



UNIVERSIDADE PRESBITERIANA MACKENZIE



Escola de Engenharia

Mestrado em Engenharia Elétrica

BRUNO RODRIGUES FERRAZ IZARIO

COMPARAÇÃO DO SISTEMA LTE OPERANDO NA FAIXA DE 2,5 GHZ E 700 MHZ

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Mestrado em Engenharia Elétrica da Universidade Presbiteriana Mackenzie, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Cristiano Akamine

São Paulo

2015

FICHA CATALOGRÁFICA

I98c Izario, Bruno Rodrigues Ferraz
Comparação do sistema LTE operando na faixa de 2,5 GHz e
700 MHz / Bruno Rodrigues Ferraz Izario - 2015.
120f.: il., 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) –
Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2015.
Orientação: Prof. Dr. Cristiano Akamine
Bibliografia: f. 103-105

LTE. 2. 3GPP. 3. 4G. 4. MIMO. I. Título.

CDD 004.66

BRUNO RODRIGUES FERRAZ IZARIO

COMPARAÇÃO DO SISTEMA LTE OPERANDO
NA FAIXA DE 2,5 GHZ E 700 MHZ

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Mestrado em Engenharia
Elétrica da Universidade Presbiteriana
Mackenzie, como requisito parcial para a
obtenção do título de Mestre em Engenharia
Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Cristiano Akamine

Aprovada em 28 de Agosto de 2015.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Cristiano Akamine

Universidade Presbiteriana Mackenzie



Prof. Dr. Edson Lemos Horta

Universidade Presbiteriana Mackenzie



Prof. Dr. Yuzo Iano

Universidade Estadual de Campinas

Aos meus pais e eternos educadores, Helcio e Neuzeli.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela oportunidade e sabedoria concedida para a realização deste trabalho.

Ao meu pai, Helcio José Izario Filho e à minha mãe, Neuzeli Aparecida Rodrigues Ferraz Izario, por tudo que sou hoje, pelo carinho e confiança depositados em mim durante a execução desta dissertação.

Ao meu irmão, Daniel Rodrigues Ferraz Izario, pelo apoio dado durante esta pesquisa.

Ao meu orientador e incentivador, Prof. Dr. Cristiano Akamine, pela oportunidade e por todos os conselhos, sugestões e correções que propiciaram a realização desta dissertação.

Ao PROSUP (Programa de Suporte à Pós-Graduação de Instituições de Ensino Particulares) pela oportunidade e pela bolsa de estudo, tornando realidade esta qualificação.

Aos demais funcionários, amigos, coordenadores da Universidade Presbiteriana Mackenzie, que participaram dos desafios enfrentados por mim na elaboração deste trabalho.

LISTA DE ABREVIATURAS

1G	Primeira Geração
2G	Segunda Geração
3G	Terceira Geração
3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
4G	Quarta Geração
ABINEE	Associação Brasileira da Indústria Elétrica Eletrônica
ACK	<i>Acknowledge</i>
AMPS	<i>Advanced Mobile Phone System</i>
ANATEL	Agencia Nacional de Telecomunicações
APT	<i>Asia Pacific Telecommunity</i>
ARQ	<i>Automatic Repeat request</i>
BCCH	<i>Broadcast Control Channel</i>
BCH	<i>Broadcast Channel</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i>
CCCH	<i>Common Control Channel</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CN	<i>Core Network</i>
CPC	<i>Continuous Packet Connectivity</i>
CS	<i>Circuit Switch</i>
DCCH	<i>Dedicated Control Channel</i>
DFT	<i>Discret Fourier Transform</i>
DL	<i>Downlink</i>
DL-SCH	<i>Downlink Shared Channel</i>
DSL	<i>Digital Subscriber Line</i>
DTCH	<i>Dedicated Traffic Channel</i>
EDGE	<i>Enhanced Data Rates For GSM Evolution</i>
EPC	<i>Evolved Packet Core Network</i>
EPS	<i>Evolved Packet System</i>
EU	<i>User Equipment</i>
E-UTRAN	<i>Evolved UMTS Universal Terrestrial Radio Access Network</i>
FDD	<i>Frequency Division Duplex</i>
FDM	<i>Frequency Division Multiplexing</i>
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
GERAN	<i>GSM EDGE Radio Access Network</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
HSDP	<i>High Speed Downlink Packet</i>
HSDPA	<i>High Speed Downlink Packet Access</i>

HSPA	<i>High Speed Packet Access</i>
HSPA+	<i>High Speed Packet Access Plus</i>
HSS	<i>Home Subscriber Server</i>
HSUPA	<i>High Speed Uplink Packet Access</i>
IFFT	<i>Inverse Fast Fourier Transform</i>
IMT	<i>International Mobile Telephony</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
LTE-A	<i>Long Term Evolution Advanced</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>
MCCH	<i>Multicast Control Channel</i>
MCH	<i>Multicast Channel</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
MME	<i>Mobility Management Entity</i>
MTCH	<i>Multicast Traffic Channel</i>
NAK	<i>Negative Acknowledge</i>
NAS	<i>Non Access Stratum</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
OPEX	<i>Operational Expenditure</i>
PAPR	<i>Peak to Average Power Ratio</i>
PBCH	<i>Physical Broadcast Channel</i>
PCC	<i>Policy and Charging Control</i>
PCCH	<i>Paging Control Channel</i>
PCFICH	<i>Physical Control Format Indicator Channel</i>
PCH	<i>Paging Channel</i>
PCRF	<i>Policy and Charging Resource Function</i>
PDCCH	<i>Physical Downlink Control Channel</i>
PDCP	<i>Packet Data Convergence Protocol</i>
PDSCH	<i>Physical Downlink Shared Channel</i>
P-GW	<i>Packet Data Network Gateway</i>
PHICH	<i>Physical Hybrid Indicator Channel</i>
PMCH	<i>Physical Multicast Channel</i>
PRACH	<i>Physical Random Access Channel</i>
PS	<i>Packet Switch</i>
PSK	<i>Phase Shift Keying</i>
PUCCH	<i>Physical Uplink Control Channel</i>
PUSCH	<i>Physical Uplink Shared Channel</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RACH	<i>Random Access Channel</i>
RF	<i>Radiofrequência</i>

RNC	<i>Radio Network Controller</i>
RNS	<i>Radio Network Subsystem</i>
RRC	<i>Radio Resource Control</i>
RTT	<i>Round Trip Time</i>
SAE	<i>Service Architecture Evolution</i>
SC-FDMA	<i>Single Carrier Frequency Division Multiple Access</i>
SDMA	<i>Space Division Multiple Access</i>
SET	<i>Sociedade Brasileira de Engenharia de Televisão</i>
S-GW	<i>Serving Gateway</i>
SMS	<i>Short Message Services</i>
SUI	<i>Stanford University Interin</i>
TDD	<i>Time Division Duplex</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
TTI	<i>Transmission Time Interval</i>
UL	<i>Uplink</i>
UL-SCH	<i>Uplink Shared Channel</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
UTRA	<i>Universal Terrestrial Radio Access</i>
UTRAN	<i>Universal Terrestrial Radio Access Network</i>
W-CDMA	<i>Wideband Code Division Multiple Access</i>

