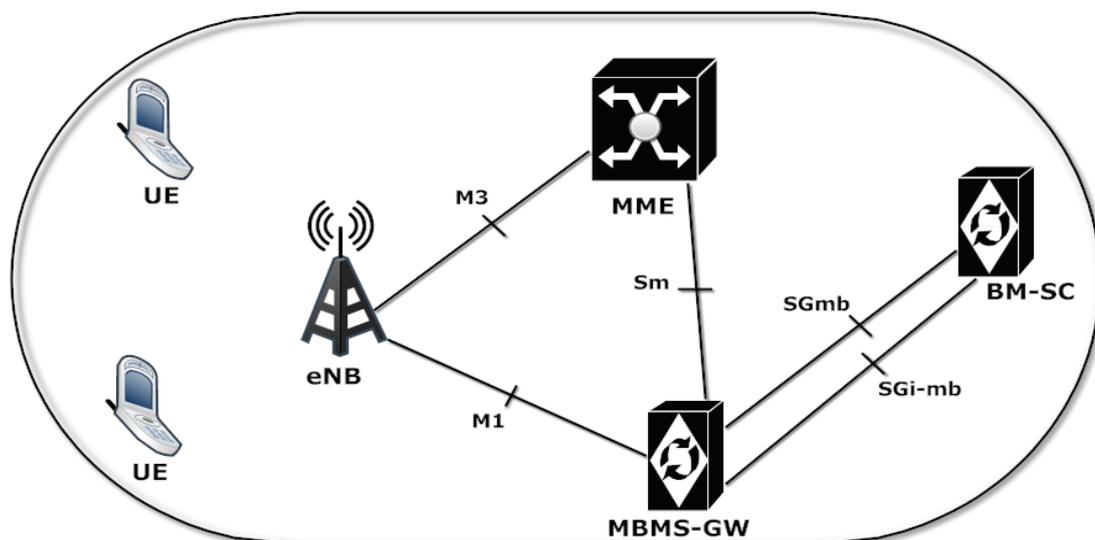
3.9.1 ARQUITETURA LÓGICA MBS

Para suportar MBMS, uma série de funções adicionais são necessárias dentro da arquitetura LTE. Isto inclui:

- BM-SC (Broadcast Multicast – Service Center) – fornece funções para o provisionamento e entrega de serviços a usuários MBMS. Pode ser usado como ponto de entrada para os provedores de conteúdo externo, além de autorizar e iniciar serviços MBMS, ETC;

- MBMS-GW (*Multimedia Broadcast Multicast Service – Gateway*) – suporta a transferência de informações do plano de controle e plano de usuário do BM-SC para o MME e eNB respectivamente. Ele também atribui um endereço IP de multicast para o eNB que deve ser usado para receber os dados MBMS;

Figura 70: Arquitetura Lógica MBMS



Fonte: Autor, 2013

- MCE (*Multi-cell / Multicast Coordination Entity*) - esta função é responsável pelo controle de admissão e a locação dos recursos de rádio utilizado pelo eNBs na área MBSFN (*MBMS over Single Frequency Network*). Embora as especificações não excluam o posicionamento do MCE em qualquer elemento de rede, prevê-se que ele irá fazer parte da eNB.

Se o MCE não faz parte do eNB, a interface M2 vai estar presente para aligar o MCE com o eNB. A interface M3 continuará existir entre o MME e o MCE.

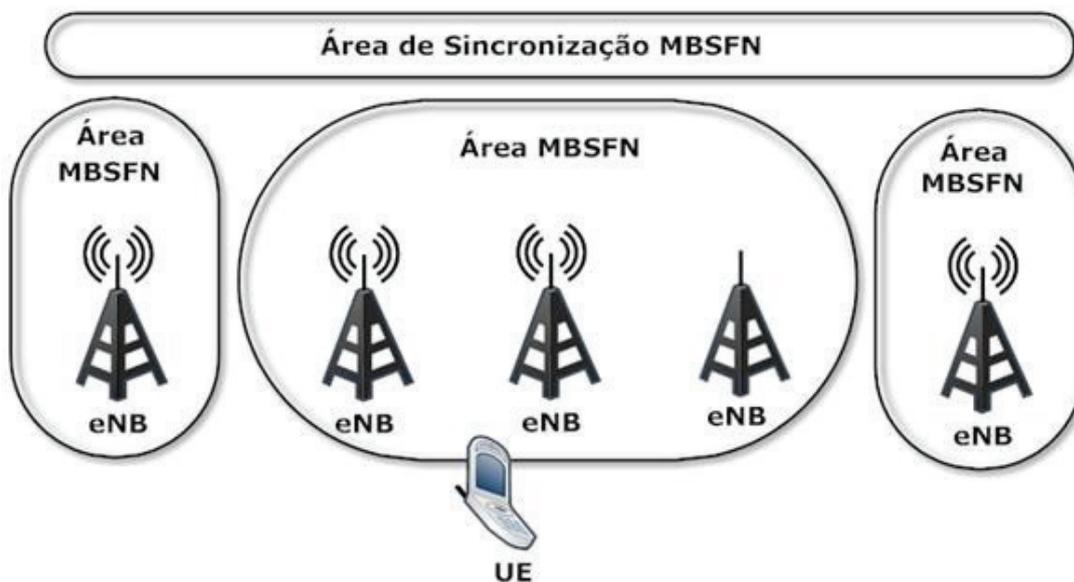
Além dos elementos de rede e funções associadas que já foram discutidos, MBMS também utiliza uma série de “áreas”. Estas incluem (HUAWEI, 2012):

- MBSFN Synchronization Área – esta é uma área dentro da rede onde todos os eNBs podem ser sincronizados e realizar transmissões MBSFN. Estas transmissões podem ainda ser definidas como uma transmissão simulcast de forma de onda idênticas e ao mesmo tempo, de múltiplas células. Como tal, estes são vistos como uma única transmissão em relação ao UE. Áreas de sincronização MBSFN são capazes de suportar uma ou mais MBSFN Áreas.

- MBSFN Área – este consiste em um grupo de células dentro de uma MBSFN Synchronization Área MBSFN Synchronization Área que são coordenadas para atingir uma transmissão MBSFN. A célula dentro de uma MBSFN Synchronization Área só pode pertencer a uma MBSFN Área.

- MBSFN Area Restricted Cell – esta é uma célula dentro da MBSFN Area que não contribui para a transmissão MBSFN. Pode ser capaz de transmitir outros serviços, mas isso vai ser com consumo reduzido de energia e os recursos alocados para a transmissão MBSFN.

Figura 71: MBSFN Synchronization Arenas



Fonte: Autor, 2013

Sincronização do fluxo de dados de usuário na interface aérea e alcançada usando o protocolo SYNC na interface M1. Como parte desses procedimentos, o BM-SC inclui um time stamp junto com os pacotes SYN V PDU que são usados para garantir que todos os eNBs dentro da MBSFN Synchronization Area usem uma referência comum.

4 ESTUDO DE CASO – ATIVAÇÃO DA REDE LTE EM FLORIANÓPOLIS.

Neste capítulo será apresentado o estudo de caso da ativação da rede LTE em Florianópolis pela operadora VIVO-Telefônica, onde exporá a motivação para a implementação do serviço 4G no Brasil. As frequências licitadas para este fim. Os equipamentos utilizados para transmissão do sinal celular. Simulações de Cobertura e avaliação dos resultados obtidos após ativação da rede.

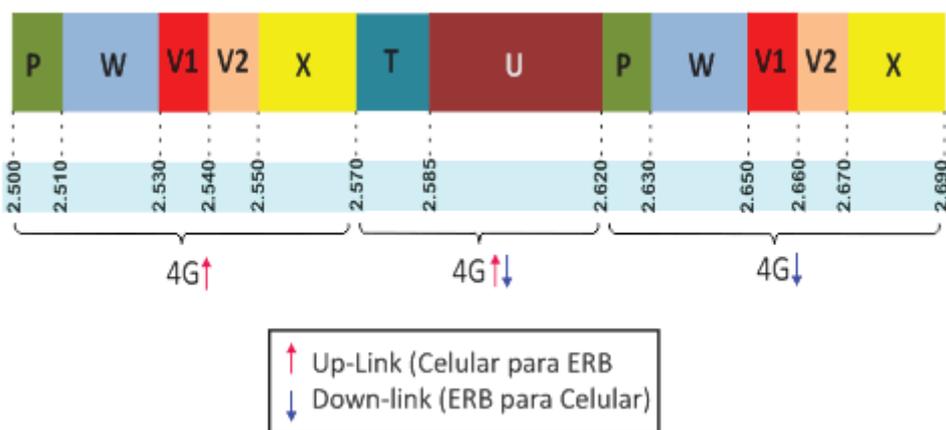
4.1 4G NO BRASIL

Com o advento de grandes eventos em nível internacional como as copa das confederações, copa do mundo e olimpíadas o governo Brasileiro se viu motivado a disponibilizar o serviço 4G no Brasil. Assim, em 2012 a Agência Nacional das Telecomunicações a ANATEL realizou uma licitação das frequências em 2600 MHz para a implantação de redes LTE. As empresas que adquiriram estas frequências foram: Vivo, Tim, Claro, Oi, Sky e Sunrise. (Teleco, 2013)

4.1.1 FREQUENCIAS 4G LICITADAS

A Anatel destinou para o 4G (Res. 544 de 11/08/2010) a faixa de frequência de 2.500 MHz a 2.690 MHz que era anteriormente destinada ao MMDS (*Multichannel Multipoint Distribution Service*).

Figura 72: Faixas de frequência 2.500 MHz a 2.690 MHz LTE no Brasil.



Fonte: Teleco, 2013

As faixas de frequências entre 2.500 - 2.570 MHz e 2.620 - 2.690 MHz (P, W, V e X) foram destinadas para operação FDD (*Frequency Division Duplex*). Já as subfaixas T e U para operação TDD (*Time Division Duplex*).

Tabela 7: Distribuição das faixas de frequências 4G entre as operadoras vencedoras da licitação.

Subfaixa (MHz)	Largura de Banda (MHz)	Transmissão da		Operadora
		Estação Móvel	ERB	
P	10+10	2.500-2.510	2.620-2.630	Claro (11 lotes); TIM (6 lotes); Oi (11 lotes)
W	20+20	2.510-2.530	2.630-2.650	Claro
V1	10+10	2.530-2.540	2.650-2.660	TIM
V2	10+10	2.540-2.550	2.660-2.670	Oi
X	20+20	2.550-2.570	2.670-2.690	Vivo
T	15	2.570-2.585		-
U	35	2.585-2.620		Sky e Sunrise (12 lotes cada)

Fonte: Teleco, 2013

4.1.2 PREMISSAS E OBJETIVOS DA LICITAÇÃO DO 4G.

Com a licitação da rede 4G a ANATEL apresentou para as operadoras interessadas às seguintes premissas.

- Serviços de telecomunicações de voz e de dado sem todos os municípios brasileiros, inclusive em suas áreas rurais (Decreto nº 7.512/2011 – PGMU III);

- massificação das conexões de dados sem fio, com tecnologias que permitam maiores taxas de transmissão de download e de upload;

- atendimento imediato dos municípios designados como Sede ou Subsede da Copa das Confederações de Futebol de 2013 e da Copa do Mundo de 2014;

- compromissos de abrangência que priorizam maiores obrigações de construção de infraestrutura de rede;

- incentivo à competição e concorrência na exploração dos serviços com a participação de agentes de pequeno, médio ou grande porte;

Haverá ao menos uma prestadora em 2,6 GHz.

Nos municípios as ofertas de serviços em condições tecnológicas equivalentes ao 3G.

Com 2,6 GHz ou oferta de tecnologia equivalente ou superior ao 3G → 24% dos municípios brasileiros, abaixo de 30 mil habitantes ainda não atendidos com banda larga móvel, da seguinte forma:

- Dez/2017 - Pelo menos 30 % dos municípios;
- Dez/2018 - Pelo menos 60% dos municípios;
- Dez/2019 - 100% dos municípios previstos na meta.

Compromissos de abrangência em 2,6 GHz vão permitir a oferta de 450 MHz: Construção e disponibilização de infraestrutura, em regime de exploração industrial, da seguinte forma:

- Mar/2014 - Pelo menos 30 % dos municípios;
- Set/2014 - Pelo menos 60% dos municípios;
- Set/2015 - 100% dos municípios.

O fornecimento da infraestrutura será dividido pelos vencedores das faixas. (ANATEL 2012).

4.1.3 CRONOGRAMA DE EXECUÇÃO

- Abr/2013 - Todas as sedes da Copa das Confederações 2013
- Dez/2013 - Todas as Sedes e Subsedes da Copa do Mundo 2014
- Mai/2014 - Todas as Capitais e municípios com mais de 500 mil habitantes.
- Dez/2015 - Todos os municípios com mais de 200 mil habitantes.
- Dez/2016 - Todos os municípios com mais de 100 mil habitantes.
- Dez/2017 - Todos os municípios entre 30 e 100 mil habitantes.
(ANATEL, 2012)

4.2 IMPLANTAÇÃO DO SERVIÇO 4G EM FLORIANÓPOLIS

Conforme citado anteriormente, no momento da aquisição da faixa de frequência do LTE, uma das premissas foi à priorização da implantação do serviço 4G em todas as sedes e subsedes da copa do mundo.

E dentre as subsedes selecionadas pelas FIFA (*Fédération Internationale de Football Association*) Florianópolis ficou entre estas.

Com esta obrigação contratual a VIVO-Telefonica iniciou implantação da rede 4G.

4.2.1 PLANEJAMENTO DA REDE LTE

Após obtido a licença da operação do 4G o próximo passo é o processo de planejamento de rede que é realizado com o objetivo de se obter a maior cobertura de atuação com a menor quantidade de equipamento possível, e ao mesmo tempo prover a capacidade de rede necessária para se atender a demanda de tráfego dos usuários atendidos.

Para que estes objetivos sejam alcançados, existem estágios típicos a serem realizados, que incluem a definição dos parâmetros de projeto (plano inicial e detalhado) e otimização.

O primeiro estágio do planejamento consiste em se obter informações tais como a cobertura desejada, a quantidade de usuários e sua respectiva distribuição na região de cobertura, estimativas de tráfego por usuário, serviços a serem oferecidos, a qualidade de serviço requerida (QoS - Quality of Service), a capacidade necessária, características de possíveis equipamentos e funcionalidades que podem ser utilizadas.

O resultado final deve ser a mínima densidade de estações rádio base a ser instalada, para atender aos objetivos do projeto. Nesse estágio foi utilizado uma simulação para estimar a cobertura e capacidade requerida para os usuários do sistema.

O planejamento detalhado pode ser dividido em processos que incluem:

- Ajuste do Modelo de Propagação (Model Tuning) - Processo para calibração do modelo de propagação teórico utilizado. Essa calibração geralmente é realizada através da importação nas ferramentas de predições de arquivos obtidos em medições de campo específicas;

- Definição dos Locais de Instalação (Site Selection) - A seleção de locais para instalação dos equipamentos é um grande desafio. Esse processo envolve a identificação dos candidatos que podem atender às necessidades de projeto, tais como: KPIs (Key Performance Indicator), Cobertura e Capacidade;

Dimensionamento - O objetivo final desta etapa é o dimensionamento do equipamento (células e eNodeBs) para atender a demanda de cobertura e capacidade da região a ser atendida;

- Parametrização - Os parâmetros do sistema precisam ser identificados e configurados para o melhor desempenho da rede;

O processo de otimização pode ser dividido em pré-lançamento e pós-lançamento.

Devido à carga que o sistema passará a receber após o lançamento comercial da rede, é necessário o acompanhamento dos indicadores de capacidade, cobertura, interferência, entre outros, alterando-se os parâmetros associados para que o sistema fique adequado às necessidades do momento.

4.2.2 LINK BUDGET

O Link Budget é uma das etapas realizadas no Planejamento Celular. Com o Link Budget é calculada a máxima perda de propagação permitida para que os usuários alocados nas bordas das células tenham condições de utilizar o sistema.

Através do Link Budget podem-se determinar a área de cobertura e raio da célula, permitindo estimar a quantidade de estações rádio base necessárias para cobrir a região onde se pretende oferecer o serviço.

Vale ressaltar que as características do ambiente (urbano denso, urbano, suburbano, etc.) no qual a rede será instalada, influenciam o resultado do LinkBudget, devido às múltiplas reflexões que o sinal propagado irá sofrer.

O Link Budget também varia de acordo com o objetivo de cobertura desejado, seja ela indoor, indoor ou outdoor, pois para cada uma destas, as perdas de propagação do sinal são diferentes.

Cálculos independentes para o uplink e para o downlink são realizados, dada a distinção dos parâmetros em cada sentido de transmissão.

O sistema celular é raramente limitado pelo downlink, pois, a potência transmitida pela estação rádio base é maior que a potência que o móvel é capaz de transmitir.

A potência de transmissão, o ganho das antenas e as perdas do sistema são alguns dos parâmetros que devem ser levados em consideração no cálculo do Link Budget.

A equação básica para o cálculo do Link Budget em dB é:

$$L = P_{tx} + G_{tx} - L_{tx} - SNR_{Requerida} - S_{rx} + G_{rx} - L_{rx} + G_{dv} - M$$

Equação 1

- L - Máxima Perda de Downlink / Uplink;
- Ptx - Potência de Transmissão [dBm];
- Gtx - Ganho da Antena Transmissora [dBi];
- Ltx - Perdas na Transmissão [dB]
- SNRR_e - Relação Sinal Ruído Requerida [dB];
- Srx - Sensibilidade Requerida na Recepção [dB]
- Grx - Ganho da Antena Receptora [dBi];
- Lrx - Perdas na Recepção [dB];
- Gdv - Ganho de Diversidade [dBi];
- M - Margem de Desvanecimento [dB].

Margem de Desvanecimento ou *Fade Margin* é a margem a ser considerada no Link Budget a fim de garantir que o terminal móvel consiga operar na borda das células, onde a relação SINR (Sinal Ruído + Interferência) é baixa. Devido aos efeitos do multipercurso presentes nos sistemas celulares esta garantia, ou Margem de Desvanecimento deve ser considerada.

Uma boa referência para ser adotada como margem de desvanecimento, é o desvanecimento cujo canal de rádio segue a distribuição de Rayleigh, onde para áreas urbanas o valor adotado deve ser entre 4 dB e 6 dB.

Uma das formas adotadas para minimizar os efeitos de Fading é a técnica da diversidade, que atua fornecendo ao receptor réplicas do mesmo sinal transmitido, que chegam através de caminhos de propagação independentes.

Neste trabalho assumimos como sendo de 3 dB o Ganho de Diversidade no Link

4.2.2.1 BUDGET DE UPLINK

O SNR vai depender da modulação e da taxa de código adotada, ou seja, está diretamente relacionado à taxa de transferência de dados e ao número de Resource Blocks alocados.

Conforme mencionado anteriormente, faz-se necessário calcular o Link Budget para o downlink e para o uplink, e a máxima perda encontrada (menor valor

de L na comparação entre downlink e uplink) será adotada na determinação do raio da célula.

4.2.2.2 LINK BUDGET DE DOWNLINK

Na tabela 9 encontramos os parâmetros necessários e os valores adotados para o cálculo do Link Budget de Downlink, com exceção da sensibilidade requerida na recepção.

A sensibilidade requerida na recepção segundo a Série 36101 da 3GPP está apresentada na tabela 9 e se referem apenas para a modulação QPSK, sendo que os valores variam de acordo com a largura de banda adotada e também com a faixa de frequência de operação do sistema.

Tabela 8: Valores dos Parâmetros para o Link Budget de Downlink.

Potência de Transmissão	60W; 48 dBm
Ganho da Antena Transmissora	18 dBi
Perdas na Transmissão	3 dB
SNR	0 dB
Ganho da Antena Receptora	0 dBi
Perdas na Recepção	0 dB
Ganho de Diversidade	0 dB
Margem de Desvanecimento	4 dB

Fonte: (PUC, 2012)

O valor da Sensibilidade Requerida na Recepção adotado no cálculo do Link Budget de Downlink foi de -92 dBm (a maior sensibilidade requerida, para 20 MHz de largura de banda). Este cálculo deve ser realizado para o pior caso, pois se operarmos com larguras de bandas diferentes, perde-se cobertura, impactando diretamente na configuração espacial das eNodeBs planejadas para cobrir a área original, podendo até mesmo faltarem eNodeBs para atender os objetivos de cobertura e capacidade.

Tabela 9: Sensibilidade Requerida na Recepção para a modulação QPSK

Sensibilidade Requerida Recepção - 5MHz	-98dBm
Sensibilidade Requerida Recepção - 10MHz	-95dBm
Sensibilidade Requerida Recepção - 15MHz	-93,2 dBm
Sensibilidade Requerida Recepção - 20MHz	-92dBm

Fonte: (PUC, 2012)

Utilizando a equação 1 e a tabela 9, que apresenta os valores adotados no Link Budget de Downlink, podemos determinar o valor de L em dB:

$$L_{DL} = 48dBm + 18dBi - 3dB - 0 - (-92dBm) + 0 - 0 + 0 - 4$$

$$L_{DL} = 151dB$$

Equação 2

4.2.2.3 LINK BUDGET DE UPLINK

Na tabela 10 encontramos os parâmetros necessários e os valores adotados para o cálculo do Link Budget de Uplink.

Tabela 10: Valores dos Parâmetros para o Link Budget de Uplink.

Potência de Transmissão	23 dBm
Ganho da Antena Transmissora	0 dBi
Perdas na Transmissão	0 dB
SNR	0dB
Sensibilidade Requerida Recepção	-101,5 dBm
Ganho da Antena Receptora	18 dBi
Perdas na Recepção	3 dB
Ganho de Diversidade	3 dB
Margem de Desvanecimento	4 dB

Fonte: (PUC, 2012)

A potência de transmissão adotada para o móvel se refere à máxima potência permitida segundo a Série 36101 da 3GPP, com tolerância de 2 dB para mais ou para menos.

O valor adotado para a Sensibilidade Requerida na Recepção está de acordo com a Série 36104 da 3GPP, sendo que os valores para as faixas de frequência de

5 MHz, 10 MHz, 15 MHz e 20 MHz são de -101,5 dBm para as modulações QPSK, 16 QAM e 64 QAM.

Utilizando a equação 2 e a tabela 10, que apresenta os valores adotados no Link Budget de Uplink, determinamos o valor de L em dB.

$$L_{UL} = 23dBm + 0 - 0 - 0 - (-101,5dBm) + 18dBi - 3dB + 3dB - 4dB$$
$$L_{UL} = 138,5dB$$

Equação 3

Comparando os resultados das equações 2 e 3, concluímos que a máxima perda de propagação permitida ocorre no Link Budget de Uplink, conforme esperado, sendo este o valor que deverá ser adotado no cálculo do raio teórico da célula.

4.2.2.4 CÁLCULO DO RAIOTEÓRICO

No dimensionamento de sistemas de comunicações sem fio, necessitamos uma adequada escolha de modelos de propagação. De modo geral, os modelos de propagação provêm estimativas das perdas de propagação considerando, distância entre transmissor e receptor, fatores de terreno, altura das antenas transmissoras e receptoras e as frequências utilizadas.

O modelo de propagação escolhido para ser utilizado neste trabalho é o modelo SUI (Stanford University Interin), que é uma extensão do trabalho realizado anteriormente por Erceg et al, para determinar a cobertura da rede.

Este modelo foi escolhido, pois é indicado pelo 3GPP para o planejamento de redes WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*), padrão IEEE 802.16, que utilizam as faixas de frequência de 2.5 GHz e 3.5 GHz, cobrindo a necessidade que teremos em nosso dimensionamento LTE.

O modelo SUI distingue diferentes categorias para diferentes terrenos, que podem ser classificados como sendo do tipo:

- Terreno Tipo A – Terreno Montanhoso com Alta ou Moderada Densidade de Árvores;

- Terreno Tipo B – Terreno Montanhoso com Baixa Densidade de Árvores ou Planície com Alta ou Moderada Densidade de Árvores;
- Terreno Tipo C – Planície de Baixa Densidade de Árvores.

Para nossa análise, escolhamos a categoria A, pois com esta categoria estaremos realizando o dimensionamento para o pior caso, resultando em uma quantidade maior de estações rádio base.

As perdas de propagação (Path Loss, Path Attenuation) pelo modelo (em dB) são descritas da seguinte forma:

$$L = A + 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_f + X_h + s$$

Equação 4

Que é válida para $d > d_0$, visto que $d_0=100\text{m}$ representa a distância de referência e A é a perda no espaço livre na distância d_0 . O termo X_f é a correção da frequência, X_h é a correção da altura da antena receptora, s corresponde ao desvanecimento dado pelo tipo de terreno e γ é o expoente de perda do caminho em função da altura da estação rádio base. O termo λ na equação 4 representa o comprimento de onda associado à frequência de operação do sistema.

$$A = 20 \log\left(\frac{4\pi d_0}{\lambda}\right)$$

Equação 5

$$X_f = 6 \log\left(\frac{f}{2000}\right)$$

Equação 6

Onde f é a frequência em MHz.

$$X_h = -10.8 \log\left(\frac{h}{2}\right)$$

Equação 7

Para terrenos do Tipo A e Tipo B e,

$$X_h = -20 \log\left(\frac{h}{2}\right)$$

Equação 8

Para terrenos do Tipo C, onde h é a altura da antena receptora, onde $2\text{m} \leq h \leq 10\text{ m}$.

$$\gamma = a - b.h_b + \frac{c}{h_b}$$

Equação 9

Onde as constantes a , b e c foram determinadas empiricamente, e podem ser obtidas na tabela 12. A altura da antena da estação rádio base, h_b deve ter valores entre 10 e 80 metros.

Tabela 11: Valores dos Parâmetros do Modelo SUI.

Parâmetro	Terreno Tipo A	Terreno Tipo B	Terreno Tipo C
a	4.6	4.0	3.6
b (1/m)	0.0075	0.0065	0.0050
c (m)	12.6	17.1	20.0

Fonte: (PUC, 2012)

Neste trabalho adotamos a seguinte configuração:

- $f = 2.6\text{GHz}$
- $h = 2\text{m}$
- $h_m b = 30$
- $s = 4\text{dB}$

Obtendo os seguintes resultados para cada parâmetro:

Perda no Espaço Livre

$$A = 20 \cdot \log\left(\frac{4\pi \cdot 100}{3 \cdot 10^8 / 2600 \cdot 10^6}\right)$$

$$A = 80,74\text{dB}$$

Equação 10

Correção da Frequência

$$X_f = 6 \cdot \log\left(\frac{2600 \cdot 10^6}{2000}\right)$$

$$X_f = 0,6836dB$$

Equação 11

Correção da Altura da Antena Receptora

$$X_h = -10,8 \cdot \log\left(\frac{2}{2}\right)$$

$$X_h = 0dB$$

Equação 12

Perda do Caminho em Função da Altura da Antena Transmissora

$$\gamma = 4,6 - 0,0075 \cdot 30 + \frac{12,6}{30}$$

$$\gamma = 4,79dB$$

Equação 13

Substituindo valores na equação 14, temos:

$$L = 80,74dB + 10 \cdot 4,79 \cdot \log\left(\frac{d}{100}\right) + 0,6836dB + 0 + 4dB$$

Equação 14

Com os valores de L calculados nas seções 4.2.4.1 (Link Budget de Downlink) e 4.2.4.2 (Link Budget de Uplink), conforme o resultado demonstrado na tabela 13 realizou o balanceamento do canal utilizando a equação 25 e a maior perda de percurso (L) permitida, 138,5 dB, para a determinação do raio máximo das células.

Tabela 12: Valores calculados no Link Budget.

Link Budget	Perda de Percurso (L)
Downlink	151 dB
Uplink	138,5 dB

Fonte: (PUC, 2012)

Substituindo o resultado da máxima perda de percurso permitida na equação 25, obtemos a máxima distância de atuação de uma célula (d):

$$138,5dB = 80,74dB + 10.4,79 \cdot \log\left(\frac{d}{100}\right) + 0,6836dB + 0 + 4dB$$

$$R = d \cong 1,3Km$$

Equação 15

Existem ferramentas de predição que permitem obter com maior precisão o resultado do cálculo realizado, tornando possível a análise visual e um dimensionamento mais preciso. Tais ferramentas de predição consideram outros fatores, como edificação e relevo no cálculo de cobertura da estação rádio base do sistema.

4.2.2.5 CÁLCULO DO MÁXIMO THROUGHPUT TEÓRICO

O throughput oferecido na camada física de uma estação rádio base LTE, pode ser calculado levando-se em consideração o tempo do símbolo, a modulação a ser utilizada na interface aérea (QPSK, 16 QAM, 64 QAM) e o número de subportadoras disponíveis, que está diretamente relacionada à banda adotada no sistema (como visto, a banda varia de 1.4 até 20 MHz), conforme equação 27.

$$\text{Throughput} = \text{Tempo de Símbolo} \times \text{Bits} \times \text{Subportadoras}$$

Equação 16

O tempo de transmissão de um símbolo é de 71,367 μ s.

Vamos calcular o throughput na camada física para as bandas de 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz e 20 MHz. Desta forma, a quantidade de subportadoras capazes de transportar dados é apresentada na tabela 13:

Tabela 13: Largura de Banda e Subportadoras LTE.

Largura de Banda	Subportadoras
5 MHz	300
10 MHz	600
15 MHz	900
20 MHz	1200

Fonte: (PUC, 2012)

Cada modulação adotada no sistema é capaz de transportar uma quantidade de bits por símbolo, sendo que a tabela 14 traz a capacidade de cada uma.

Tabela 14: Capacidade de bits por símbolo das modulações utilizadas no downlink.

Modulação	Bits por Símbolo
QPSK	2
16 QAM	4
64 QAM	6

Fonte: (PUC, 2012)

Utilizando as informações ilustradas nas tabelas 13 e 14, e fazendo-se uso da equação 27, somos capazes de determinar o throughput para cada modulação e largura de banda disponível. Como exemplo, vamos calcular o throughput para a modulação 64 QAM.

5 MHz e 64 QAM

$$\textit{Throughput} = 1/0.000071367 \times 6 \times 300$$

$$\textit{Throughput} = 25,2\textit{Mbps}$$

Equação 17

10 MHz e 64 QAM

$$\textit{Throughput} = 1/0.000071367 \times 6 \times 600$$

$$\textit{Throughput} = 50,4\textit{Mbps}$$

Equação 18

15 MHz e 64 QAM

$$\text{Throughput} = 1/0.000071367 \times 6 \times 900$$

$$\text{Throughput} = 75,7 \text{ Mbps}$$

Equação 19

20 MHz e 64 QAM

$$\text{Throughput} = 1/0.000071367 \times 6 \times 1200$$

$$\text{Throughput} = 100,9 \text{ Mbps}$$

Equação 20

Nas tabelas 15, 16, 17 e 18, constam os valores do throughput calculados, fazendo-se uso da equação 27 para as bandas de 5 MHz até 20 MHz com as modulações QPSK, 16 QAM e 64 QAM. A figura 73 ilustra estes resultados.

Tabela 15: Throughput para largura de banda de 5 MHz.

Largura de Banda e Modulação	Throughput (Mbps)
5 MHz – QPSK	8,4
5 MHz – 16 QAM	16,8
5 MHz – 64 QAM	25,2

Fonte: (PUC, 2012)

Tabela 16: Throughput para largura de banda de 10 MHz.

Largura de Banda e Modulação	Throughput (Mbps)
10 MHz – QPSK	16,8
10 MHz – 16 QAM	33,6
10 MHz – 64 QAM	50,4

Fonte: (PUC, 2012)

Tabela 17: Throughput para largura de banda de 15 MHz.