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Espectro dos canais UHF de TV 14 à 43.	2
Figura 2: Espectro dos canais UHF de TV 44 à 69.	2
Figura 3: Evolução das tecnologias.	10
Figura 4: Compartilhamento de célula no <i>release 8</i> , LTE e LTE-A.	11
Figura 5: Cronologia do <i>release 3GPP</i>	11
Figura 6: Arquitetura do UMTS.	13
Figura 7: Arquitetura UTRAN.	15
Figura 8: Multiportadora <i>release 8</i>	18
Figura 9: Release 9 com multiportadora e o MIMO no <i>downlink</i> e a multiportadora.	19
Figura 10: <i>Release 10</i> com 4 portadoras e com taxa de 168 Mbps.	19
Figura 11: Arquitetura básica LTE EPS.	23
Figura 12: Estrutura dos canais lógicos, de transporte e físicos no LTE.	26
Figura 13: Transmissão e recepção dos dados com MIMO.	29
Figura 14: Espectro 2,5 GHz para o LTE Brasil.	31
Figura 15: Técnica OFDM.	33
Figura 16: Transmissor e receptor OFDMA.	34
Figura 17: Diagrama de bloco da DFT – OFDM.	37
Figura 18: Transmissão utilizando OFDMA x SC-FDMA.	38
Figura 19: Constelação da modulação PSK.	39
Figura 20: Constelação da modulação QPSK.	40
Figura 21: Constelação da modulação QAM.	41
Figura 22: Curva de taxa de erro de bit (BER) para as modulações QPSK, 16 QAM, e 64 QAM.	42
Figura 23: Codificador convolucional com dois registradores.	43
Figura 24: Gráfico de treliça.	43
Figura 25: Decodificador <i>turbo code</i>	44
Figura 26: Gráfico do <i>throughput</i> na camada física do LTE.	55
Figura 27: Máxima eficiência espectral do LTE.	57
Figura 28: Variação do <i>throughput</i> pela distância para largura de banda de 5 MHz.	65
Figura 29: Variação do <i>throughput</i> pela distância para largura de banda de 10 MHz.	65
Figura 30: Variação do <i>throughput</i> pela distância para largura de banda de 15 MHz.	66
Figura 31: Variação do <i>throughput</i> pela distância para largura de banda de 20 MHz.	66
Figura 32: Gráfico do <i>throughput</i> na camada física do LTE faixa 700 MHz.	73
Figura 33: Máxima eficiência espectral do LTE faixa de 700 MHz.	74
Figura 34: Variação do <i>throughput</i> pela distância para largura de banda de 5 MHz.	78
Figura 35: Variação do <i>throughput</i> pela distância para largura de banda de 10 MHz.	78
Figura 36: Variação do <i>throughput</i> pela distância para largura de banda de 15 MHz.	79
Figura 37: Variação do <i>throughput</i> pela distância para largura de banda de 20 MHz.	79
Figura 38: <i>Software</i> desenvolvido para realizar o <i>link budget</i>	82
Figura 39: Terceira parte do <i>software</i> onde é possível calcular o número de estações rádio bases para cobrir uma determinada área.	83
Figura 40: Local de interesse para cobertura utilizando sistema LTE.	84
Figura 41: Parâmetros utilizados para frequência de 2,5 GHz.	85
Figura 42: Relação <i>throughput</i> X distância para a largura de banda escolhida.	87

Figura 43: Resultado do número de estações rádio bases no <i>software</i> para frequência de 2,5 GHz.....	87
Figura 44: Região de interesse com as 7 estações rádio bases distribuídas.	88
Figura 45: Região de interesse com as 7 estações plotadas no <i>radio mobile</i>	89
Figura 46: <i>Link</i> estabelecido dentro das conformidades entre <i>site 1</i> e <i>mobile 1</i>	90
Figura 47: Diagrama de irradiação vertical da antena omnidirecional.....	91
Figura 48: Diagrama de irradiação horizontal da antena omnidirecional.	91
Figura 49: Cobertura da região de interesse com 7 estações rádio bases.	92
Figura 50: Cobertura na faixa de 2,5 GHz com setorização.....	93
Figura 51: Diagrama de irradiação vertical da antena setorial.	94
Figura 52: Diagrama de irradiação horizontal da antena setorial.	94
Figura 53: Parâmetros utilizados para frequência de 700 MHz.	95
Figura 54: Relação <i>throughput</i> X distância para a largura de banda escolhida.	97
Figura 55: Resultado do número de estações rádio bases no <i>software</i> para frequência de 700 MHz. ..	97
Figura 56: Cobertura da região de interesse com 2 estações rádio bases – <i>site 1</i> e <i>site 5</i>	98
Figura 57: Cobertura na faixa de 2,5 GHz com setorização.....	99
Figura 58: Diagrama de irradiação vertical da antena setorial.	100
Figura 59: Diagrama de irradiação horizontal da antena setorial.....	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparativo da taxa de <i>downlink</i> e <i>uplink</i> nas tecnologias UMTS, HSPA e HSPA+.....	17
Tabela 2: Faixa de operação do LTE em 2,5 GHz.	31
Tabela 3: Faixa de operação do LTE em 700 MHz.	32
Tabela 4: Valores dos parâmetros empíricos do modelo SUI.	51
Tabela 5: Largura de banda e subportadoras LTE.	53
Tabela 6: Tabela de <i>throughput</i> para as modulações QPSK, 16 QAM e 64 QAM para faixa de 2,5 GHz.	54
Tabela 7: Taxa de código de modulação.	59
Tabela 8: <i>Throughput</i> considerando a taxa de código de modulação.	60
Tabela 9: SNR para cada modulação e taxa de código de modulação.	62
Tabela 10: Raio máximo para cada modulação, taxa de código e SNR.....	64
Tabela 11: Resumo de todos os parâmetros calculados para as larguras de banda de 5 MHz – 20 MHz.	67
Tabela 12: Tabela de <i>throughput</i> para as modulações QPSK, 16 QAM e 64 QAM para faixa de 700 MHz.....	72
Tabela 13: <i>Throughput</i> considerando a taxa de código de modulação.	75
Tabela 14: SNR para cada modulação e taxa de código de modulação.	76
Tabela 15: Raio máximo para cada modulação, taxa de código e SNR.....	77
Tabela 16: Resumo de todos os parâmetros calculados para as larguras de banda de 5 MHz – 20 MHz.	80
Tabela 17: Resultados obtidos para frequência de 2,5 GHz.....	85
Tabela 18: Coordenadas dos <i>sites</i> criados na região de interesse.	88
Tabela 19: Resultados obtidos para frequência de 700 MHz.	95

RESUMO

O sistema *Long Term Evolution* (LTE) pertence ao sistema da 4ª geração de telefonia (4G). Ele é padronizado pelo 3GPP e utiliza diversas tecnologias para melhorar o desempenho de transmissão de dados. O mesmo permite uma flexibilidade para dispositivos móveis, possibilitando uma alta taxa de dados na faixa de 50 Mbps a 100 Mbps, além de admitir acesso a diversos serviços multimídias. O estudo apresenta resultados de implantação de uma rede LTE na cidade de Campinas, São Paulo, Brasil, utilizando a faixa de 700 MHz comparando-a com a faixa de 2,5 GHz. Através do cálculo de *link budget* para o sistema LTE, é possível destacar informações como *throughput* e raio da célula de cobertura, além de outras informações. O *software radio mobile* foi utilizado para fins de comprovação de resultados.

Palavras-chave: LTE, 3GPP, 4G e MIMO.

ABSTRACT

The Long Term Evolution (LTE) system belongs to the 4th generation phone system. It is standardized by 3GPP and utilizes several technologies to improve the performance of data transmission. This permits flexibility for mobile devices, which enables a high data rate in the range of 50 Mbps to 100 Mbps, and admit access to various multimedia services. The study presents the results of deploying an LTE network in the city of Campinas, São Paulo, Brazil, using the 700 MHz band by comparing it to the 2.5 GHz band. By calculating the budget for the LTE system link is information as possible to highlight throughput and cell coverage radius, and other information. The Radio Mobile software was used for verification of results.

Keywords: LTE, 3GPP, 4G and MIMO.

SUMÁRIO

RESUMO	12
ABSTRACT	13
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OBJETIVO	3
1.2 JUSTIFICATIVA.....	3
1.3 METODOLOGIA	4
1.4 ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	4
2. SISTEMAS DE TELECOMUNICAÇÕES.....	6
2.1 EVOLUÇÃO DAS TECNOLOGIAS.....	6
2.2 3GPP - <i>GENERATION PARTNERSHIP PROJECT</i>	10
2.2.1 CRONOLOGIA – RELEASES 3GPP	11
2.2.2 ITENS DESTACADOS PELO 3GPP PARA O LTE.....	12
2.3 UMTS – <i>UNIVERSAL MOBILE TELECOMMUNICATION SYSTEM</i>	12
2.3.1 ARQUITETURA DA REDE UMTS.....	12
2.3.2 ARQUITETURA UTRAN.....	14
2.3.2.1 INTERFACE IU	14
2.3.2.2 INTERFACE IUR.....	14
2.4 W-CDMA	15
2.5 HSPA	15
2.6 HSPA+.....	17
3. LTE - <i>LONG TERM EVOLUTION</i>	21
3.1 ARQUITETURA DE REDE	22
3.2 ARQUITETURA EPS (<i>EVOLVED PACKET SYSTEM</i>)	22
3.3 ARQUITETURA DE PROTOCOLOS	25
3.3.1 CANAIS FÍSICOS.....	26
3.3.2 CANAIS DE TRANSPORTE.....	27
3.3.3 CANAIS LÓGICOS.....	28
3.4 MIMO (<i>MULTIPLE-INPUT MULTIPLE-OUTPUT</i>)	28
3.5 SDMA (<i>SPACE-DIVISION MULTIPLE ACCESS</i>).....	30
3.6 FREQUÊNCIA ADOTADA PARA O LTE NO BRASIL.....	30
3.7 <i>DOWNLINK</i> LTE	33
3.7.1 OFDM (<i>ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION MULTIPLEXING</i>)	33