Largura de Banda e Modulação	Throughput (Mbps)
15 MHz – QPSK	25,2
15 MHz – 16 QAM	50,4
15 MHz – 64 QAM	75,7

Fonte: (PUC, 2012)

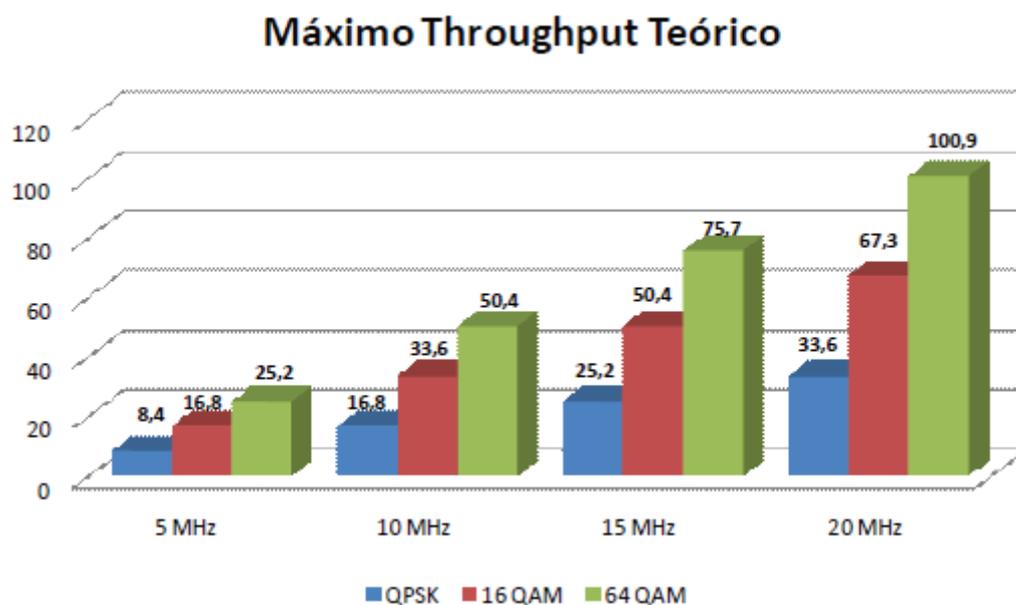
Tabela 18: Throughput para largura de banda de 20 MHz.

Largura de Banda e Modulação	Throughput (Mbps)
20 MHz – QPSK	33,6
20 MHz – 16 QAM	67,3
20 MHz – 64 QAM	100,9

Fonte: (PUC, 2012)

Quando uma configuração MIMO 2x2 é utilizada, o throughput pode atingir valores de até 173 Mbps, e quando for utilizada a configuração MIMO 4x4, podemos chegar a taxas de transferência de até 326 Mbps.

Figura 73: Throughput na camada física do LTE.



Fonte: (PUC, 2012)

4.2.2.6 CÁLCULO DA MÁXIMA EFICIÊNCIA ESPECTRAL

A eficiência espectral para cada modulação pode ser calculada através da equação 32, e os resultados são apresentados na figura 74.

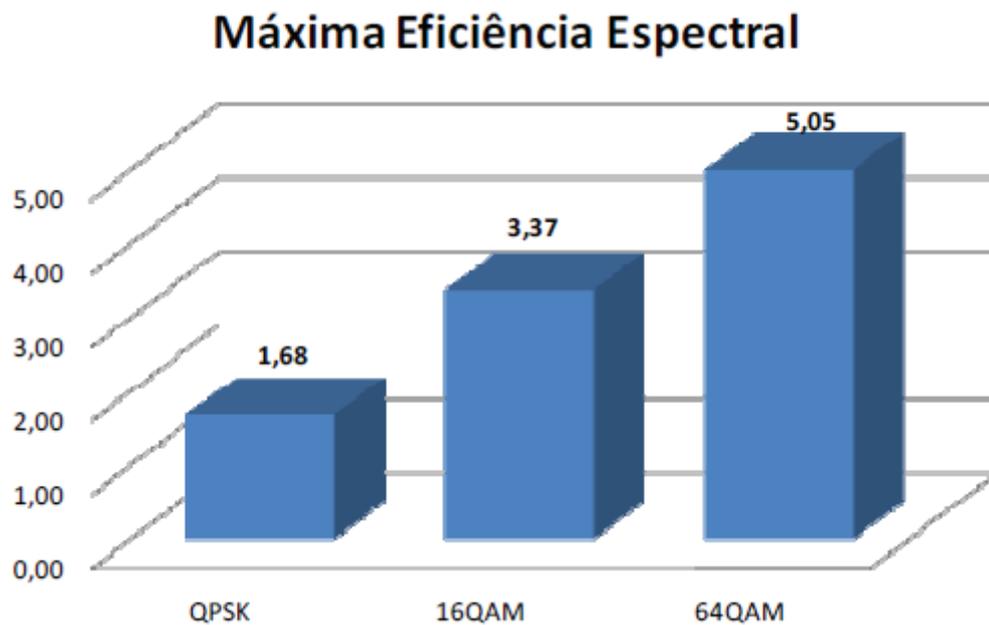
$$\text{Ef. Espectral} = \text{Throughput} / \text{LarguraBanda}$$

Equação 21

Onde:

- Eficiência Espectral [bits/seg./hertz];
- Throughput [Mbps];
- Largura de Banda [MHz]

Figura 74: Eficiência Espectral do LTE.



Fonte: (PUC, 2012)

4.2.2.7 CÁLCULO DA CAPACIDADE DO CANAL E DA RELAÇÃO SINAL RUÍDO.

O tipo de modulação utilizado em sistemas de comunicações móveis tem influência na área de serviço de um sistema. Cada tipo de modulação tem um requisito mínimo de relação entre os níveis de sinal, ruído e interferência (SINR).

Em uma célula, esta relação varia de um ponto para o outro, podendo fazer com que em algumas áreas o requisito mínimo não seja atendido para os tipos de modulação disponíveis. Se isto ocorrer, a qualidade oferecida não será suficiente para que os serviços requisitados sejam atendidos.

Um importante ponto a ser destacado é que o ruído tratado é o AWGN (Additive White Gaussian Noise), um ruído branco adicionado ao sinal, assim utilizaremos o termo SNR (Sinal Ruído) em vez de SINR.

As larguras dos canais utilizados influem diretamente na capacidade de um sistema, conforme o teorema de Shannon-Hartley, que afirma que a capacidade máxima, em bits por segundo, de um canal sujeito ao ruído pode ser calculada por:

$$C = BW \cdot \log_2(1 + SNR)$$

Equação 22

Onde:

- C - Capacidade do Canal [bps];
- BW - É a largura de faixa do canal utilizado [Hz];
- SNR - É a relação Sinal/Ruído [dB]

Teoricamente a taxa máxima de comunicação R que pode ser usada neste tipo de canal é menor ou igual à capacidade C do canal dependendo do esquema de modulação/codificação utilizado.

A taxa máxima de comunicação dependerá, portanto, da largura de faixa do canal alocado e das condições de propagação do canal de RF (da relação Sinal/Ruído). A interferência sentida irá influenciar no tipo de modulação que pode ser utilizada, causando efeito diretamente na capacidade do canal.

Na seção 4.2.4.4, calculamos as capacidades dos canais na camada física para larguras de faixa que variaram de 5 MHz até 20 MHz, para as modulações QPSK, 16 QAM e 64 QAM, no entanto, não levamos em consideração as taxas de códigos. Nesta seção iremos determinar a capacidade dos canais e também o SNR requerido para que cada modulação seja utilizada.

A tabela 20 mostra as taxas de códigos que serão consideradas para o cálculo da capacidade do canal desta seção.

Tabela 19: Taxa de Código de Modulação.

Modulação	Taxa de Códigos
QPSK	1/2
QPSK	3/4
16 QAM	1/2
16 QAM	3/4
64 QAM	1/2
64 QAM	2/3
64 QAM	3/4
64 QAM	5/6

Fonte: (PUC, 2012)

A taxa de código indica a proporção dos bits de cada modulação que é transmitida como informação em cada símbolo. Como exemplo, para a modulação 64 QAM, que é capaz de transmitir 6 bits por símbolo, quando uma taxa de modulação de 5/6 é utilizada, apenas 5 bits serão transmitidos como informação.

Levando em consideração os valores das taxas de códigos de cada modulação que compõem a tabela 19, e fazendo uso da equação 34 (adaptação da equação 27, com inclusão da taxa de códigos), os valores de throughput calculados na seção 4.2.4.4 podem ser determinados novamente.

$$\text{Throughput} = \text{Tempo de Símbolo} \times \text{Bits} \times \text{Taxa} \times \text{Subportadoras}$$

Equação 23

Nas tabelas 20, 21, 22 e 23, constam os valores do throughput calculados, fazendo-se uso da equação 34 para as bandas de 5 MHz até 20MHz com as modulações QPSK, 16 QAM e 64 QAM e respectivas taxas de códigos.

Tabela 20: Throughput para largura de banda de 5 MHz, adotando taxa de código.

Modulação	Taxa de Códigos	Throughput (Mbps)
QPSK	1/2	4,2
QPSK	3/4	6,31
16 QAM	1/2	8,41
16 QAM	3/4	12,61
64 QAM	1/2	12,61
64 QAM	2/3	16,81
64 QAM	3/4	18,92
64 QAM	5/6	21,02

Fonte: (PUC, 2012)

Tabela 21: Throughput para largura de banda de 10 MHz, adotando taxa de código.

Modulação	Taxa de Códigos	Throughput (Mbps)
QPSK	1/2	8,41
QPSK	3/4	12,61
16 QAM	1/2	16,81
16 QAM	3/4	25,22
64 QAM	1/2	25,22
64 QAM	2/3	33,63
64 QAM	3/4	37,83
64 QAM	5/6	42,04

Fonte: (PUC, 2012)

Tabela 22: Throughput para largura de banda de 15 MHz, adotando taxa de código.

Modulação	Taxa de Códigos	Throughput (Mbps)
QPSK	1/2	12,61
QPSK	3/4	18,92
16 QAM	1/2	25,22
16 QAM	3/4	37,83
64 QAM	1/2	37,83
64 QAM	2/3	50,44
64 QAM	3/4	56,75
64 QAM	5/6	63,05

Fonte: (PUC, 2012)

Tabela 23: Throughput para largura de banda de 20 MHz, adotando taxa de código.

Modulação	Taxa de Códigos	Throughput (Mbps)
QPSK	1/2	16,81
QPSK	3/4	25,22
16 QAM	1/2	33,63
16 QAM	3/4	50,44
64 QAM	1/2	50,44
64 QAM	2/3	67,26
64 QAM	3/4	75,67
64 QAM	5/6	84,07

Fonte: (PUC, 2012)

Através da equação 23, e assumindo que o throughput calculado nas tabelas 21, 22, 23 e 24 representam a capacidade máxima do canal para cada largura de faixa do canal, podemos encontrar o SNR requerido para cada modulação e taxa de código.

A equação 24 traz o resultado de um exemplo do cálculo do SNR, onde foi considerada a largura de banda de 20 MHz e o throughput de 84,07 Mbps.

$$C = BW \cdot \log_2(1 + SNR)$$

$$84,07 \text{ Mbps} = 20 \text{ MHz} \cdot \log_2(1 + SNR)$$

$$SNR = 12,41 \text{ dB}$$

Equação 24

A tabela 25 traz a informação do SNR requerido para cada modulação e taxa de código.

Tabela 24: SNR requerido para respectivas modulações e taxas de códigos.

Modulação	Taxa de Códigos	Throughput (Mbps)
QPSK	1/2	-1,2
QPSK	3/4	1,45
16 QAM	1/2	3,44
16 QAM	3/4	6,76
64 QAM	1/2	6,76
64 QAM	2/3	9,68
64 QAM	3/4	11,06
64 QAM	5/6	12,41

Fonte: (PUC, 2012)

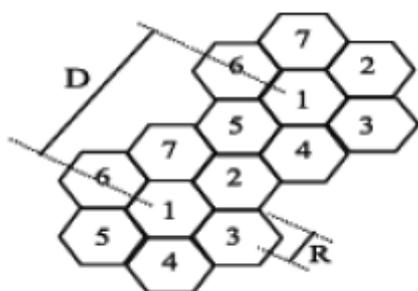
Optou-se pela determinação do SNR requerido para cada modulação e respectiva taxa de código através de cálculos considerando a equação de Shannon-Hartley, pois não foi encontrado na literatura e nas especificações da 3GPP, referências para cálculos dos níveis de projeto.

4.2.2.8 CÁLCULO DA INTERFERÊNCIA CO-CANAL

Sistemas celulares se baseiam no reuso de frequências para obter da rede uma maior capacidade e qualidade na cobertura. Um conjunto de estações rádio base vizinhos que utilizem todo espectro disponível formam um cluster.

Na figura 81 podemos observar dois clusters formados por um conjunto de 7 estações rádio base cada, onde D representa a distância de reuso e R o raio de cada célula.

Figura 75: Cluster



Fonte: (PUC, 2012)

Através dos valores de D e R, pode-se definir a razão de reuso q, como pode ser observado na equação 25.

$$q = \frac{D}{R}$$

Equação 25

Sendo “a” a área de uma célula hexagonal (omnidirecional) e “A” a área de um cluster hexagonal, temos:

$$a = 3\sqrt{3} \frac{R^2}{2}$$

Equação 26

$$A = \sqrt{3} \frac{D^2}{2}$$

Equação 27

Assumindo que N seja o número de estações rádio base (células hexagonais) que formam um cluster, podemos definir que:

$$N = \frac{A}{a} = \frac{D^2}{3R^2} = \frac{1}{3} \left(\frac{D}{R} \right)^2$$

$$(3N)^2 = \frac{D}{R}$$

Equação 28

Substituindo 25 em 28:

$$q^2 = \left(\frac{D}{R} \right)^2 = 3N$$

Equação 29

Fazendo uso da equação 30, pode-se calcular a razão de reuso q para diferentes formações de clusters, variando-se o reuso celular N . Na tabela 25 temos alguns exemplos.

Tabela 25: Fator de Reuso e Razão de Reuso Celular.

Fator de Reuso (N)	Razão de Reuso (q)
1	1,73205
3	3
4	3,4641
7	4,58258
9	5,19615

Fonte: (PUC, 2012)

A configuração celular, com reuso de frequências para grupos de células adjacentes, gera uma interferência dentro do sistema denominada de interferência co-canal.

Esta interferência co-canal pode ser determinada levando-se em consideração 6 células adjacentes (1º anel) a uma distância D , 12 células adjacentes (2º anel) a uma distância $2D$, ou ainda, 18 células adjacentes (3º anel) a uma distância $3D$ e assim sucessivamente, conforme ilustrado na figura 82.

A relação entre o sinal desejado e a interferência co-canal é dada por:

$$\frac{S}{I} = \frac{S}{\sum_{k=1}^6 I_{k1} + \sum_{k=2}^{12} I_{k2} + \sum_{k=3}^{18} I_{k3} + \dots}$$

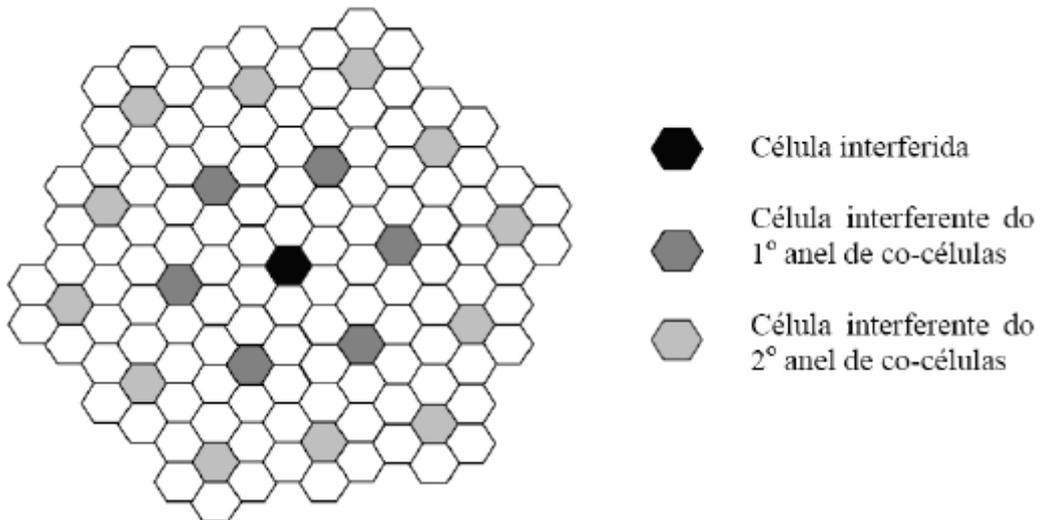
Equação 30

Onde:

- $S = C \times d^{-\gamma}$ - Intensidade do sinal desejado transmitido a uma distância d do transmissor;
- $I_{kn} = C \cdot D_{kn}^{-\gamma}$ - Intensidade do sinal interferente devido a células no n -ésimo anel, a uma distância $kn D$ do transmissor;
- γ - Fator de variação da perda de propagação com a distância;

- C - Constante que depende das características do transmissor e de parâmetros que influenciam a propagação tais como altura das antenas, frequência entre outros.