3.7.2	OFDMA (<i>ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION MULTIPLE ACCESS</i>)	34
3.8	<i>UPLINK</i> LTE.....	36
3.8.1	SC-FDMA (<i>SIGLE CARRIER FREQUENCY DIVISION MULTIPLE ACCESS</i>)	36
3.9	PRINCIPAIS MODULAÇÕES DO LTE.....	38
3.9.1	PSK (<i>PHASE SHIFT KEYING</i>)	38
3.9.2	QAM (<i>QUADRATURE AMPLITUDE MODULATION</i>).....	40
3.10	CODIFICAÇÃO E DECODIFICAÇÃO DE CANAL.....	42
3.10.1	CODIFICADOR CONVOLUCIONAL	42
3.10.2	CODIFICADOR <i>TURBO-CODE</i>	44
4.	PROJETO DA REDE LTE	45
4.1	<i>LINK BUDGET</i>	45
4.2	<i>LINK BUDGET</i> PARA <i>DOWNLINK</i> E <i>UPLINK</i> EM 2,5 GHZ	47
4.2.1	<i>LINK BUDGET</i> PARA <i>DOWNLINK</i>	47
4.2.2	<i>LINK BUDGET</i> PARA <i>UPLINK</i>	48
4.2.3	DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA LTE EM 2,5 GHZ	49
4.2.4	CÁLCULO DE <i>THROUGHPUT</i> MÁXIMO.....	52
4.2.5	CÁLCULO DA MÁXIMA EFICIÊNCIA ESPECTRAL	55
4.2.6	CÁLCULO DA CAPACIDADE DO CANAL E DA RELAÇÃO SINAL RUÍDO	57
4.2.7	RAIO MÁXIMO EM FUNÇÃO DA MODULAÇÃO E SNR.....	62
4.3	<i>LINK BUDGET</i> PARA <i>DOWNLINK</i> E <i>UPLINK</i> EM 700 MHZ.....	68
4.3.1	<i>LINK BUDGET</i> PARA <i>DOWNLINK</i>	68
4.3.2	<i>LINK BUDGET</i> PARA <i>UPLINK</i>	69
4.3.3	DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA LTE EM 700 MHZ.....	70
4.3.4	CÁLCULO DE <i>THROUGHPUT</i> MÁXIMO.....	72
4.3.5	CÁLCULO DA MÁXIMA EFICIÊNCIA ESPECTRAL	73
4.3.6	CÁLCULO DA CAPACIDADE DO CANAL E DA RELAÇÃO SINAL RUÍDO EM 700 MHZ	74
4.3.7	RAIO MÁXIMO EM FUNÇÃO DA MODULAÇÃO E SNR EM 700 MHZ.....	76
5.	SIMULAÇÃO DO SISTEMA LTE	82
5.1	ESTUDO DE CASO.....	84
5.1.1	SISTEMA EM 2,5 GHZ.....	84
5.1.2	SISTEMA EM 700 MHZ.....	95
	CONCLUSÃO	101
	REFERÊNCIAS	103

1. INTRODUÇÃO

O tráfego de dados móveis aumenta exponencialmente a cada ano, sendo incentivado pelo crescimento do mercado com a adoção de *smartphones*, *tablets* e o crescente interesse por implementações de vídeos e aplicativos na internet. A crescente ascensão das classes sociais, também é um fator que deve ser levado em consideração. Hoje, o mundo não consegue ter controle sobre o crescimento tecnológico, da mesma forma, os seres humanos exigem cada vez mais de utilitários que proporcionem o seu bem-estar fazendo com que a comunicação seja rápida e eficaz. A captação de assinantes tornou-se algo internacional, assim os números de operadoras e empresas relacionadas ao mercado de telecomunicações se expandiram rapidamente, impulsionando um desenvolvimento acelerado no mercado.

Como tema da dissertação, o LTE (*Long Term Evolution*), ainda será muito discutido, assim este se torna um fator de exploração para desenvolvimentos de diversos sistemas, melhorias, propostas e projetos para as redes de telefonia brasileira. Pode-se também analisar o quão importante esse sistema será para o país, destacando fatores socioeconômicos. A aplicação desta dissertação torna-se um facilitador de recursos de conhecimento e implementação do sistema LTE.

A ANATEL (Agencia Nacional de Telecomunicações), durante o período de consulta pública, levantou a possibilidade de interferência do LTE na recepção da TV digital, já que as duas tecnologias estariam trabalhando com canais adjacentes.

Alguns institutos de pesquisa apresentaram resultados de testes de convivência entre o sistema de banda larga móvel (LTE) e o sistema de TV digital. Os estudos mostraram que é possível a operação dos dois sistemas, desde que aplicadas técnicas de mitigação [1], [2], [3].

A Figura 1 e Figura 2 mostram o espectro dos canais UHF em São Paulo sendo possível analisar canais com TV analógica e digital. Devido a ocupação dos canais de forma adjacente, a recepção se torna complexa. Os canais de 14 à 51 são canais nos quais a TV digital atuará, já o sistema LTE utilizará os canais 52 à 69.

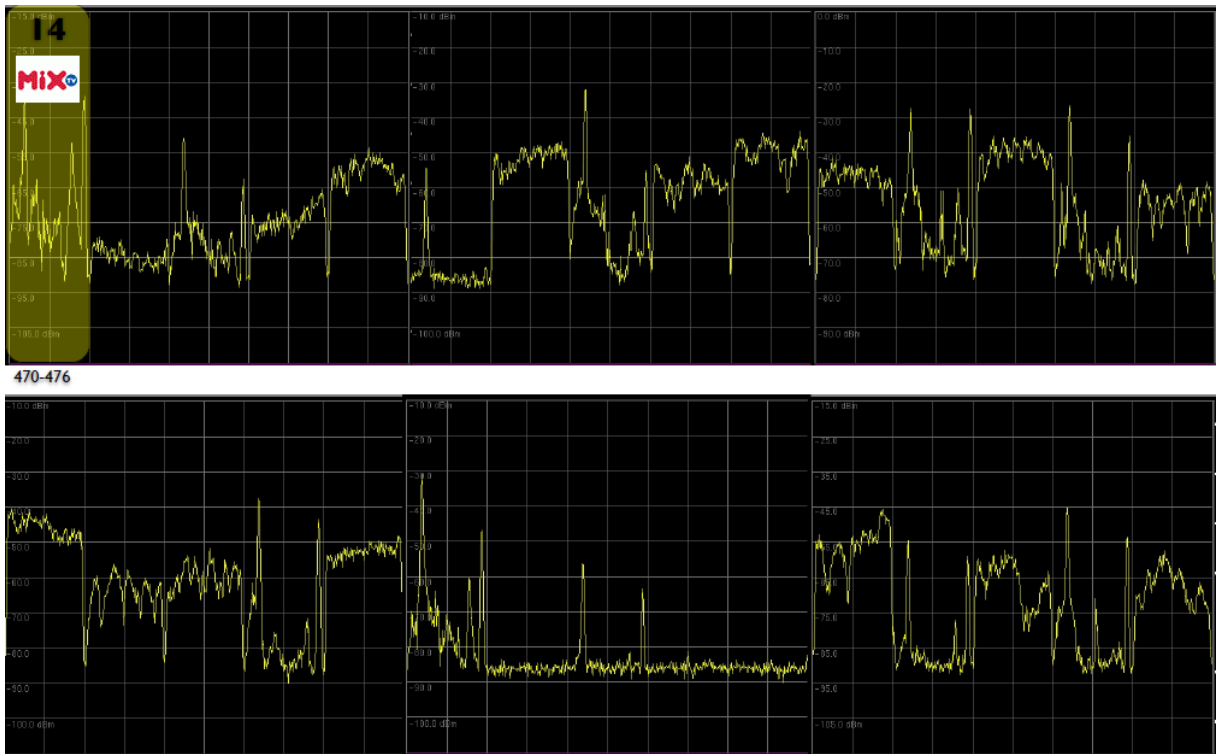


Figura 1: Espectro dos canais UHF de TV 14 à 43.

Fonte: Dados coletados pelo Laboratório de TV Digital da Universidade Presbiteriana Mackenzie.