Figura 76: Interferência dos anéis adjacentes.



Fonte: (PUC, 2012)

Se pudéssemos considerar um móvel na borda da célula, assumimos assim que a distância d do transmissor seja aproximadamente igual ao raio celular, $d \cong R$ e para $D \gg R$ temos que $D_{kn} \cong nD$ e conseqüentemente:

$$\frac{S}{I} = \frac{Cd^{-\gamma}}{6CD^{-\gamma} + 12C(2D)^{-\gamma} + 18C(3D)^{-\gamma} + \dots}$$

$$\frac{S}{I} \cong \frac{1}{6\left(\frac{D}{R_c}\right)^{-\gamma} \cdot (1 + 2^{-\gamma} \cdot 2 + 3^{-\gamma} \cdot 3 + \dots)}$$

$$\frac{S}{I} \cong \frac{1}{6\left(\frac{D}{R_c}\right)^{-\gamma} \cdot \sum_{k=1}^{\infty} k^{1-\gamma}}$$

Equação 31

Através de uma aproximação que leva em consideração somente o primeiro anel interferente tem-se:

$$\frac{S}{I} \cong \frac{1}{6 \left(\frac{D}{R_c} \right)^{-\gamma}}$$

$$\frac{S}{I} = \frac{q^\gamma}{6}$$

Equação 32

Através da equação 43, observamos que a relação S/I (SIR) é maior quando adotamos um maior fator de reuso co-canal, maior valor para N.

Equação 33: Relação SIR considerando o primeiro anel interferente.

SIR (dB)	N=1	N=3	N=4	N=7	N=9
Terreno A	3,65746	15,09645	18,09185	23,91871	26,53542
Terreno B	2,655506	13,09254	15,82557	21,14205	23,52956
Terreno C	2,039225	11,85998	14,43163	19,43418	21,68072

Fonte: (PUC, 2012)

A tabela 27 traz a relação SIR calculada através da equação 43 para os casos onde o reuso N adotado varia de 1 a 9 para as três categorias de terreno observado no modelo de propagação de Erceg et al, lembrando que o fator de variação da perda de propagação com a distância, γ , pode ser calculado através da equação 20, onde a altura da antena transmissora seja $h_b = 30m$.

Considerando também os efeitos do segundo anel interferente temos:

$$\frac{S}{I} = \frac{1}{6 \left(\frac{D}{R_c} \right)^{-\gamma}} \cdot \frac{1}{(1 + 2^{1-\gamma})}$$

$$\frac{S}{I} = \frac{q^\gamma}{6} \cdot \frac{1}{(1 + 2^{1-\gamma})}$$

Equação 34

Tabela 1: Relação SIR considerando o primeiro e o segundo anel interferente

SIR (dB)	N=1	N=3	N=4	N=7	N=9
Terreno A	3,355338	14,79433	17,78973	23,61659	26,2333
Terreno B	2,255863	12,6929	15,42592	20,74241	23,12992
Terreno C	1,565349	11,3861	13,95775	18,96031	21,20684

Fonte: (PUC, 2012)

Observando os valores de SIR para os cenários onde levamos em consideração o primeiro anel interferente, tabela 27 e também o segundo anel interferente, tabela 28, concluímos que para o terreno do tipo A, que dotamos para a realização do dimensionamento de capacidade e cobertura, e com o fator de reuso $N = 1$, os usuários da borda estariam atendidos com as modulações QPSK $\frac{1}{2}$ e QPSK $\frac{3}{4}$, que segundo a tabela 25 requerem uma SNR mínima de -1,02 dB e 1,45 dB respectivamente para operar.

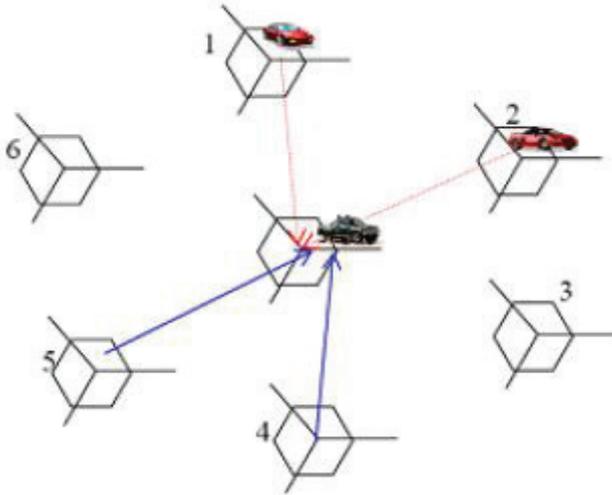
Se adotássemos no sistema um fator de reuso $N = 3$, com o auxílio das tabelas 25 e 28, podemos concluir que os usuários de borda estariam atendidos com todas as possibilidades de modulação do sistema, QPSK, 16 QAM e 64 QAM.

De acordo com a literatura e com o 3GPP, o sistema LTE poderá adotar um fator de reuso de frequências unitário, $N = 1$, desta forma, outras possibilidades podem ser levadas em consideração para que a relação SIR seja melhorada, tais como a redução da altura da antena transmissora ou ainda a setorização, que consiste na divisão das células em setores, sendo cada um destes setores iluminados por uma antena direcional independente que recebem subconjunto de frequências. Na prática a setorização tripla e sêxtupla são adotadas em sistemas celulares, sendo a setorização tripla a mais usual.

4.2.2.9 INTERFERÊNCIA CO-CANAL COM SETORIZAÇÃO TRIPLA.

A setorização tripla consiste na divisão celular em setores de 120° . Para facilitar a compreensão dos benefícios que a setorização pode trazer quanto à diminuição da interferência co-canal, analisando a figura 83 podemos observar que apenas as células 4 e 5 possuem setores voltados para a célula interferida que possuem o mesmo subconjunto de frequências.

Figura 77: Interferência com setorização tripla.



Fonte: (PUC, 2012)

Se considerarmos somente o primeiro anel interferente, a relação SIR será dada por:

$$\frac{S}{I} \cong \frac{1}{\sum_{k=1}^2 \left(\frac{D}{R_c} \right)^{-\gamma}}$$

$$\frac{S}{I} = \frac{q^\gamma}{2}$$

Equação 35

Para definirmos o ganho que a setorização tripla tem em relação a sistemas que não utilizam a setorização, podemos definir que:

$$G = \frac{SIR_{\text{célula setorizada}}}{SIR_{\text{célula sem setorização}}}$$

Equação 36

Substituindo as equações 34 e 36 em 37, temos:

$$G = \frac{(q^\gamma / 2)}{(q^\gamma / 6)}$$

$$G = 3$$

Equação 37

Aplicando o logaritmo na equação 38, temos que o ganho da setorização tripla em relação a sistemas sem setorização é:

$$G_{dB} = 10 \log_{10}(3)$$

$$G_{dB} = 4,77dB$$

Equação 38

Recalculando a relação SIR considerando a setorização tripla, e altura da antena transmissora $h_b = 30m$, chegamos aos valores da tabela 29.

Tabela 26: Relação SIR considerando o primeiro anel interferente com setorização tripla.

SIR (dB)	N=1	N=3	N=4	N=7	N=9
Terreno A	8,428672	19,86766	22,86306	28,68993	31,30664
Terreno B	7,426719	17,86375	20,59678	25,91326	28,30077
Terreno C	6,810438	16,63119	19,20284	24,2054	26,45193

Fonte: (PUC, 2012)

Considerando o fator de reuso $N = 1$ e o terreno do tipo A, temos uma SIR de aproximadamente 8,43 dB o que seria suficiente para que os usuários na borda das células estivessem atendidos pelas modulações QPSK $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$, 16 QAM $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$ e pela modulação 64 QAM $\frac{1}{2}$, que segundo a tabela 25 requerem uma SNR mínima de -1,02 dB, 1,45 dB, 3,44 dB, 6,76 dB e 6,76 dB respectivamente para operar.

4.2.2.10 CÁLCULO DO RAIOS EM FUNÇÃO DA MODULAÇÃO E SNR

Na seção 4.2.4.3 calculamos o raio máximo teórico da célula adotando valores nulos para a SNR requerida no sistema. O valor encontrado naquela seção é importante quando desejamos determinar a quantidade de estações rádio base necessárias para cobrir a área na qual se pretende oferecer o serviço celular, mas não deve ser levada em consideração na determinação do número de estações necessárias para um determinado tipo de serviço, como por exemplo, a taxa de transferência (bps).

Nesta seção iremos repetir o que foi realizado na seção 4.2.4.3 levando-se em consideração os valores de SNR Requeridos para cada taxa de modulação, ou ainda, para cada MCS (Modulation and Coding Schemes) a fim de determinar os raios máximos de modulação e respectivo throughput.

Fazendo uso de ferramentas de predição também conseguimos determinar a área de atuação de cada modulação, levando-se em consideração outros fatores não considerados nos cálculos, tais como o relevo.

No LTE, o principal indicador relacionado à capacidade de transferência de dados é a distribuição do SNR ao longo da célula.

Conforme verificado anteriormente, a máxima perda permitida no sistema (L) ocorre no uplink, sendo assim, nesta seção realizaremos os cálculos somente para o Link Budget de Uplink, substituindo os valores de SNR requeridos para cada MCS.

A tabela 27 abaixo repete o que está ilustrado na tabela 25.

Tabela 27: SNR requerido para respectivas modulações e taxas de códigos

Modulação	Taxa de Códigos	Throughput (Mbps)
QPSK	1/2	-1,2
QPSK	3/4	1,45
16 QAM	1/2	3,44
16 QAM	3/4	6,76
64 QAM	1/2	6,76
64 QAM	2/3	9,68
64 QAM	3/4	11,06
64 QAM	5/6	12,41

Fonte: (PUC, 2012)

A tabela 31 traz as mesmas informações da tabela 11, com a diferença que o SNR adotado não será nulo e receberá valores variáveis de acordo com cada MCS representado na tabela 28.

Tabela 28: Valores dos Parâmetros para o Link Budget de Uplink.

Potência de Transmissão	23 dBm
Ganho da Antena Transmissora	0 dBi
Perdas na Transmissão	0 dB
SNR	Variável
Sensibilidade Requerida Recepção	-101,5 dBm
Ganho da Antena Receptora	18 dBi
Perdas na Recepção	3 dB
Ganho de Diversidade	3 dB
Margem de Desvanecimento	4 dB

Fonte: (PUC, 2012)

Com auxílio das tabelas 30, 31 e a equação 49, somos capazes de determinar os valores de L para cada MCS.

Como exemplo, calculamos para a modulação 64 QAM e taxa de código 5/6, a qual requer uma SNR de 12,08 dB.

$$L = P_{tx} + G_{tx} - L_{tx} - SNR_{Re\ que\ rida} - S_{rx} + G_{rx} - L_{rx} + G_{dv} - M$$

$$L_{UL} = 23dBm + 0 - 0 - 12,41dB - (-101,5dBm) + 18dBi - 3dB + 3dB - 4dB$$

$$L_{UL} = 126,09dB$$

Equação 39

Substituindo o resultado da equação 49 em 50, chegamos ao máximo raio de atuação da modulação 64 QAM - 5/6 (equação 50).

$$L = 80,74dB + 10,4,79 \cdot \log\left(\frac{d}{100}\right) + 0,6836dB + 0 + 4dB$$

$$126,09dB = 80,74dB + 10,4,79 \cdot \log\left(\frac{d}{100}\right) + 0,6836dB + 0 + 4dB$$

$$R = d \cong 705m$$

Equação 40

Na tabela 32 constam os valores dos raios calculados para as demais modulações e respectivas taxas de códigos, da mesma forma como foi demonstrado no exemplo acima.

Tabela 29: Raio de atuação das Modulações e respectivas taxas de códigos (MCS).

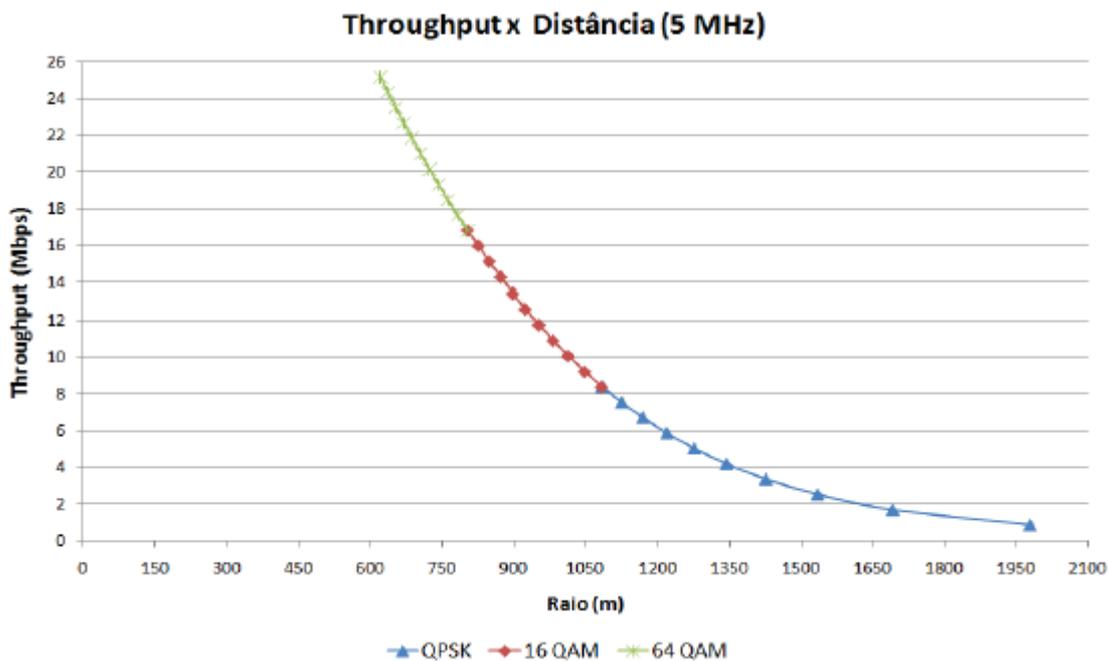
Modulação	Taxa de Códigos	SNR (dB)	Raio (m)
QPSK	1/2	-1,02	1343
QPSK	3/4	1,45	1193
16 QAM	1/2	3,44	1084
16 QAM	3/4	6,76	924
64 QAM	1/2	6,76	924
64 QAM	2/3	9,68	804
64 QAM	3/4	11,06	752
64 QAM	5/6	12,41	705

Fonte: (PUC, 2012)

As figuras 84, 85, 86 e 87 ilustram a variação do throughput conforme a distância para as larguras de banda de 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz e 20 MHz respectivamente.

Conforme a distância entre a transmissão e a recepção se torna maior, os níveis de Sinal Ruído (SNR) se tornam menores devido ao acréscimo das perdas de propagação, logo, níveis de modulação que requerem valores de SNR maiores não poderão ser empregados, fazendo com que modulações robustas sejam adotadas.