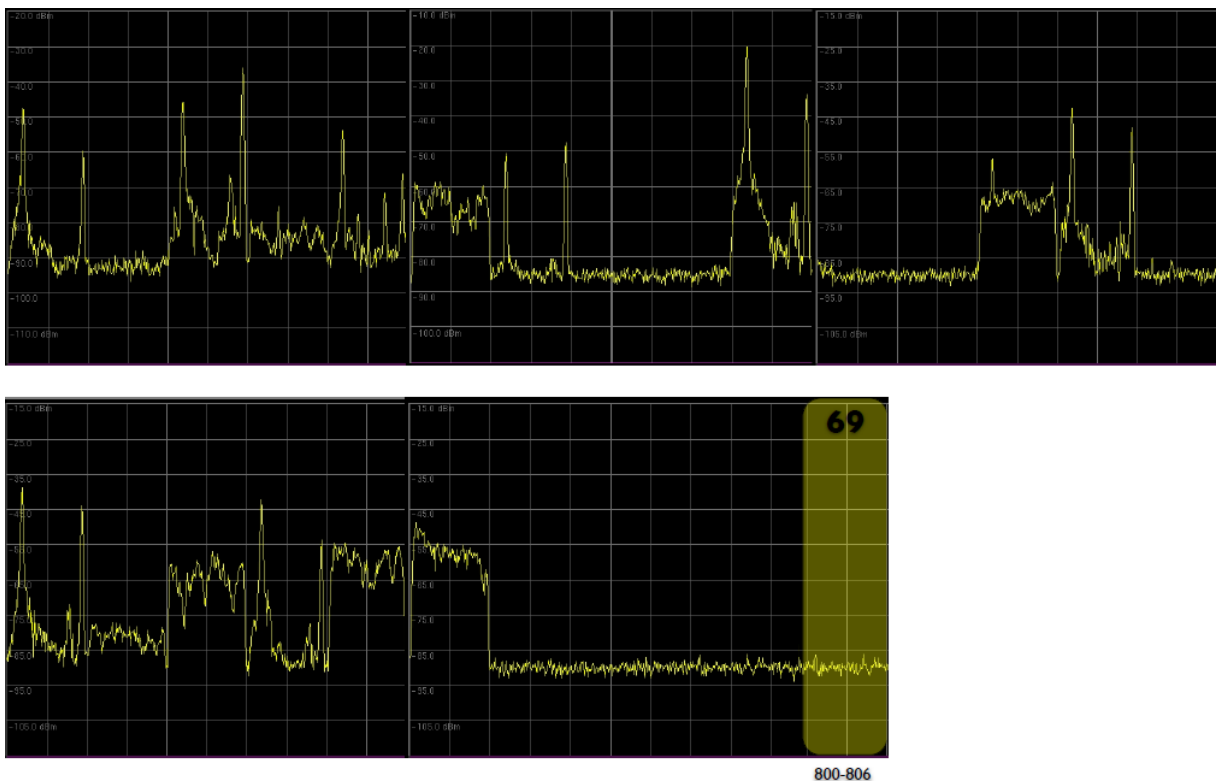


Figura 2: Espectro dos canais UHF de TV 44 à 69.

Fonte: Dados coletados pelo Laboratório de TV Digital da Universidade Presbiteriana Mackenzie.

1.1 OBJETIVO

O objetivo geral deste trabalho é analisar o comportamento do sistema LTE em 700 MHz e 2,5 GHz e fazer a comparação dos dois através do cálculo de *link budget*. Mostrar como o sistema em cada faixa de frequência se comporta com o uso das modulações 4 PSK (*Phase Shift Keying*), 16 QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) e 64 QAM e, através do software *radio mobile*, observar a cobertura possível de uma região escolhida como estudo de caso com as duas frequências abordadas para o sistema LTE no Brasil.

1.2 JUSTIFICATIVA

No Brasil, a realidade digital das redes móveis é complexa. Nas redes, onde as taxas não são altas e já não suportam mais o tráfego exigido, os equipamentos utilizados já estão fora dos padrões de uso e demandam atualizações e novas implantações para expansão.

Atualmente, o 3G (3ª geração de telefonia) é o sistema de maior capacidade de transmissão de dados implantado no Brasil que utiliza da tecnologia W-CDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*) e a HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*), que oferecem taxas de aproximadamente 7 Mbps de *download*.

Estudar o LTE, 4G (4ª geração de telefonia), possibilita comparar o sistema de telefonia do Brasil com relação aos outros países, mostrando o que deverá ser feito e quais serão as dificuldades para a implementação do sistema no país.

O desenvolvimento do LTE visa fornecer melhorias de desempenho, além de reduzir os custos na transmissão de informação e a eficiência de energia, possibilitando uma maior disseminação de serviços móveis por todo país. Padronizada pelo 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) essa tecnologia apresenta diferenciais como a utilização do MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) que é usado para aumentar a taxa de bits na transmissão através de fluxos diferentes em duas ou mais antenas, possibilitando a utilização da mesma frequência e tempo com sinais de referência diferentes; e a utilização de células grandes e pequenas que possibilitam uma melhor cobertura em nível de sinal para evitar regiões de sombra [28], [29].

Para a implementação do LTE no Brasil com a faixa 700 MHz prevista pela ANATEL, algumas incompatibilidades devem ser resolvidas. O primeiro problema a ser solucionado no Brasil, para atuação do 4G, é a instalação ou desenvolvimento de redes com maior capacidade de dados, os 100 Mbps oferecidos pelo LTE, atendendo assim todos os que tiverem disponível um aparelho receptor adequado para operar nesta faixa [3].

O segundo obstáculo é atuar na faixa de 700 MHz, que hoje é utilizada pelo sistema de televisão. Para esta aplicabilidade, será necessário o cancelamento do sistema de televisão, além da troca e a compra da nova faixa de frequência por parte das operadoras, o que atrasará ainda mais as implantações e aumentará discussões entre governo e empresas privadas que já compraram a faixa de 2,5 GHz [13], [14].

1.3 METODOLOGIA

A dissertação consiste de uma parte teórica, que será obtida de recursos como livros, artigos acadêmicos e científicos, dissertações, e outros meios que julgados importantes para o decorrer da pesquisa.

Métodos computacionais serão utilizados para fins de simulações dos resultados encontrados e embasamento da pesquisa teórica. O *software radio mobile* é utilizado para mostrar visualmente os resultados obtidos no cálculo de *link budget*, a fim de se analisar a cobertura de uma região selecionada.

A metodologia utilizada para a realização deste trabalho foi a seguinte:

- Pesquisa sobre as características de transmissão e propagação do sistema móvel celular;
- Análise das resoluções impostas pela ANATEL para a operação do sistema LTE no Brasil;
- Análise dos testes de laboratório e campo da interferência do LTE na faixa de 700 MHz no sistema de TV digital;
- Pesquisa de métodos de propagação para cálculo de *Link Budget*;
- Projeto e montagem de um software para cálculo de *Link Budget*;
- Estudo do *software radio mobile* para cobertura utilizando um sistema LTE;
- Análise dos resultados e conclusão;
- Análise de possíveis pesquisas posteriores.

1.4 ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em cinco capítulos, sendo:

O capítulo 1 apresenta a introdução, objetivos, justificativa, metodologia e a estruturação e organização do trabalho.

O capítulo 2 relata a evolução das tecnologias, passando da primeira geração de telefonia até chegar à quarta geração de telefonia.

O capítulo 3 relata todo o sistema LTE, mostrando quais são os padrões utilizados, arquitetura do sistema, a tecnologia MIMO, a frequência de operação e os protocolos usados.

No capítulo 4 é apresentado o cálculo de *link budget* do sistema LTE operando em 2,5 GHz e posteriormente em 700 MHz, a fim de mostrar o *throughput* do sistema, relação sinal ruído e o raio máximo da célula para operação do sistema nas duas frequências.

O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos no capítulo 4 através do *software radio mobile*, a fim de mostrar um comparativo do sistema operante nas duas frequências 700 MHz e 2,5 MHz de forma computacional.

E por fim, é apresentado a conclusão do trabalho e algumas propostas futuras para pesquisa.

2. SISTEMAS DE TELECOMUNICAÇÕES

Neste capítulo aborda de forma cronológica a evolução das tecnologias móveis no Brasil. Inicia-se pelos sistemas analógicos que tem como característica a transmissão de voz, e chegam aos sistemas móveis digitais, onde o fator velocidade e capacidade são primordiais para atender as aplicabilidades da quarta geração de telefonia.

2.1 EVOLUÇÃO DAS TECNOLOGIAS

Desde as experiências realizadas por Marconi em 1890, a comunicação de rádio vem sendo aprimorada a fim de estabelecer agilidade à troca de informação. Para entender todos os conceitos envolvidos na 4ª geração de telefonia móvel, com ênfase no LTE, é necessário, analisar todas as etapas e evoluções acarretadas nas tecnologias, o que possibilita saber as melhorias que deverão ser estabelecidas no país e as inconsistências que já existem e dificultam o avanço deste sistema no Brasil. A rede de comunicação brasileira já passou por diversas averiguações e adaptações, porém essas modificações existem desde a implementação dos primeiros sistemas telefônicos.

DAHLMAN, E. et al, 2011, mostra que com o advento da comunicação digital na década de 1980, a oportunidade de desenvolver a 2ª geração de telefonia (2G) de comunicações móveis com padrões e sistemas baseados em tecnologia digital, se tornou propício. Com a tecnologia digital veio uma oportunidade para aumentar a capacidade dos sistemas, para dar uma qualidade mais consistente no serviço e para desenvolver dispositivos muito mais úteis e portáteis.