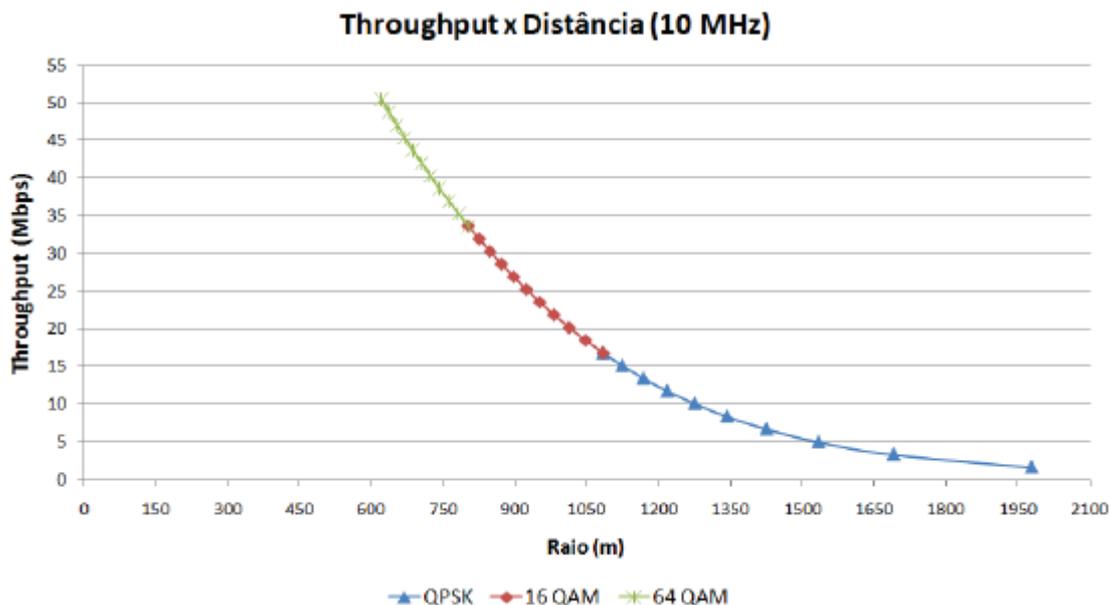
Figura 78: Variação do Throughput (Mbps) conforme a distância (m) para largura de banda de 5 MHz.



Fonte: (PUC, 2012)

Observando os gráficos, pode-se notar que a máxima distância de atuação das modulações não se altera mesmo variando-se a largura de banda, devido ao fato que a sensibilidade requerida na recepção da estação rádio base ser a mesma para as quatro larguras de banda utilizadas no cálculo, -101,5 dBm, lembrando que o Link Budget está limitado no uplink.

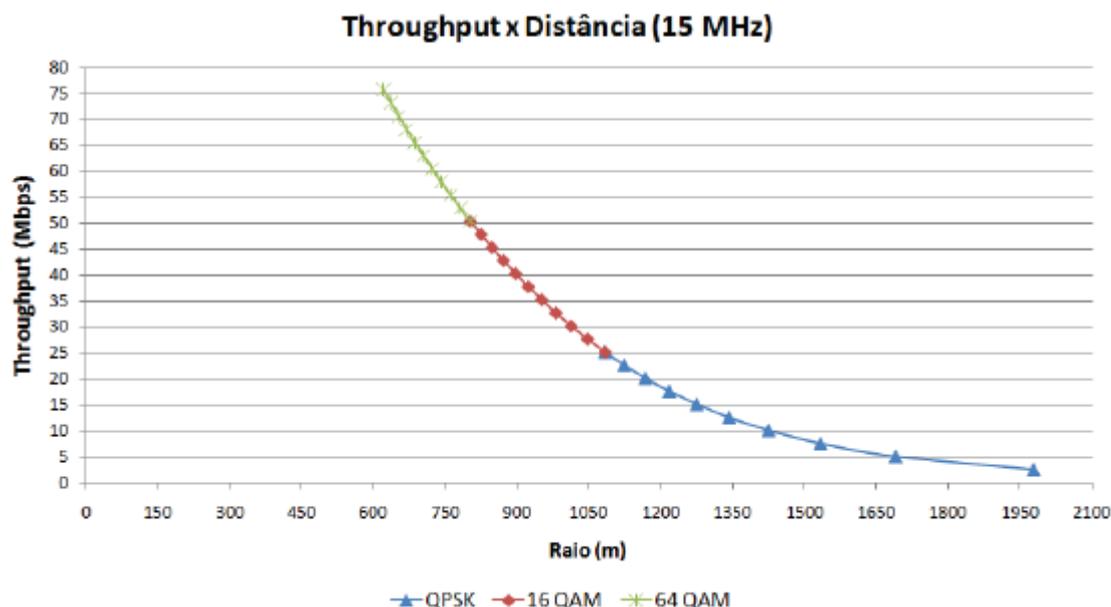
Figura 79: Variação do Throughput (Mbps) conforme a distância (m) para largura de banda de 10 MHz.



Fonte: (PUC, 2012)

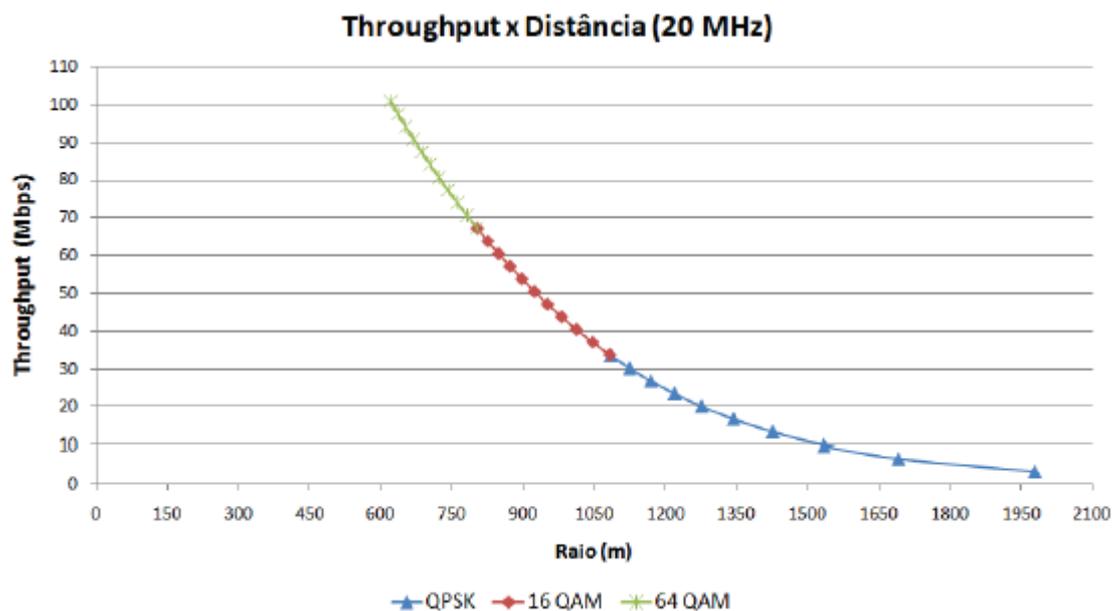
Outro ponto importante, que pode ser observado nos gráficos, destaca para distâncias menores do que 620 metros o throughput não sofre variações, embora as condições rádio possam ser ainda melhores (SNR), pois a capacidade máxima de transporte de dados do canal já foi alcançada, conforme vimos na seção 3.5.

Figura 80: Variação do Throughput (Mbps) conforme a distância (m) para largura de banda de 15 MHz.



Fonte: (PUC, 2012)

Figura 81: Variação do Throughput (Mbps) conforme a distância (m) para largura de banda de 20 MHz.



Fonte: (PUC, 2012)

O máximo throughput atingido com 20 MHz de banda é de 100,9 Mbps, logo taxas de dados maiores não serão atingidas devido ao limite que existe no canal de transmissão, com a máxima taxa de dados sendo atingida com 6 bits (64 QAM) por símbolo.

4.2.3 ELEMENTOS FÍSICOS DA eNODEB

Quando uma nova rede celular é implementada o maior desafio é instalar a estrutura onde é transmitido e recebido o sinal 4G.

Isto porque, além da própria dificuldade técnica na sua localização ideal e instalação, há também o desafio em atender diversas legislações nos níveis municipais, estaduais e federais.

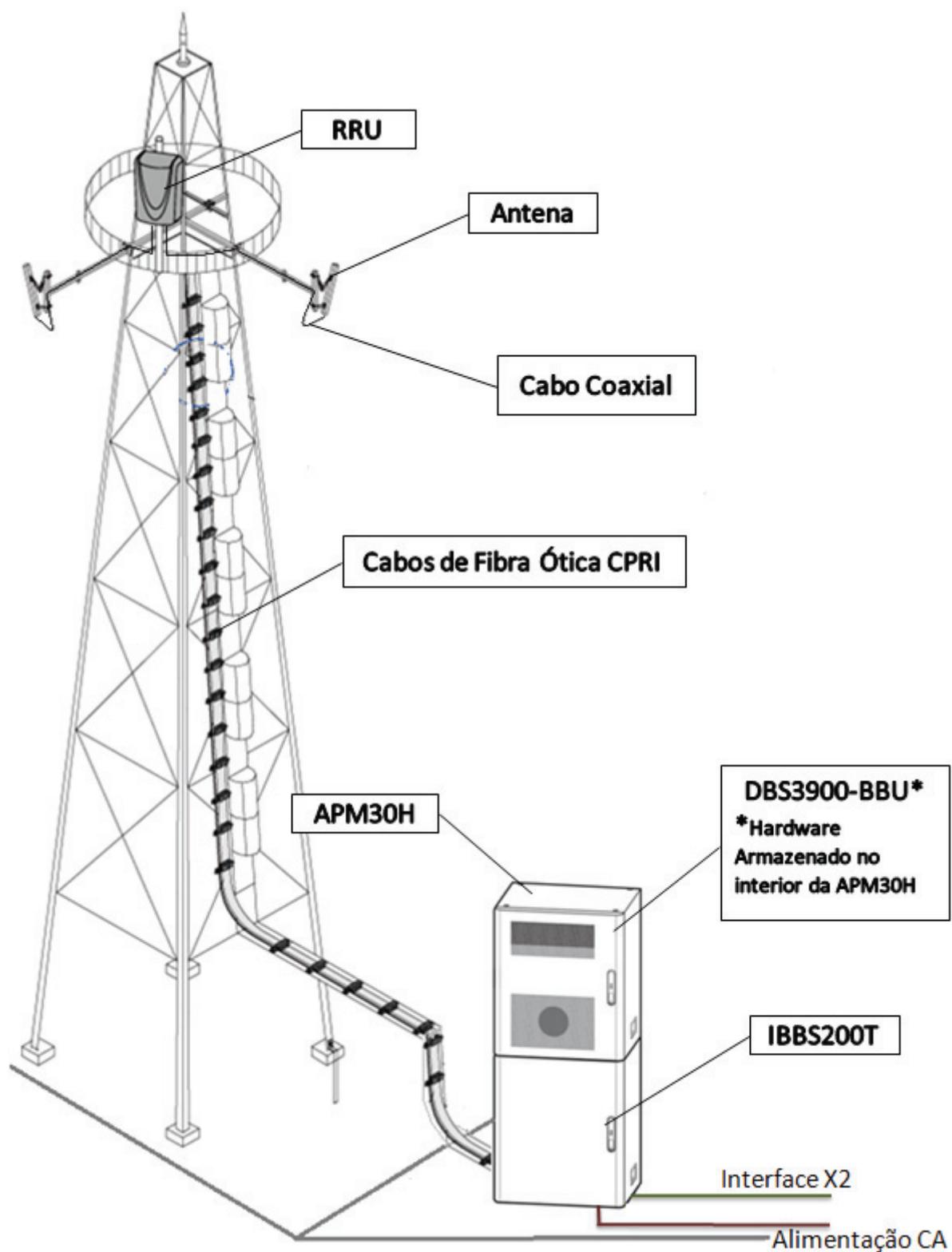
Assim, após toda esta etapa vencida é montado a estrutura que caracteriza os meios físicos de uma eNodeB.

Conforme a Figura 82 os elementos físicos que compõe a eNodeB são:

- Antena
- Cabo Coaxial
- Remote Rádio Unit (RRU)
- Cabos de Fibra Ótica CPRI (Common Public Rádio Interface)
- APM30H/ IBBS200T
- BBU

E dentro destes elementos o principal fabricante dos equipamentos que serão descritos a seguir é da empresa HUAWEI. Esta é uma empresa multinacional que atua produzindo equipamentos de telecomunicação. A empresa tem sede em Shenzhen, na China, e é a maior companhia do seu setor no país e a segunda maior fornecedora de equipamentos de telefonia móvel do mundo (atrás somente da Ericsson)

Figura 82: Elementos Físicos da eNodeB



Fonte: Autor, 2013

4.2.3.1 DBS3900 - BBU (Base Band Unit)

Conforme o fabricante, (HUAWEI, 2013) a DBS3900 adota um design em módulos para configurar diferentes modos de tecnologia com sistema de operação e manutenção unificado.

Ele também suporta a co-existência de equipamentos em diferentes modos em um mesmo local, compartilhando os mesmos recursos da ERB. Com estas características, ele está dentro dos requerimentos das operadoras em uma ERB de multi-tecnologias.

Figura 83: BBU



Fonte: HUAWEI, 2013

Dentro do conceito da DBS3900 a BBU é o hardware inserido no interior da APM30H enquanto a RRU é situado próximo as antenas.

A BBU é uma unidade de processamento de banda base da ERB LTE que executa as seguintes funções:

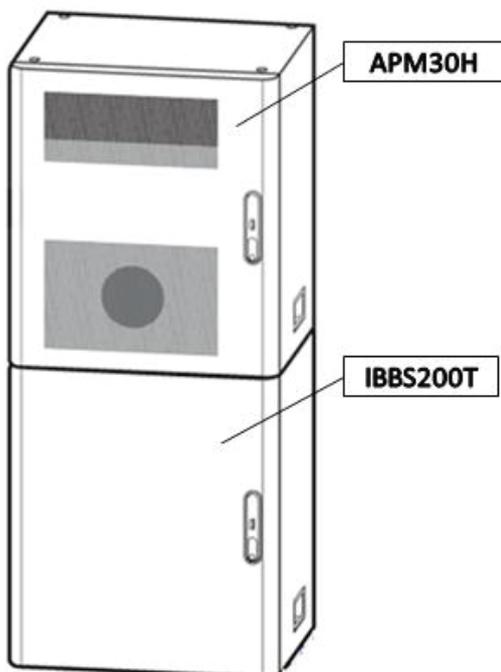
- provê portas de comunicação entre a ERBs LTE e o MME;
- provê as portas CPRI (Common Public Rádio Interface) para comunicação entre a BBU e as RRUs;
- provê portas USB, onde uma USB flash drive pode ser utilizada para atualizar automaticamente o upgrade da ERB;
- provê canal de *Operation and Manutention (OM)* entre a ERB e o LMT ou o M2000 para operar e realizar a manutenção da ERB;

- processar os dados de uplink e downlink;
- gerenciar sistemas dual-mode (WCDMA/LTE, por exemplo, em termos de canal OM e processamento de sinalização);
- provê sincronismo para o sistema.

4.2.3.2 APM30H/ IBBS200T

As funções da APM30H e IBBS200T são prover soluções auxiliares de aplicações externas dos produtos da rede sem fio da HUAWEI. Eles suprem a ERB com fontes CC (corrente contínua) e energia de backup (Baterias). Podem ser usados também em aplicações indoor e outdoor BBU e equipamentos de transmissão.

Figura 84: APM30 e IBBS200T

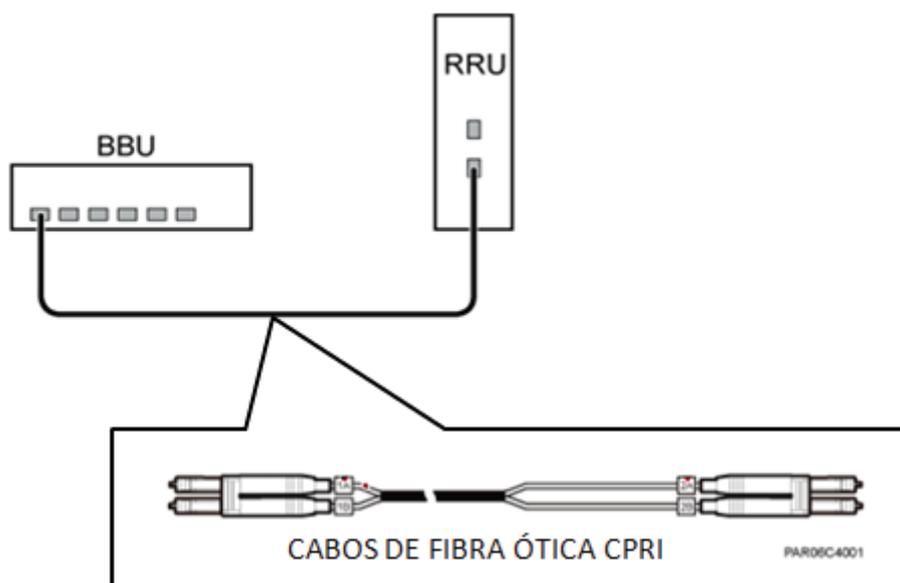


Fonte: HUAWEI, 2013

4.2.3.3 CABOS DE FIBRA ÓTICA CPRI

Os cabos de fibra ótica CPRI podem ser cabos óticos multimodos ou monomodos. Estes cabos transmitem sinais CPRI entre a BBU até a RRU.