A telefonia celular tardou a chegar ao Brasil. Inicialmente, faltou decisão governamental para introduzi-la. Após a tomada de decisão, realizaram-se as licitações. A de São Paulo foi anulada e realizada uma segunda licitação que foi contestada na Justiça. Todo esse processo atrasou a implantação do serviço. Ainda se percebe que esses são problemas atuais existentes no país, não foi um simples ocorrido de 1992, no qual mesmo com a tecnologia GSM (*Global System for Mobile Communications*) disponível no mercado, o Brasil opta por instalar o sistema analógico AMPS (*Advanced Mobile Phone System*), que é baseado na tecnologia FDMA (*Frequency Division Multiple Access*) e que teve após atualizações uma capacidade máxima de 832 canais [21].

O AMPS aplicado no Brasil não operou na faixa entre 825 e 870 MHz, faixa que foi destinada a telefonia móvel, porém ocupada com outros serviços da aeronáutica e televisão. Portanto, sua capacidade foi reduzida a apenas 500 canais e após a liberação de espectro foi possível usar sua extensão [21].

Existem fatores que são limitantes para um sistema de telefonia móvel, entre eles está à interferência de sinal. As causas incluem, por exemplo, chamada em andamento na célula vizinha, operação de outra estação base na mesma faixa de frequência e a existência de outro móvel na mesma célula. A interferência é causada por sinais de radiofrequência (RF) onde os sinais interferentes podem ter sido transmitidos intencionalmente ou não intencionalmente, ou seja, pode ser resultado de algum problema da fonte geradora. Não é necessário que o sinal de interferência esteja exatamente na mesma frequência do sistema operante, portanto sinais de RF com potências altas que estejam perto da frequência utilizada podem afetar a operação do receptor sem fio, causando problemas na recepção.

Com o crescimento da população e o aumento da utilização de dispositivos móveis, fez-se necessário a alocação e reuso de frequência, já que o espectro é limitado. Um grupo de canais de rádio é alocado a cada estação base para atender uma determinada área. Para se estabelecer uma menor interferência, a rede de telefonia celular é dividida em células, que estão relacionadas com a intensidade do sinal, condições de propagação, tráfegos, densidade populacional e estruturação da rede móvel como um todo. Baseado nessas características pode-se analisar o crescimento da rede, ou seja, o tráfego e/ou a quantidade de assinantes numa determinada região. Para se implantar uma rede utilizam-se *clusters*, que são conjuntos de células que estão concebidas em uma frequência que pode ser ou não reutilizada por outra célula, ou seja, o reuso de frequências deve ser inferido para manter ou ocupar o espectro de forma mais adequada. Em um sistema AMPS, se adotava *clusters* com 21 células, a fim de reduzir a interferência.

As tecnologias da comunicação móvel são divididas em gerações: a 1G (1ª geração de telefonia), os sistemas analógicos de rádio móvel da década de 1980; a 2G (2ª geração de telefonia), os primeiros sistemas móveis digitais; e a 3G os primeiros sistemas móveis de manipulação de dados em banda larga. O LTE é um sistema pertencente ao 4G, o qual proporciona uma capacidade e velocidade satisfatórias para a transferência de informação, com taxas de 50 Mbps para *downlink* e 100 Mbps para *uplink* [20].

A 2G é marcada pelo sistema GSM (*Global System for Mobile*), que é o padrão mais popular de telefonia móvel. Em GOLDSMITH, A., 2005, a tecnologia GSM é usada por mais de um bilhão de pessoas em mais de 200 países. O GSM diferencia-se muito de seus precedentes sendo que o sinal e os canais de voz são digitais, admite oito usuários em *slots* de tempo para cada canal de 200 kHz, utiliza dois conjuntos de frequências na banda dos 900 MHz, sendo 890-915 MHz, utilizado para as transmissões do terminal e o segundo nos 935-960 MHz, para

as transmissões da rede, além de operar nas faixas de 1800 MHz e 1900 MHz. O GSM é um sistema que trabalha com múltiplo acesso por divisão de frequência das portadoras, ou seja, trabalha com FDMA (*Frequency Division Multiple Access*) e FDD (*Frequency Division Duplex*). O sistema trabalha com 125 portadoras separadas em 200 kHz, assim totaliza um sistema com 1000 canais em cada sentido de transmissão [21].

Com a 2G foi possível fornecer serviços de dados através das redes de comunicação móvel. Os serviços de dados primários foram introduzidos no 2G, ou seja, mensagens de texto SMS (*Short Message Services*) e serviços de comutação de circuitos de dados, permitindo e-mail e aplicativos de outros dados, inicialmente, a uma taxa de dados de pico de 9,6 kbps [19].

O GSM, como já mencionado, é o sistema com maior utilização no país, porém com a exigência dos usuários por mais velocidade, acessos rápidos a internet e outras formas de comunicação, o sistema 3G surge para suprir estas necessidades. Com o 3G foi possível transmitir e receber dados até dez vezes mais rápido do que com o GSM significando que a velocidade e a qualidade das informações foram melhoradas. Sobre tudo, este sistema permite a realização de vídeo chamada, ou seja, um serviço que, até então, no 2G não era possível devido à taxa de transferência de dados.

Com o advento do 3G e da interface de rádio de maior largura de banda - UTRA (*Universal Terrestrial Radio Access*) vieram possibilidades para uma série de novos serviços que foram apenas insinuados com 2G [13].

Em DAHLMAN, E. et al., 2007 é apresentado que o sistema 3G veio capacitar as tecnologias anteriores, permitindo taxas elevadas de acesso por comunicações UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*), HSDP (*High Speed Downlink Packet Access*), HSPA (*High-Speed Packet Access*) e W-CDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*).

No Brasil, o UMTS não foi adotado em larga escala, pois como as operadoras demoraram a implantar o 3G, as redes celulares já chegaram ao Brasil com o HSPA (*High Speed Packet Access*). O padrão HSPA modificou a antiga estrutura do UMTS em alguns aspectos. Dentre eles, a criação de três canais de alta velocidade para o envio de dados, flexibilidade na modulação dos canais e o escalonamento rápido entre os usuários que recebem as informações. Dos três canais criados, dois foram para envio de dados (um de ida, e outro de volta) e o terceiro para sinalização [29].

O Brasil desde 2004 dispõe da tecnologia 3G, e atua com taxas de transmissão de dados próximas a 2,4 Mbps. As taxas do 3G podem chegar de 1,8 Mbps a 7,2 Mbps, dependendo das

técnicas utilizadas e da implantação, porém, deve-se levar em consideração características morfológicas.

Através da tecnologia MIMO, foi possível melhorar o 3G permitindo que a transmissão de informações aconteça através de várias antenas, tanto no transmissor quanto no receptor. Várias antenas significam uma melhoria na taxa de transmissão, além de facilitar para as operadoras que muitas vezes não precisam aumentar a faixa de frequência, nem alterar a potência de transmissão. Com o MIMO é possível um aumento na eficiência tanto na quantidade de *bits* transmitidos por unidade de frequência, quanto na robustez do sinal. Por essas vantagens, a tecnologia MIMO está presente em todos os novos padrões de transmissão de dados sem fio, como o padrão 802.11n, HSPA+, LTE, *LTE Advanced*, e WIMAX [29], [31].

Com a evolução da tecnologia usada para armazenar os dados, a velocidade dos processadores, o tamanho reduzido dos dispositivos, o consumo baixo de energia, o custo reduzido, monitores de alta resolução e sensores com alta precisão, tudo combinado com um *backbone* de alta velocidade à *internet*, muitas vezes baseados em redes de fibra óptica, vê-se que todos esses facilitadores estão no local para caminhar lado a lado com o avanço da tecnologia de comunicações móveis, tal como os sistemas do 4G, entre eles o LTE [58].

Comparada a outras tecnologias, o 4G possui uma maior abrangência de rede comparada ao 3G. No 4G todas as redes funcionam conjuntamente, ou seja, caso os serviços neste sistema fiquem congestionados, o dispositivo móvel passará automaticamente para o 3G, alterando assim a hierarquia de ocupação sucessivamente, diminuindo a taxa de dados utilizada, mas evitará a perda total da informação. O Brasil tem estado preocupado com o futuro das telecomunicações e o uso da faixa de 700 MHz que atualmente pertence à televisão aberta. Segundo a Anatel relatou para SET (Sociedade Brasileira de Engenharia de Televisão), a convivência entre sistemas de banda larga sem fio (LTE/4G) e TV digital estará livre de interferências conjuntas prejudiciais aos serviços de um modo geral. Existe uma importância muito grande para a implantação do 4G, mas a interferência se torna um problema que deve ser estudado. Ao se instalar em faixas elevadas diferentes da de 700 MHz, as distâncias entre as células são menores gerando um maior custo para implantação dos equipamentos.