Figura 85: cabos de fibra ótica CPRI - Conexão



Fonte: HUAWEI, 2013

4.2.3.4 REMOTE RÁDIO UNIT (RRU)

Como componente da DBS3900 a RRU, que ao contrário da BBU, participa como elemento de potência. Sendo que, este executa as seguintes funções:

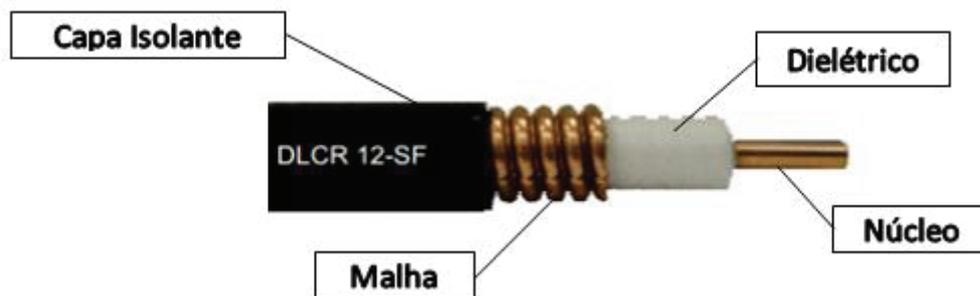
- recebe dados (downlink) e envia dados (uplink) para banda base da BBU;
- canal de Rx da RRU recebe os sinais de RF do sistema irradiante, converte o sinal recebido para sinais de Intermediate Frequency (IF), amplifica os sinais de IF e executa a conversão analógico para digital. Enquanto o canal de Tx filtra os sinais de downlink, executa a conversão digital para analógica e em seguida converter para sinais de RF do Tx.

- multiplexação da recepção (RX) com os sinais de Transmissão (TX) no RF, permitindo assim que estes sinais compartilhem o mesmo caminho para antena. Também filtra os sinais RX e TX.
- é provido na sua construção também o Bias Tee (BT). O acoplamento do BT é feito através do TX/Rx da RRU. Este acoplamento supre a alimentação do Tower Mounted Amplifier (*TMA*).

4.2.3.5 CABO COAXIAL (LINHAS DE TRANSMISSÃO)

Apesar de pouco expressivo em tamanho, o cabo coaxial é responsável pela conexão de RF, após conversão digital analógico, entre as antenas e a RRU.

Figura 86: Cabo coaxial 1/2"



Fonte: HUAWEI, 2013

Um cabo coaxial é formado por um núcleo, que pode ser maciço ou vazado, por um elemento isolante (Dielétrico), uma malha e finalmente por uma capa isolante. Algumas das características principais destes cabos são:

- impedância;
- atenuação;
- frequência de trabalho;

4.2.3.5.1 IMPEDÂNCIA

Assim como as antenas, os cabos de todo o sistema precisam ter a mesma impedância de trabalho para que haja perfeita transferência de potência do transmissor para a antena. Para redes celulares a impedância padrão é de 50Ω .

4.2.3.5.2 ATENUAÇÃO

O sinal, ao sair do transmissor, percorre um caminho até chegar à antena. Quanto mais distante esta antena estiver do transmissor, maior o comprimento do cabo e cabos mais compridos possuem, maiores as atenuações. Em sistemas onde o cabo precisa ser muito longo devido ao fato das antenas estarem muito distantes do transmissor, a potência que chega nestas será bem menor que a que sai do transmissor.

As atenuações dos cabos encontradas nos catálogos dos fabricantes são expressas em dB/100m. Portanto, quanto menor este valor, melhor, porém cabos com menores atenuações são mais pesados e mais caros.

Desta maneira a solução utilizada pela DBS 3900 tendo a RRU no topo da torre minimizam em muito estas perdas, otimizando recursos.

4.2.3.5.3 FREQUÊNCIA DE TRABALHO

Os cabos coaxiais de uma maneira geral operam em frequências bastante distintas, por isso, na hora de escolher, é necessário verificar também se a frequência de trabalho do cabo está de acordo com a frequência de operação do sistema. E neste trabalho, as principais faixas de frequências são 850, 1800, 1900, 2100 e 2600 MHz.

4.2.3.5.4 CASAMENTO DE IMPEDÂNCIAS E VSWR (VOLTAGE STANDING WAVE RATIO)

Em eletrônica aprendemos que, para uma perfeita transferência de energia, é necessário que haja um perfeito casamento de impedâncias entre o gerador de energia e a carga. Em telecomunicações ocorre a mesma coisa. Para o perfeito desempenho de um sistema de RF é necessário o adequado casamento de impedância entre o transmissor, a linha de transmissão e a antena. Caso este casamento não seja adequado, ocorrerão ondas estacionárias, fazendo com que parte do sinal transmitido retorne. Dependendo da quantidade de sinal retornado, pode haver até a queima do transmissor.

Quando o casamento de impedâncias em uma linha de alimentação, no nosso caso o cabo coaxial, está perfeito, a tensão e a corrente será constante em toda a extensão do cabo. Se este casamento não estiver perfeito, ocorrerá uma onda estacionária de tensão e corrente em determinados pontos do cabo e não ocorrerá a máxima transferência de energia do transmissor até a antena.

Existem várias formas de quantificar, medir e descrever o retorno do sinal emitido pelo transmissor.

Termos como coeficiente de reflexão, perda de retorno, potência refletida e perda de potência transmitida são comumente utilizados. Todos eles referem-se a apenas um fenômeno, o da reflexão da onda.

Quando uma onda sai do transmissor em direção à antena através do cabo coaxial e sofre reflexão ao chegar na antena, parte desta onda retorna pelo mesmo cabo, produzindo uma nova onda que caminha em direção oposta à original. Isto causa um padrão de interferência chamado de onda estacionária. Em determinados pontos do cabo o resultado da soma vetorial destas duas ondas será uma maior intensidade, enquanto em outros locais haverá uma resultante menor que a original. Se estivéssemos falando de fios paralelos, seria possível medir estes pontos de máximos e mínimos deslocando o ponto de observação e medida, mas os cabos coaxiais, como sabemos, são isolados, não permitindo que se faça a medida desta forma. Assim, outros métodos são empregados para se fazer estas medições.

A diferença entre os níveis mínimos de máximos dão os valores do VSWR (Voltage Standing Wave Ratio – Razão de Tensão de Onda Estacionária) para um determinado sistema.

4.2.4 ANTENAS

Este é um dos elementos chaves para uma boa cobertura da rede celular, que envolve conceitos de eletromagnetismo na perspectiva de alta frequência.

4.2.4.1 PROPAGAÇÃO

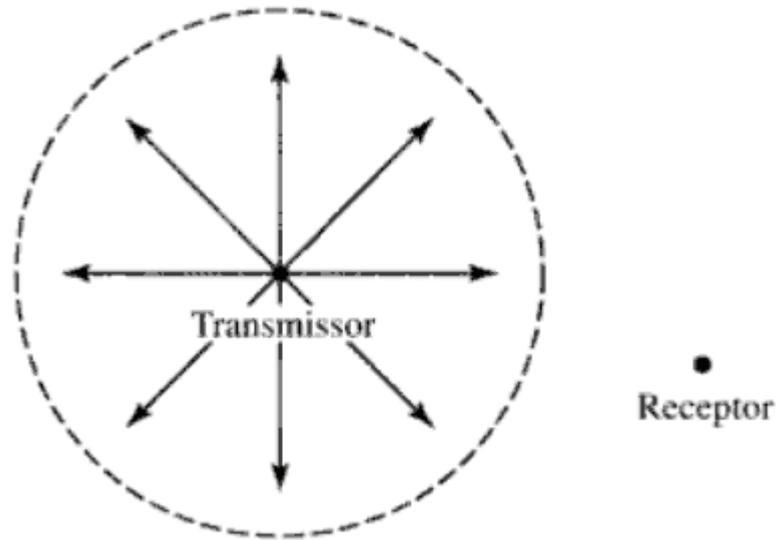
Uma antena irradia um sinal de Rádio Frequência (RF). Este vai se propagar pelo espaço, razão por que será visto aqui que o tipo de terreno, a densidade demográfica e as geometrias do local, por onde o sinal está se propagando, vão gerar variações na maneira com que este sinal irá se propagar (HAYKIN; MOHER, 2008).

Neste subitem objetiva-se fornecer uma compreensão dos fenômenos físicos subjacentes à propagação de uma onda eletromagnética, como, por exemplo, o efeito da refração, difração e reflexão. Em conjunto com as equações de Maxwell, sobre as teorias eletromagnéticas, será abordado, igualmente, o conceito de antenas (HAYKIN; MOHER, 2008).

4.2.4.2 RADIAÇÃO ISOTRÓPICA

Para entender de propagação, é importante esclarecer o funcionamento de antenas. A primeira delas é a do tipo Isotrópica. As demais estão sempre relacionadas a essa. Na prática ela não existe, todavia se faz uma análise teórica como se fosse algo concreto. Por isso, é preciso que se imagine uma antena no formato de uma esfera e que ela irradia igualmente para todas as direções do espaço.

Figura 87: Propagação da antena isotrópica



Fonte: HAYKIN; MOHER, 2008

A seguir HAYKIN e MOHER (2008) definem toda esta teoria em cálculos matemáticos elaborados por Maxwel. Consideremos então que está sendo irradiada, uma Potência de Transmissão (P_T), expressa em Watts, e podemos afirmar que a Densidade de Potência (Φ_R) na superfície de uma esfera de raio R que tem a fonte como centro, será:

$$\Phi_R = \frac{P_T}{4\pi R^2}$$

- $4\pi R^2 =$ a área da superfície da esfera.

Equação 41

Segundo HAYKIN e MOHER (2008), o resultado será em Watts/m^2 . Nesta formula levamos em consideração a lei da Conservação de Energia: “[...], a energia irradiada pela fonte por unidade de tempo deve estar disponível na superfície da esfera ou em qualquer outra superfície fechada que encerra a fonte.” (p. 32). Já a Potência Recebida (P_R) vai depender do tamanho e do alinhamento com a antena transmissora. Pode ser calculada por:

$$P_R = \Phi_R A_e = \frac{P_T}{4\pi R^2} A_e$$

- A_e = Área efetiva de abertura da antena ou seção reta de absorção

Equação 42

A eficiência (η) está relacionada ao tamanho (A) ou à área efetiva (A_e) da antena:

$$\eta = \frac{A_e}{A}$$

Equação 43

Chegamos, portanto, a conclusão de que a área efetiva para uma antena isotrópica (A_{iso}) deve ser:

$$A_{iso} = \frac{\lambda^2}{4\pi}$$

- λ = comprimento de onda.

Equação 44

Agora substituindo esta em (P_R):

$$P_R = \frac{P_T}{(4\pi R/\lambda)^2} = \frac{P_T}{L_P}$$

- L_P = perda no espaço livre entre as duas antenas que estão se comunicando.

Equação 45

Nesta equação, a perda é definida como:

$$L_P = (4\pi R/\lambda)^2$$

Equação 46

Um detalhe importante que deve ser levado em consideração é o comprimento de onda, que está diretamente ligada à frequência de operação. Neste trabalho, esta última informação será considerada sempre de altas frequências, em torno de 800MHz e 2100MHz. Já o comprimento de onda será curto e com isso as antenas serão menores (HAYKIN; MOHER, 2008).

4.2.4.3 ANTENAS DIRECIONAIS

Importante salientar que as antenas isotrópicas são utilizadas apenas como um modelo teórico para fins de cálculos matemáticos. As antenas empregadas na comunicação de celulares são do tipo:

- Nas ERBs as antenas podem ser *Omnidirecional*³ e direcionais com aberturas que variam de 10° a 360°, em média possuem um ganho de 16 dBi⁴, podendo ser até *quadriband*⁵; (MATOS, 2004).
- Nos móveis todas são Omnidirecional, podendo utilizar antenas Yagi⁶ como auxiliares, que ajudam na ampliação do ganho, geralmente utilizadas em áreas rurais; (MATOS, 2004).

Na prática as antenas utilizadas são diretivas e possuem um ganho G_T que é uma função entre Azimute θ e o ângulo de elevação ϕ . (MATOS, 2004).

- O Azimute é o ângulo entre o Norte da terra e a direção da linha de enlace;
- O ângulo de elevação é a medição feita com o plano horizontal.

$$G_T = \frac{\text{Densidade de potência } (\theta, \phi)}{\text{Densidade de potência de uma antena Isotrópica}}$$

Equação 47

³ Omnidirecional “Omni significa que irradia potência igualmente em todas as direções”. (MATOS, 2004, p. 246).

⁴ dBi: é uma unidade de medida que exprime em uma escala logarítmica, relação entre a potência da antena utilizada com a antena isotrópica.

⁵ *Quadriband* é o termo utilizado para a antena que opera em quatro faixas de frequência.

⁶ Yagi nomenclatura de uma antena.

Com essa definição o ganho da antena Isotrópica fica sendo unitário. Já o cálculo de ganho da antena receptora G_R é:

$$G_R = \frac{\text{Área efetiva na direção } (\theta, \phi)}{\text{Área efetiva de uma antena Isotrópica}}$$

Equação 48

Estas duas equações são os cálculos de ganho de potência para recepção e transmissão. Nos meios de comunicação na maioria dos casos a antena utilizada para transmitir é a mesma usada para receber. Os dois ganhos, pois, estarão relacionados da seguinte maneira: “A transmissão de sinais em um meio é recíproca na medida em que as posições do transmissor e do receptor podem ser permutadas sem mudança nas características da transmissão.” (HAYKIN; MOHER, 2008, p. 34).

O princípio citado acima tem como base postulado de Maxwell que diz: “[...] se a direção de propagação for invertida, a energia transportada pela onda radiada deve seguir exatamente o mesmo percurso e sofrer exatamente os mesmos efeitos, só que na direção inversa.” (HAYKIN; MOHER, 2008, p. 34).

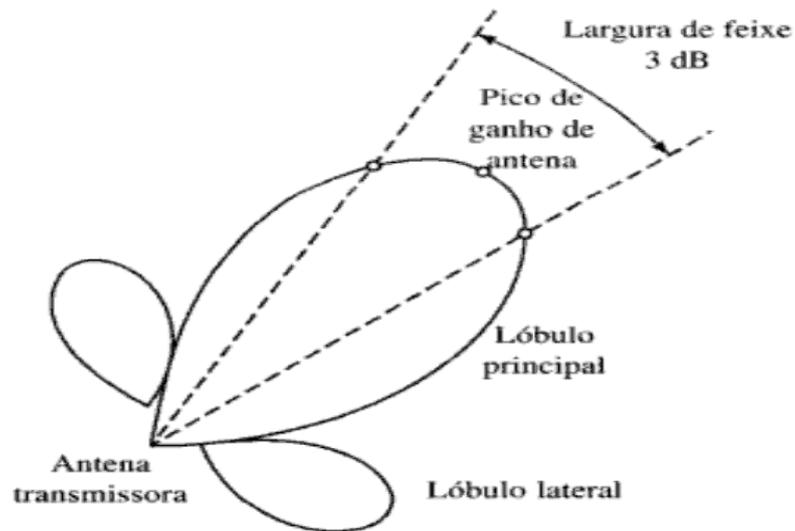
Sabendo-se disso, percebe-se que os ganhos das antenas de transmissão e recepção são exatamente iguais. Esses conceitos, adicionados ao cálculo da antena receptora, (G_R) é possível se ter o ganho de qualquer antena:

$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_e$$

Equação 49

O diagrama de irradiação em duas dimensões de uma antena parabólica fica da seguinte forma:

Figura 88: Diagrama de irradiação de uma antena parabólica



Fonte: HAYKIN; MOHER, 2008

E sua A_e fica e seu ganho (G) respectivamente:

$$A_e = \eta \frac{\pi D^2}{4}$$

Equação 50

$$G = \frac{A_e}{A_{isotrópica}} = \frac{\eta \pi D^2 / 4}{\lambda^2 / 4\pi} = \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)^2$$

Equação 51

Este subitem teve como objetivo explicar que os cálculos apresentados na antena Isotrópica são para ajudar a montar os cálculos de ganhos para as demais antenas. Além disso, almejava introduzir os tipos de antenas utilizados na telefonia celular e mostrar o ganho de uma antena diretiva.