O LTE oferece maior capacidade de *downlink* e *uplink*, opera com antenas MIMO, possui *handoff* automático para outras tecnologias e usa os métodos de modulação OFDMA e FDMA.

A Figura 3 mostra a sequência cronológica e o aumento da taxa de dados nos sistemas de telecomunicações.

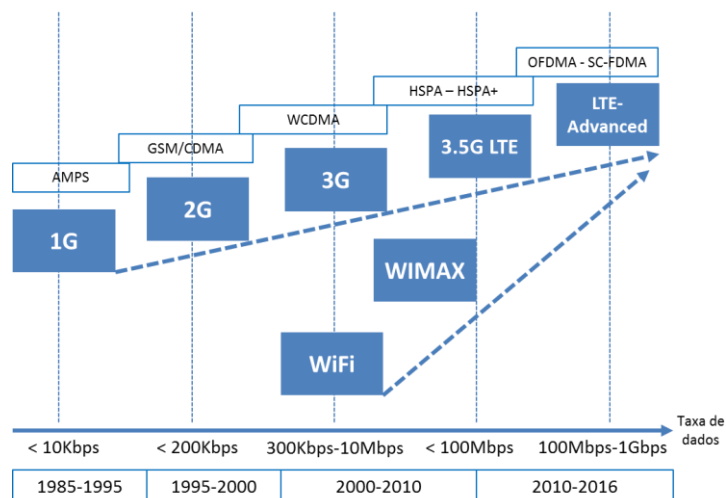


Figura 3: Evolução das tecnologias.

Fonte: Adaptado de UMTS Networks Services [28].

2.2 3GPP - GENERATION PARTNERSHIP PROJECT

O 3GPP é composto por grupos de telecomunicações que são responsáveis por desenvolvimento de padrões de telecomunicações, sendo criado em 1998 [49].

As tecnologias do 3GPP estão em constante evolução através de gerações de sistemas celulares/*mobile* comerciais e desde a conclusão do *release 8* o LTE e as especificações *evolved packet core* se tornaram o ponto focal para sistemas móveis além do 3G [34].

O foco principal para todas as versões 3GPP é fazer com que o sistema seja compatível com todas as demais tecnologias já desenvolvidas e as futuras, garantindo assim que o sistema operante e os equipamentos utilizados não sejam interrompidos e fiquem inoperantes em situações pertinentes [49].

Um exemplo destacado pelo 3GPP é enfatizado priorizando o funcionamento nos grupos de trabalho sobre a compatibilidade entre LTE e LTE-Advanced, ou seja, um terminal LTE-A funciona em uma célula LTE e um terminal LTE funciona em uma célula LTE-A, conforme mostra Figura 4.

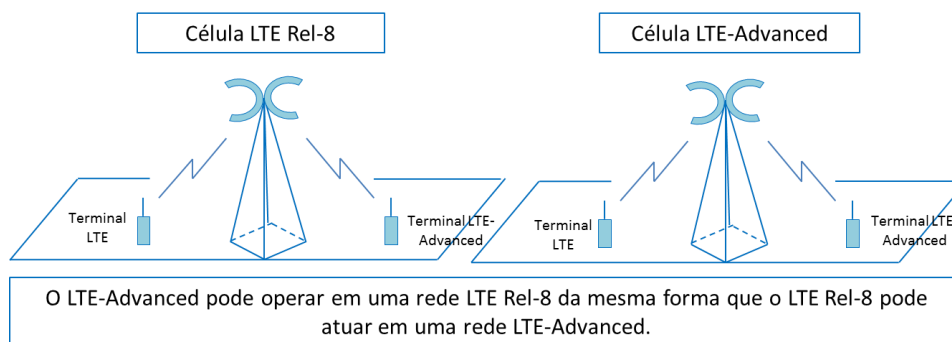


Figura 4: Compartilhamento de célula no *release 8*, LTE e LTE-A.

Fonte: Adaptado de <http://www.3gpp.org/LTE-Advanced>.

2.2.1 CRONOLOGIA – RELEASES 3GPP

As especificações dadas pelo 3GPP garantem que os sistemas fiquem adequados para um desenvolvimento e implementação rápida com *roaming* global de equipamentos. Os *releases* do 3GPP podem ser observados na Figura 5.

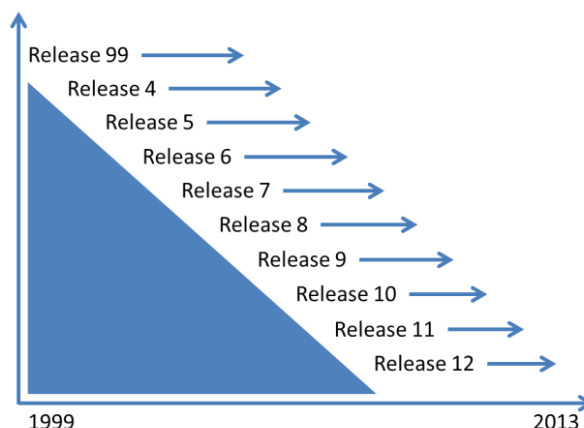


Figura 5: Cronologia do *release* 3GPP.

Fonte: Adaptado de <http://www.3gpp.org/releases>.

Todos esses avanços têm proporcionado um alto grau de continuidade nos sistemas, permitindo que estejam preparados para as subsequentes tecnologias. A evolução tem permitido altas taxas, QoS positivos e um ganho satisfatório de eficiência [56].

Cada tecnologia de acesso de rádio 3GPP na ordem cronológica da Figura 5 visa reduzir a complexidade e evitar a fragmentação das tecnologias oferecidas.

2.2.2 ITENS DESTACADOS PELO 3GPP PARA O LTE

Os itens destacados pelo 3GPP para a aplicação da tecnologia LTE são [49]:

- Operação total em comutação de pacotes – tratar todo tráfego por *packet switching*;
- RTT (*Round Trip Time*) abaixo de 10 ms e *Access Delay* abaixo de 300 ms;
- Taxa para o *uplink* de até 50 Mbps;
- Taxa de pico para o *downlink* de até 100 Mbps;
- Possibilidade de *handover* e *reselection* com tecnologias legadas;
- Alocação de diferentes larguras de banda para possibilitar a construção da compatibilidade e interoperabilidade com outras tecnologias;
- Necessidade de assegurar a continuidade da competitividade do sistema 3G para o futuro;
- Demanda dos usuários por maiores taxas de dados e qualidade de serviço;
- Demanda contínua por redução de custos (CAPEX e OPEX);
- Baixa complexidade;
- Evitar a fragmentação desnecessária de tecnologias para pares e operação de banda não pareada.

2.3 UMTS – UNIVERSAL MOBILE TELECOMMUNICATION SYSTEM

No final da década de 80, a União Internacional de Telecomunicações – ITU propôs ideias para os sistemas móveis de telefonia futuros, o qual pertence hoje a 3G e foi denotada de IMT-2000 (*International Mobile Telephony 2000*) [26].

O IMT-2000 exigiu uma nova alocação do espectro de frequências. No Brasil, a ANATEL reservou a faixa de 1,9 GHz para os sistemas 3G.

Para atender aos requisitos do IMT-2000 várias propostas foram desenvolvidas. Dentre as desenvolvidas foram aceitas a UTRA (*Universal Terrestrial Radio Access*) e W-CDMA (*Wideband CDMA*), juntamente com a CDMA2000. As propostas UTRA e W-CDMA estão unificadas na mesma especificação, chamada UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) [20], [30].

2.3.1 ARQUITETURA DA REDE UMTS

A arquitetura UMTS é formada pelos seguintes elementos:

- Equipamento de usuário – (*User Equipment – UE*);

- Rede universal de acesso de RF terrestre (*Universal Terrestrial Radio Access Network* – UTRAN);
- Rede de suporte (*Core Network* – CN).

A arquitetura UMTS utiliza a mesma rede de suporte dos sistemas GPRS e EDGE, o que consiste numa estratégia de migração muito interessante, ou seja, de fácil implementação.

A principal diferença entre esses sistemas está nos protocolos e interfaces aéreas. A arquitetura UMTS pode ser representada simplificada conforme Figura 6 [27], [30].