4.2.4.4 POLARIZAÇÃO

Nas ondas eletromagnéticas, observa-se que a onda é composta por eletro + magnética, ou seja, ela possui um campo elétrico e um campo magnético e são perpendiculares entre si. O conceito de polarização é determinado pela direção

que o campo elétrico está apontado. Observaremos aqui que pode ser Horizontal, Vertical, Diagonal ou até mesmo Circular, dentre outros (HAYKIN; MOHER, 2008).

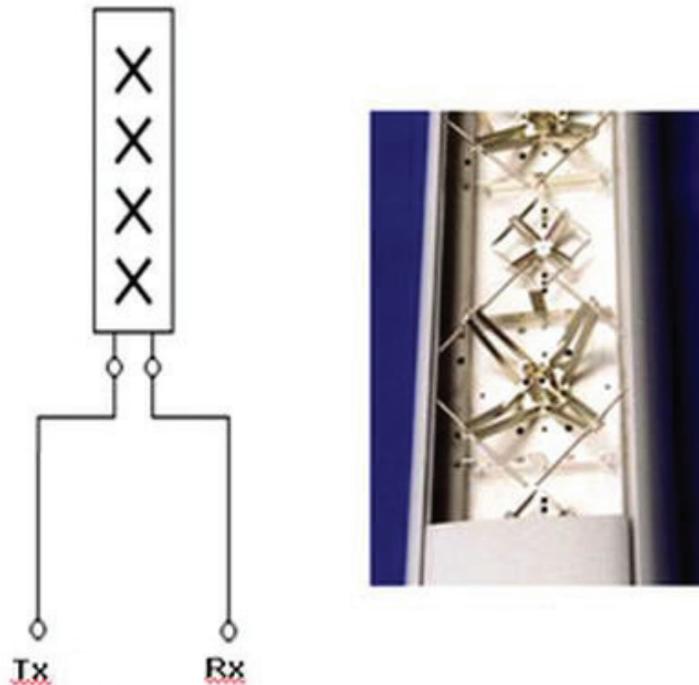
4.2.4.5 POLARIZAÇÃO UTILIZADA NAS REDES CELULARES.

Para que um sistema de comunicação *wireless* funcione, as duas antenas, que compõem o circuito, devem estar na mesma polarização. Caso contrário, uma não conseguirá captar os sinais enviados pela outra. Na telefonia celular isto é difícil, pois cada usuário transporta o celular de diferentes maneiras. Uns, por exemplo, levam dentro de bolsas, mochilas, no bolso da calça, dentre outras formas. Dessa maneira, a polarização da antena receptora não será a mesma da transmissora, implicando um descasamento, que, por sua vez, limitará a quantidade máxima de potência a ser extraída pela antena. A questão é: qual polarização utilizar na telefonia celular para minimizar este problema?

A solução encontrada no início dos anos noventa e ainda hoje em uso remonta à tecnologia dos dipolos cruzados, ou X-Pol, no qual o elemento irradiante é constituído por dois pares de dipolo, um com polarização $+45^\circ$ o outro com polarização -45° . Este dipolo (veja figura) foi patenteado pela Kathrein e revolucionou o mundo da telefonia celular. Isto permitiu reduzir as antenas por estação rádio base de 6 para 3 e a diversidade espacial foi substituída pela diversidade por polarização com desempenho semelhante (Kathrein Mobilcom Brasil).

Na Figura 89, demonstra-se o modelo de antena utilizado em ERB.

Figura 89: Modelo de antena utilizada em ERB.



Fonte: Kathrein Mobilcom Brasil, 2012

4.2.5 EXECUÇÃO DO PROJETO

Antes de implementar a rede fisicamente, é iniciado o processo de avaliação geográfica dos prováveis melhores pontos para ativação das eNodeBs. Isto tendo em vista todas as obrigações da ANATEL adquiridas pela operadora no leilão do 4G e sites já existentes da rede legada.

Para que seja possível este trabalho é utilizado um software que efetua simulação da cobertura celular. Neste são inseridas as entradas do projeto como coordenadas geográficas. E os resultados desta simulação, quando implementada fisicamente, tem sua validação prática ao realizar a coleta da cobertura utilizando uma ferramenta para este fim denominado Drive Test e seu pós-processamento.

4.2.5.1 SOFTWARE DE PREDIÇÃO

O xWizard é uma ferramenta de propagação na qual permite ao usuário a realizar uma variedade de análises em muitos diferentes cenários e tecnologias (GSM, UMTS, WiMAX, LTE, etc.).

Mas para iniciar a execução de qualquer simulação nesta ferramenta, é necessário inserir base de relevo da região (*Terrain*) e Morfologia (*Clutter*). Onde neste caso todos referentes à Florianópolis.

Figura 90: Configurações de Parâmetros de Base para Predição.

The screenshot shows the 'Basic' tab of the xWizard software interface. It is divided into several sections for configuring base parameters for prediction:

- Boundaries:** A table for entering geographic coordinates.

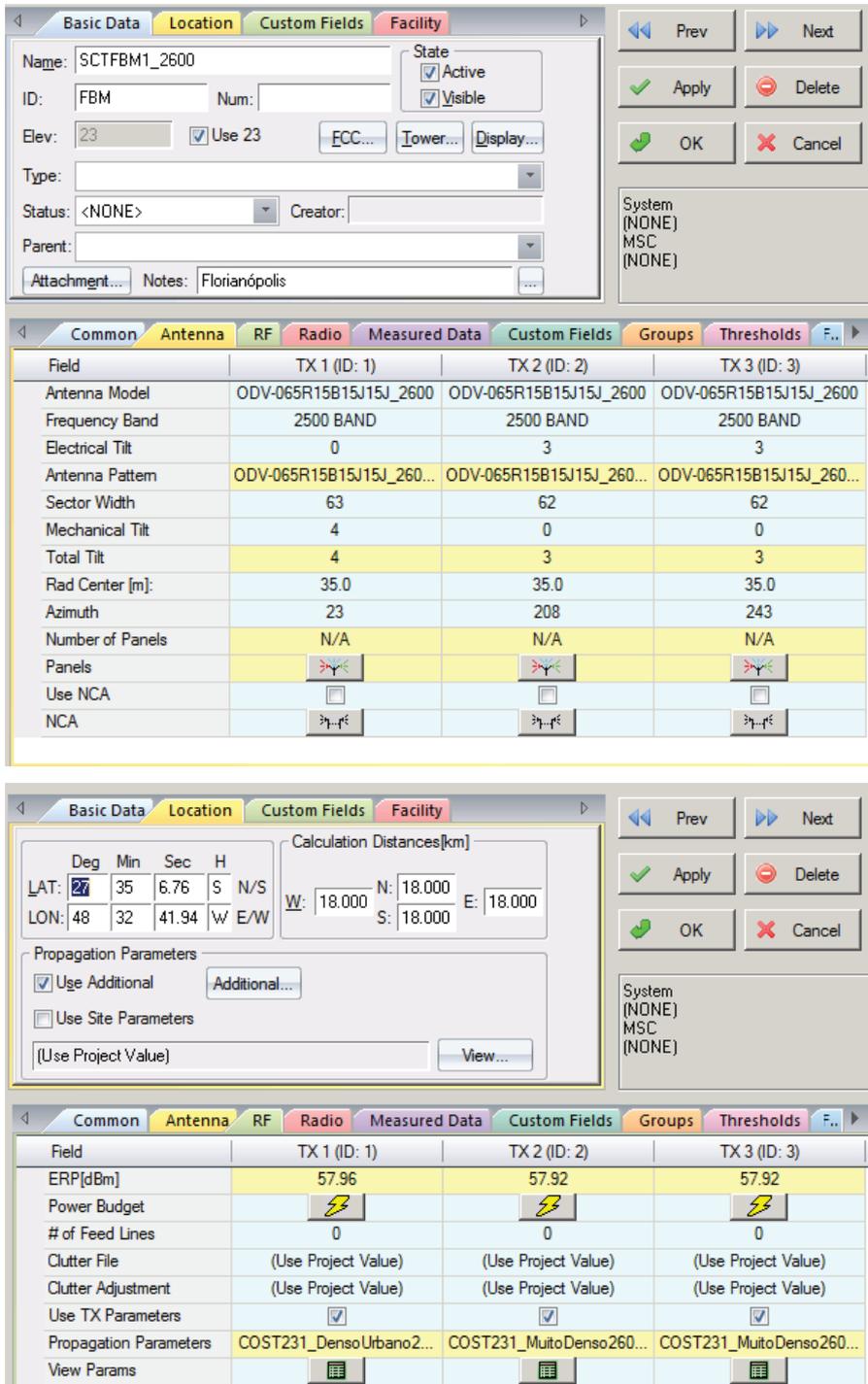
	Deg	Min	Sec	H
North Latitude:	22	46	10.50	S
West Longitude:	54	47	51.65	W
South Latitude:	29	29	8.92	S
East Longitude:	48	9	13.30	W
- Display Terrain(s):** A list box containing terrain files: PR_f21_10m_Surface, SC_f22_30m_Surface, and three <None> entries. An 'Update Boundaries' button is located below.
- Coordinate System:** Includes dropdowns for Group (Geodetic Latitude / Longitude), Name (Deg Min Sec Hem), and Datum (WGS 1984).
- Display Clutter:** Includes a dropdown for ID Grid (SC_Florianopolis_5m_Sur) and a dropdown for Adjustment (Clutter_Adjustment), with an 'Edit...' button.
- Map Projection:** A dropdown menu set to 'Default Wizard Projection'.
- Measurement System:** A dropdown menu set to 'Metric'.

Fonte: VIVO, 2013

Em seguida são levantados os pontos das ERBs existentes em Florianópolis, referentes à rede legada para instalação do LTE. Visto que no presente momento a proposta apenas é sobrepor o 4G sobre a rede 2G/3G.

São adicionadas as configurações do sistema irradiante nestes pontos considerando as características do LTE, como por exemplo, o link budget, modelo da antena, coordenadas geográficas, morfologia, etc.

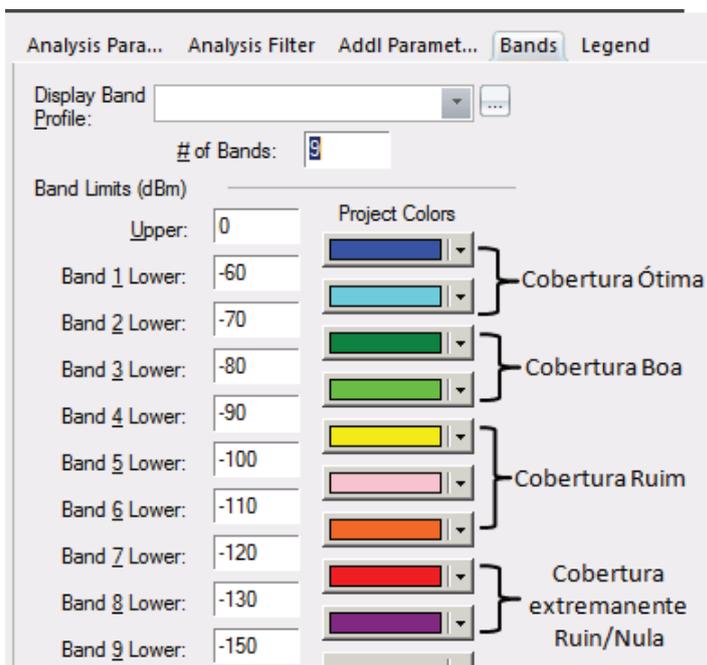
Figura 91: Exemplos de configuração de uma eNodeB para predição



Fonte: VIVO, 2013

Na figura 92 é apresentado a simulação de propagação da cobertura LTE utilizando o Indicador Chave de Desempenho (KPI – Key Performance Indicator) RSRP (Reference Signal Received Power).

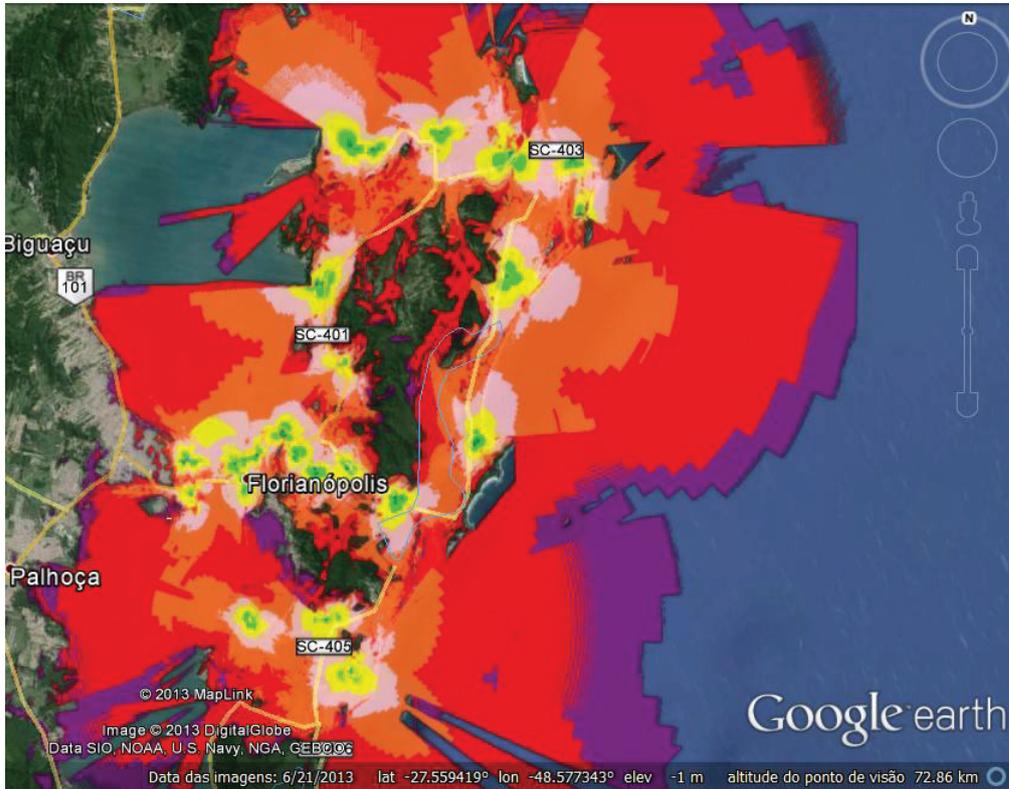
Tabela 30: Valores medidos de RSRP



Fonte: VIVO, 2013

Com a simulação terminada, é possível utilizar um recurso na ferramenta que exporta a propagação para o Google Earth. Onde é possível avaliar com maior riqueza de detalhes a situação da cobertura 4G em Florianópolis.