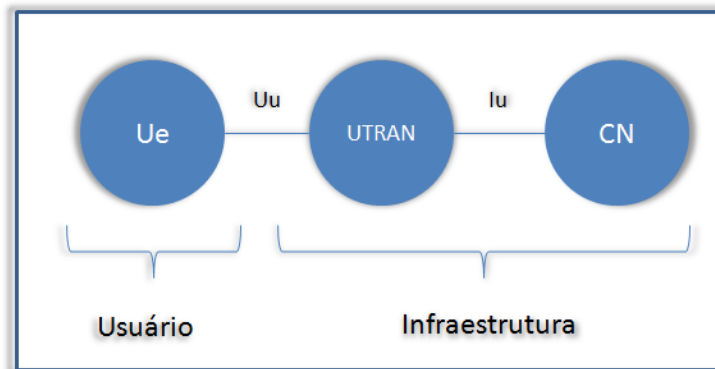


Figura 6: Arquitetura do UMTS.

Fonte: Adaptado de <http://www.3gpp.org/Releases>.

onde,

UE: *User Equipment*, ou equipamento do usuário. É o terminal móvel e seu módulo de identidade de serviços do usuário (USIM) equivalente ao *SIM card* dos terminais GSM.

UTRAN: *UMTS Territorial Rádio Access Network*, ou rede terrestre de acesso rádio do UMTS baseada no *Wideband Code Division Multiple Access* (W-CDMA).

CN: *Core Network* ou núcleo da rede que suporta serviços baseados em comutação de circuitos e comutação de pacotes.

Uu e Iu: Interface entre as entidades.

Os protocolos utilizados na comunicação entre entidades nesta arquitetura procuram manter compatibilidade com os definidos atualmente para o GSM, principalmente no que se refere à parte do usuário [20], [37].

2.3.2 ARQUITETURA UTRAN

A arquitetura UTRAN é formada por subsistemas de rede de RF (*Radio Network Subsystem – RNS*), conectados à CN (rede de suporte). Essa conexão é feita pela interface Iu. A Figura 7 mostra a arquitetura UTRAN.

Os subsistemas RNS integram os canais de RF UMTS à rede, sendo implementado pela CN. O subsistema RNS é formado por dois elementos:

1- Controlador da rede de RF (*Radio Network Controller – RNC*) o qual é responsável por gerenciar recursos de radiofrequência, controlar os nós B, localizar o equipamento de usuário e gerenciar a mobilidade do usuário.

2- Nó B (*Node B*): Conecta a interface aérea com a infraestrutura celular. É responsável por controlar os sinais de RF, realizar o espalhamento espectral dos códigos W-CDMA, controlar os canais físicos e mapeá-los na portadora de RF [20], [37].

O RNC se conecta com o CN através da interface Iu, com outro RNC através da interface Iur e possivelmente com outras BSCs da rede GERAN pela interface Iur-g. A rede GERAN (*GSM EDGE Radio Access Network*) é a rede que antecede a 3G, que inclui, portanto, GSM, GPRS e EDGE [20].

2.3.2.1 INTERFACE Iu

Conecta CN e UTRAN. Suas principais funções são:

- Interconectar o subsistema RNS com os pontos de acesso à rede CN dentro de uma PLMN, independente dos fabricantes desses componentes;
- Suportar todos os serviços UMTS;
- Permitir o interfuncionamento com o sistema GSM [47].

2.3.2.2 INTERFACE Iur

Permite a troca de informação de sinalização entre RNCs em um mesmo UTRAN, seus objetivos são:

- Suportar interconexões de RNCs de diferentes fabricantes;
- Separar as funcionalidades entre redes de RF e de transporte, para que novas tecnologias possam implementar mudanças nos dois aspectos de forma específica;
- Realizar o interfuncionamento entre as redes UTRAN e GERAN [39], [44].

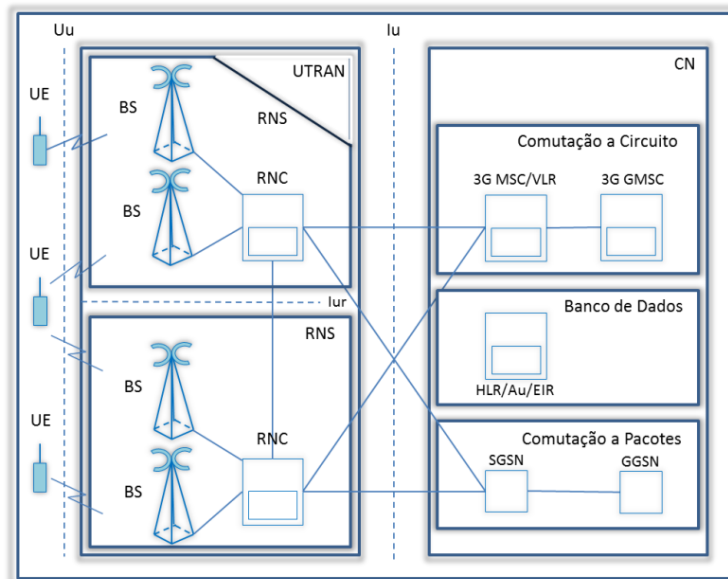


Figura 7: Arquitetura UTRAN.

Fonte: Adaptado de <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialW-CDMA>.

2.4 W-CDMA

A interface rádio Uu entre o terminal do usuário e sua rede terrestre de acesso rádio (UTRAN) é baseada no *Wideband Code Division Multiple Access* (W-CDMA). O W-CDMA é uma radiofrequência padrão baseada nos mesmos conceitos do CDMA o que possibilita ao UMTS atingir taxas de até 2 Mbps para *download* e *upload*, devido a portadora de 5 MHz.

O W-CDMA opera em dois modos distintos, são eles FDD e TDD. No FDD os *links* de subida e descida utilizam canais de 5 MHz diferentes e separados por uma frequência de 190 MHz, já no TDD, o *link* de subida e descida compartilham a mesma banda de 5 MHz [31], [62].

O uso de TDD e FDD faz com que a transmissão seja mais eficiente, uma vez que cada modo é mais adequado a determinadas situações. Por exemplo, o TDD normalmente é utilizado em aplicações “assimétricas”, como serviços *web*, onde o número de dados enviados normalmente é diferente da quantidade recebida.

2.5 HSPA

No *Release 99*, o padrão W-CDMA permite taxas de dados de até 384 Kbps. No entanto, quando o número de usuários e, conseqüentemente, os números de serviços aumentam, torna-se necessário fornecer maiores taxas de dados, ou seja, ter uma capacidade de rede maior [45].

Nos *Releases 5 e 6*, novas características foram sendo implementadas, um novo canal de transporte de *downlink* denominado HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*), entre a

estação base e o equipamento de usuário, melhorando assim o desempenho da rede de pacotes devido à redução significativa da latência e possibilidade de picos de transmissão de dados de até 14,4 Mbps; outra mudança é com relação ao canal de *uplink* denominado de HSUPA (*High Speed Uplink Packet Access*), o qual disponibiliza taxas de transmissão de dados maiores, latência reduzida e maior capacidade de transporte de dados, possibilitando picos de transmissão de dados de até 5,76 Mbps [51].

Os padrões HSDPA e HSUPA juntos são conhecidos como HSPA (*High Speed Packet Access*). Esse padrão unificado é utilizado na arquitetura UMTS, porém diferentemente do W-CDMA, oferece velocidade mais elevada e suporta uma quantidade de usuários maior [18], [19].

O HSDPA pode oferecer taxas de transferência de dados de até 14,4 Mbps, enquanto que o HSUPA oferece velocidade máxima de 5,76 Mbps. Níveis tão altos se devem, em outros motivos, à redução do TTI (*Transmission Time Interval*), que varia entre 1 e 3 milissegundos, enquanto que em outros padrões esta medida gira em torno dos 10 milissegundos.

A arquitetura desse padrão sofreu poucas mudanças com relação ao W-CDMA. Isso possibilita a operação do HSDPA mesmo em ambientes onde nem todas as células possuem a funcionalidade instalada. No W-CDMA, ambos os serviços de voz e dados podem usar simultaneamente a mesma portadora. Da mesma forma, os serviços baseados no HSDPA também podem usar a mesma frequência de portadora [17], [65].

As principais características do canal compartilhado de transmissão do HSDPA são:

- Transmissão através de canal compartilhado e multi-código;
- Modulação de alta ordem;
- Intervalo de tempo de transmissão reduzido (*short Transmission Time Interval - TTI*);
- Enlace adaptativo de alto desempenho (*fast link adaptation*);
- Arranjo rápido (*fast scheduling*).

As principais características do canal compartilhado de transmissão do HSUPA são:

- Transmissão multi-códigos;
- Intervalo de tempo de transmissão reduzido (*short Transmission Time Interval - TTI*);
- Mecanismo híbrido de requisição e repetição automática (*fast hybrid Automatic Repeat reQuest – ARQ*);
- Despacho rápido (*fast scheduling*).