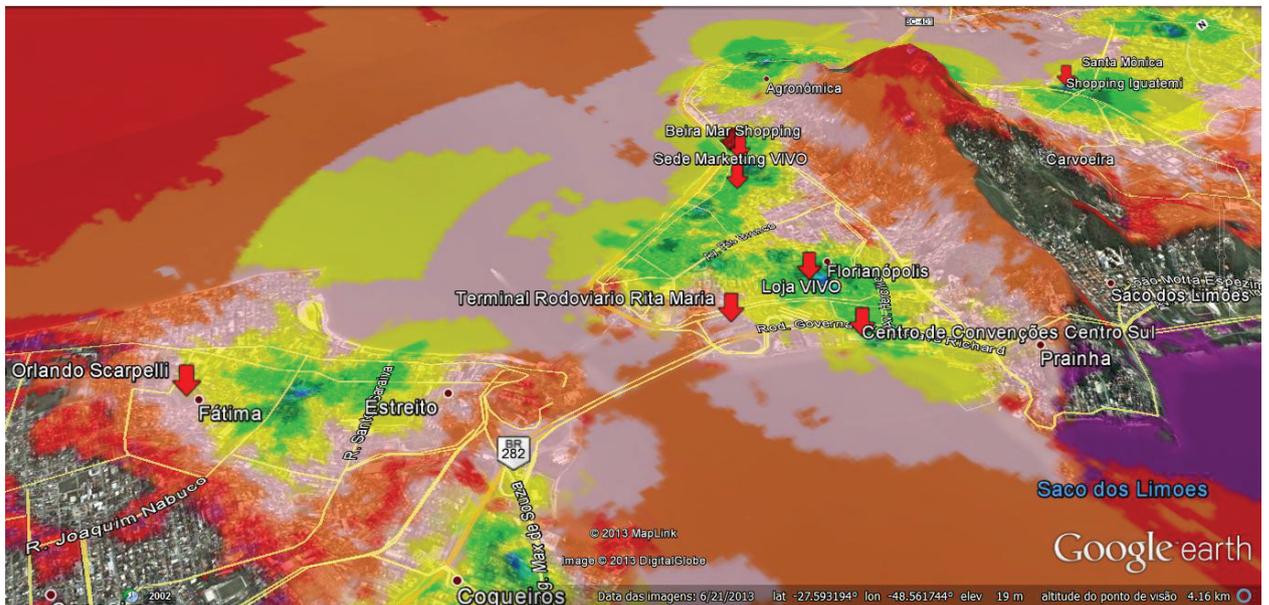
Figura 93: Propagação geral da rede LTE Florianópolis para 2600MHz



Fonte: VIVO, 2013

Nisto é verificado os pontos de grande importância (notáveis) na região, no caso relacionados a copa do mundo e as lojas da VIVO da região.

Figura 94: Exemplo de propagação para avaliação da qualidade de cobertura nos pontos notáveis da rede LTE Florianópolis para 2600MHz.



Fonte: VIVO, 2013

Depois de avaliada toda a situação da cobertura simulada e instalado fisicamente os equipamentos e realizado todos os ajustes físicos no sistema irradiante dentro das expectativas de qualidade do serviço celular é iniciado o período de validação prática do projeto de cobertura simulada que é comumente denominada como Drive Test.

4.2.5.2 DRIVE TEST E PÓS-PROCESSAMENTO

Drive Test é o procedimento de coletar e armazenar informações geoposicionadas da cobertura celular utilizando um veículo para deslocamento.

Basicamente, a realização deste procedimento utiliza os seguintes componentes:

- Um Notebook - ou outro hardware semelhante;
- Software de Coleta;
- Chave de Segurança – Dongle – comum a estes tipos de softwares;
- Telefone(s) Celular(s);
- GPS;
- Scanner – opcional.

Também é comum o uso de adaptadores e/ou hubs que permitam a correta interconexão de todos os equipamentos.

Figura 95: Exemplo de equipamento de Drive Test



Fonte: Vesteltraining, 2011

Enquanto o pós-processamento é o procedimento onde são reunidos todos os arquivos com informações da cobertura coletada pelo Drive Test em um software específico e gerado um mapa geoposicionado onde é possível visualizar e avaliar todo teste realizado.

Assim no procedimento prático da ativação da nova rede o Drive Test é utilizado em dois momentos, quando na ativação de um único elemento da rede o SSV (Single Site Verification) e no Cluster que são grupos de eNodeBs próximas entre si de uma determinada região selecionada.

O SSV é efetuado em duas partes, testes estáticos e testes móveis.

No teste estático é avaliado:

- Ping/latência⁷
- Falhas de acessos nas conexões;
- Quedas nas conexões;
- Taxa média de download;
- Taxa média de upload.

Figura 96: Exemplo de SSV estático

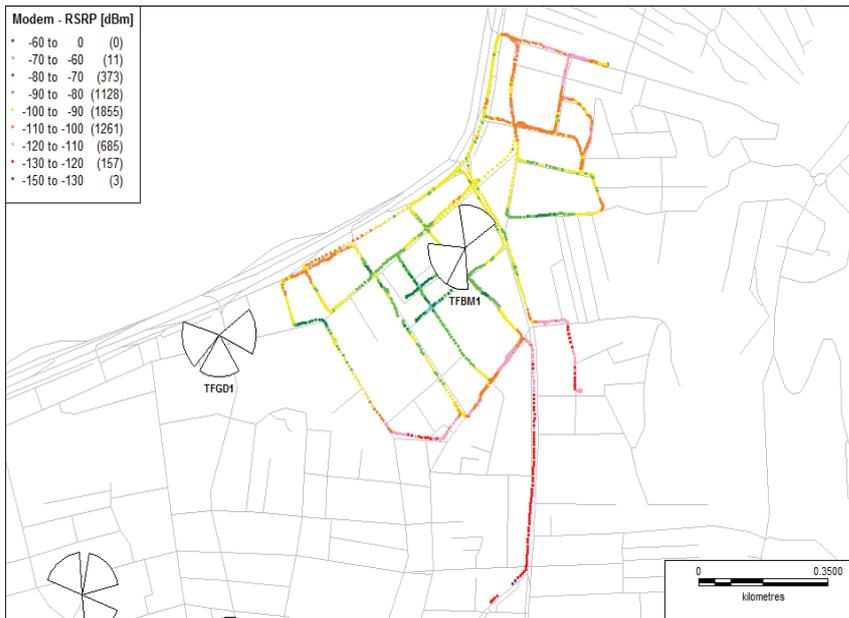
INDICATORS			
Ping Test			
	Sector 1	Sector 2	Sector 3
Number of Data Services	1	1	1
Number of Access Success	1	1	1
Number of Access Failures	0	0	0
Number of Drops	0	0	0
Average Latency (ms)	66,01	67,40	57,91
Troughput Test			
	Sector 1	Sector 2	Sector 3
RLC DownLink Troughput Average (Mbps)	24,75	17,37	23,58
RLC DownLink Troughput Peak (Mbps)	71,05	62,47	61,03
RLC UpLink Troughput Average (Mbps)	20,45	25,85	23,65
RLC UpLink Troughput Peak (Mbps)	43,64	42,06	46,14

Fonte: VIVO, 2013

⁷ Ping ou latência como podemos chamar, é um utilitário que usa o protocolo ICMP (Internet Control Message Protocol) para testar a conectividade entre equipamentos. É um comando disponível praticamente em todos os sistemas operacionais. Seu funcionamento consiste no envio de pacotes para o equipamento de destino e na "escuta" das respostas. Se o equipamento de destino estiver ativo, uma "resposta" (o "pong", uma analogia ao famoso jogo de ping-pong) é devolvida ao computador solicitante.

Enquanto no teste móvel é avaliado a correta setorização, o throughput disponibilizado e a validação da parametrização da eNodeB. A rota do Drive Test é relativamente curta objetivando apenas a cobertura do elemento de rede em questão.

Figura 97: Drive Test de SSV pós-processado.

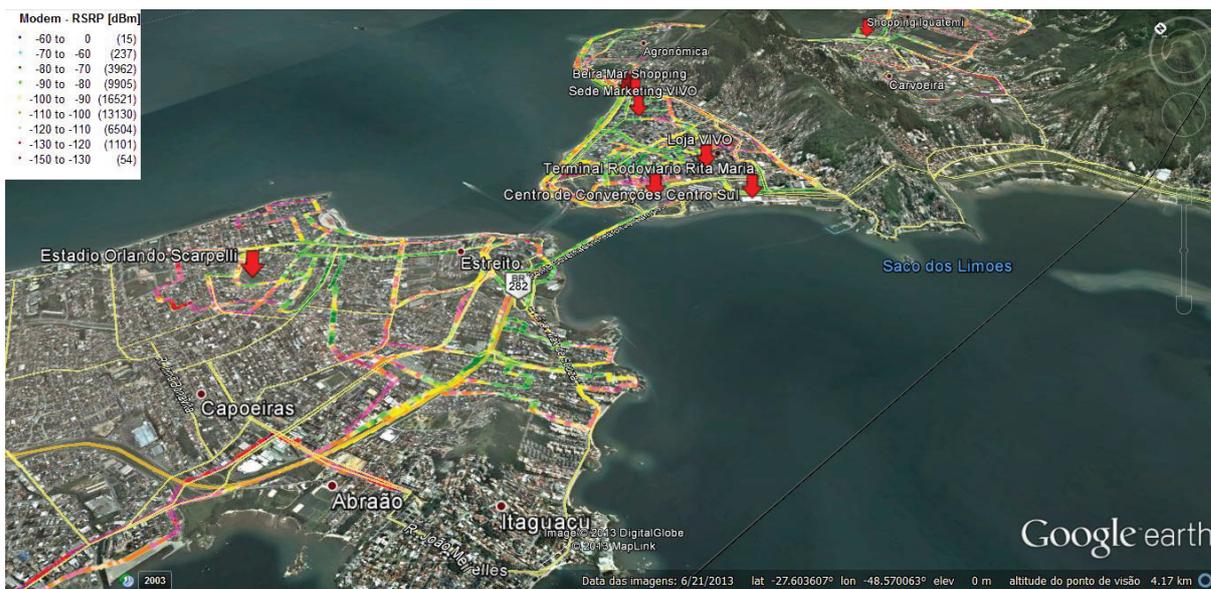


Fonte: VIVO, 2013

Após ativação de todos os elementos da rede, chega o momento de avaliar a qualidade do projeto e a sua perfeita integração entre as eNodeBs, como quedas nas conexões, falhas de acesso, throughput, etc ao realizar o Drive Test de um determinado Cluster.

A rota do Drive Test neste caso é mais complexa, com a maioria dos arruamentos disponíveis sendo coletados.

Figura 98: Drive Test de Cluster pós-processado



Fonte: VIVO, 2013

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No decorrer desta pesquisa foram analisadas as questões referentes a estrutura das redes celulares de como sua evolução gradualmente passou da predominância de apenas voz para uma rede mista de voz e dados e agora para apenas IP. A complexidade inicial das redes baseadas em circuito onde dezenas de equipamentos participavam do processo da conexão está sendo gradualmente substituídas por estruturas mais simplificadas como no caso do LTE. Tornando-se redes mais dinâmicas e econômicas para investimentos.

Entretanto, na interface aérea, ao contrário da estrutura da rede física, a simplicidade da portadora analógica foi evoluindo para portadoras mais complexas que demandaram gradualmente de maior espaço espectral.

Logo as operadoras que queiram obter os máximos recursos disponíveis no 4G precisaram obter a maior banda disponibilizada no espectro.

E quando o leilão das novas bandas para o serviço 4G foram disponibilizadas pela ANATEL, apenas as operadoras VIVO e Claro adquiriram as bandas de 20MHz (Bandas X – VIVO e W – Claro). Logo apenas estas operadoras poderão disponibilizar para seus clientes ofertas de taxas maiores conforme planos pré-definidos pelas mesmas.

Após aquisição das bandas de operação temos a implementação da rede.

Esta foi projetada dentro das especificações da tecnologia com utilização de simuladores de propagação. Para em seguida realizar a instalação da sua estrutura física e posteriormente avaliar a nova rede por meio de testes que coletam a cobertura celular como o Drive Test.

Porém dentro da atual realidade brasileira, há grandes desafios para que seja possível implementar uma rede 4G de qualidade.

Isto porque o espectro disponibilizado para este fim foi de 2600MHz, e devido as características de propagação nesta faixa de frequência a sua cobertura é extremamente limitada para o usuário.

Com o pequeno prazo para atender as demandas das copas das confederações e copa do mundo tendo também as diversas dificuldades impostas pelas legislações municipais e estaduais quanto a instalação de novas ERBs. A nova rede 4G implementada ficou limitada apenas a sobreposição da rede legada.

E como a rede anterior foi dimensionada para bandas de frequências mais baixas, por exemplo, em 850 e 1800MHz, haverá necessidade de ativar mais novas eNodeBs.

Para que isto ocorra de fato com agilidade necessária, se faz imprescindível uma mudança da política quanto ao tratamento das instalações de novas ERBs com mudanças nas legislações vigentes.

Enquanto isso surge uma alternativa para atender esta demanda. A faixa de frequência de 700 MHz, liberada com o fim da transição da TV Aberta analógica para a TV aberta digital. No Brasil isto deve ocorrer em 2016.

O Minicom publicou a portaria 14 de 6/02/2013 que estabelece diretrizes para a aceleração do processo de transição da TV Aberta analógica para a TV aberta digital no Brasil e determina que a Anatel inicie os estudos para disponibilizar a faixa de 698 MHz a 806 MHz para 4G.

A Anatel divulgou no dia 21/02/2013 um regulamento sobre nova destinação da faixa de 700 MHz, onde ela recomenda a adoção do plano de banda da APT que permite uso de 90 MHz (45 + 45 MHz) de espectro.

O próximo passo da Anatel será a elaboração do edital de licitação que deverá passar por consulta pública após a publicação no D.O.U. (Teleco, 2013).

REFERÊNCIAS

HUAWEI. **LTE System Overview**. 2012

TECHNOLOGIES, Agilent. **Introducing LTE-Advanced**. 2010, 2011

3GPP. **LTE**. Disponível em: <<http://www.3gpp.org/LTE>> Acesso em: 29 ago. 2013

WANNSTRON, Jeanette. **LTE Advanced**. May 2012. Disponível em: <<http://www.3gpp.org/LTE-Advanced>>. Acesso em: 29 ago. 2013

COX, Christopher. **An Introduction to LTE: LTE, LTE-advanced, SAE and 4G Mobile Communications**. John Wiley & Sons Ltd, 2012.

DE LA ROCHE, Guillaume. et al. **LTE-Advanced and Next Generation Wireless Networks**. John Wiley and Sons, 2013.

SESLIA, Stefania et al. **LTE: The UMTS Long Term Evolution: from Theory to Practice**, John Wiley and Sons, 2013.

HOLMA, Harri; TOSKALA, Antti. **LTE for UMTS: Evolution to LTE-Advanced**, John Wiley and Sons, 2012.

DORIA, Mauro M. **Ondas e Bits**. 1. ed. São Paulo. Editora Livraria da Física. 2006.

HAYKIN, Simon. **Sistemas de Comunicação**. 4. Ed. São Paulo: ARTMED EDITORA S/A, 2004.

MOHER, Michael. **SISTEMAS MODERNOS DE COMUNICAÇÃO WIRELESS**. São Paulo: ARTMED EDITORA S/A, 2008.

JESZENSKY. Paul Jean etienne. **Sistemas telefônicos**. Barueri, SP. Manole, 2004.

J. Kelif, **Virtual MIMO Network A physical wireless Analysis**, WNC3, 2010.

K. Beh, A. Doufexi ; S. Armour, **On the Performance of SU-MIMO and MU-MIMO in 3GPP LTE Downlink**, IEEE, 2009

A. Tolli, H. Pennanen; P. Komulainen, **SINR Balancing with Coordinated Multi-cell Transmission**, WCNC, 2009.

ANATEL, **Edital de Licitação de 450MHz e de 2,5GHz**. Disponível em <
http://www.anatel.gov.br/Portal/documentos/sala_imprensa/12-4-2012--20h36min55s-Apresenta%C3%A7%C3%A3o%20do%20conselheiro%20Marcelo%20Bechara%20sobre%20o%20edital%20de%202,5%20GHz%20e%20de%20450%20MHz.pdf>
Acesso em: 12 out. 2013.

TELECO, **4G:Frequências e licitações** Disponível em
< http://www.teleco.com.br/4g_freq.asp > Acesso em: 12 out. 2013.

DOS SANTOS SILVA LEITÃO, Rui, **Sincronismo Digital em Orthogonal Frequency Multiplexing**, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Dezembro 2008.

MOBILCOM BRASIL, Kathrein. Disponível em:
<http://www.kathrein.com.br/novidades_reducao_operacional.php>._Acesso em: 14 nov. 2012.