2.6 HSPA+

O HSPA+ é uma atualização do HSPA, que de forma natural foi sendo implantada a fim de sustentar o crescente número de usuários e, conseqüentemente, o aumento de capacidade, que em sua totalidade pode trabalhar com taxas elevadas podendo chegar até 168 Mbps para *downlink* e 22 Mbps para *uplink*.

Comparada as tecnologias antecedentes, o HSPA+ que inicialmente ocorre no *Release 7* do 3GPP, supera todas as características técnicas e operacionais, havendo, como apresentado na Tabela 1, um aumento considerável na capacidade de dados e voz. Na seqüência, *release 8*, o HSPA+ introduz a primeira fase da utilização de multiportadora, a qual utiliza duas portadoras de 5 MHz o que permite dobrar a taxa de dados nas células. No *Release 9*, ocorre a padronização desta tecnologia, e passa a suportar multiportadoras a 10 MHz. A adoção de 4 portadoras de 20 MHz no *downlink* só ocorre no *Release 10*, sendo possível chegar a taxa de pico dos 168 Mbps, que é a taxa máxima suportada por essa tecnologia [42], [48].

No *Release 7*, o HSPA+ aumentou as taxas de pico de dados para 28 Mbps com a adoção do MIMO ou chega a 21 Mbps utilizando modulações na ordem de 64 QAM, o que sustenta um aumento da capacidade de voz [47].

Além de taxas maiores de transferência de dados, o HSPA+ também oferece outras vantagens, como menor tempo para o estabelecimento de chamadas, uso do VoIP (Voz sobre Protocolo IP) e melhor suporte a aplicações que exigem grandes quantidades de informações.

Dentre os fatores que colaboram para as velocidades do HSPA+ está o uso do MIMO uma técnica que utiliza mais de uma antena para transmissão no mesmo canal, mantendo o uso de portadoras de 5 MHz. O MIMO será descrito com mais detalhes na seção 3.4.

Outra característica que influência no aspecto da velocidade é o uso de modulação 64-QAM para *downlink* e 16-QAM para *uplink*, que favorecem taxas de transferência maiores.

Tabela 1: Comparativo da taxa de *downlink* e *uplink* nas tecnologias UMTS, HSPA e HSPA+.

Tecnologia	Máximo <i>Downlink</i> Nominal	Máximo <i>Uplink</i> Nominal
UMTS	2 Mbps	384 Kbps
HSPA	14,4 Mbps	5,76 Mbps
HSPA+	168 Mbps	22 Mbps

Fonte: <http://www.3gpp.org>.

No *release* subsequente, a adoção de multiportadora de 5 MHz, Figura 8, permitiu um maior canal de dados comparado com o HSPA e, conseqüentemente, proporcionou uma rede de banda larga móvel mais consistente e com maior número de usuários dentro de uma mesma

célula. Nessas condições, as taxas de pico do sistema aumentaram juntamente com a largura de banda e atingiram taxas de até 42 Mbps no *downlink*. O conceito de multiportadora permite que os usuários tenham respostas mais rápidas da rede, ou seja, as elevadas taxas de dados permitem uma troca de dados mais rápida [33].

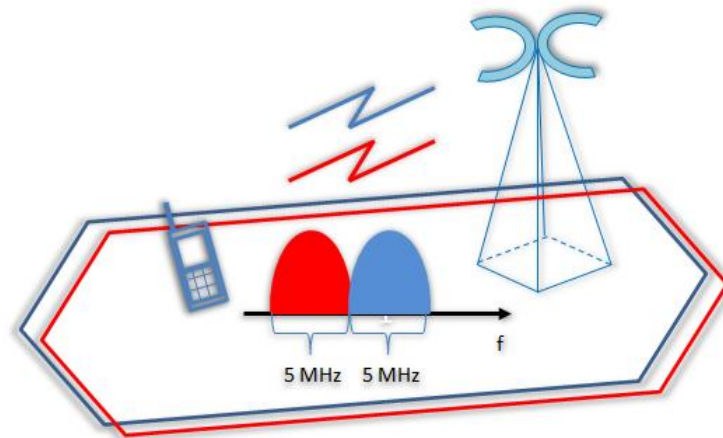


Figura 8: Multiportadora release 8.

Fonte: Adaptado de <http://www.3gpp.org/Release-8>.

O uso da multiportadora aproveita melhor os recursos do espectro através do balanço dinâmico de carga entre as portadoras, bem como faz com que ocorra um melhoramento da eficiência de entroncamento, o que permite maior desempenho da rede, na Figura 9 características do *release 9* são apresentadas.

A evolução do HSPA+ se torna mais robusta nos dois seguintes *Releases*. No *release 9*, o foco era fazer uma combinação das bandas de 2,1 GHz e 900 MHz, e suportar também multiportadora no *uplink*. Essas características além de aumentar a capacidade permitem as operadoras um melhor aproveitamento dos recursos disponíveis do espectro, abrangendo a utilização simultânea de várias bandas. Neste *Release*, no *downlink* é possível atingir uma taxa de pico na ordem de 84 Mbps através da utilização de um MIMO 2x2 e multiportadora, sendo que no *uplink* pode chegar a 23 Mbps de pico utilizando multiportadora UL [33].

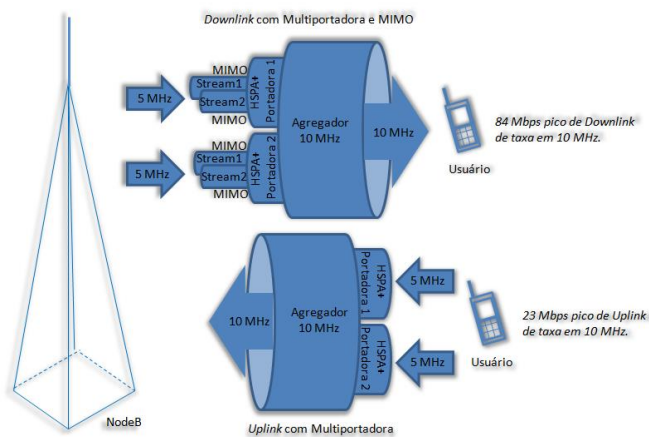


Figura 9: Release 9 com multiportadora e o MIMO no *downlink* e a multiportadora.

Fonte: Adaptado de <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialhspamais>.

O aumento da capacidade de *uplink* é uma característica bastante positiva, principalmente, para as operadoras que devem suportar uma massa de conteúdos gerados pelos usuários em cada célula.

A taxa de 168 Mbps, só se torna possível no *Release 10*, onde é possível agregar 4 portadoras de 5 MHz cada, totalizando assim 20 MHz, analisar Figura 10. Nesse release existe a utilização da multiportadora e MIMO no *downlink* e a multiportadora no *uplink* [43], [44].

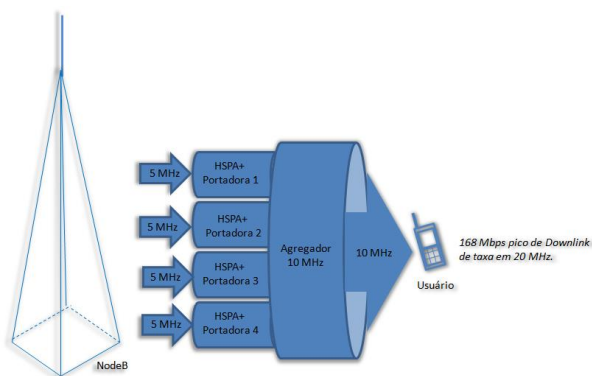


Figura 10: Release 10 com 4 portadoras e com taxa de 168 Mbps.

Fonte: Adaptado de <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialhspamais>.

Todas as melhorias ocorridas nos *releases*, onde está presente o HSPA+ fizeram com que ocorresse uma melhora significativa para o usuário conforme abaixo:

- "Always-on" permite que o usuário permaneça por mais tempo no modo conectado, sem comprometer a duração da bateria, através do recurso *Continuous Packet Connectivity* (CPC);
- Melhor experiência relacionada ao tempo de resposta, devido a menor latência, com redução de 50% do tempo de transição entre os estados “conectado” e “inativo”;
- Aumento do tempo de conversação em até 50% por meio de voz CS sobre HSPA (VoIP ou voz CS sobre HSPA) comparado ao W-CDMA [30].

O HSPA+ é compatível com as redes na qual envolvem os *releases 99, release 5 e release 6*, e usa o mesmo espectro e recursos de rede para oferecer um desempenho melhor. O rádio e o núcleo da rede já existente podem ser atualizados para HSPA+ sem a necessidade de novos equipamentos na rede, ou seja, é feita uma atualização do *software*. O W-CDMA e os dispositivos HSPA+ podem fazer *roaming* de maneira transparente entre as redes W-CDMA, HSPA e HSPA+ [30], [31].

3. LTE - LONG TERM EVOLUTION

A Quarta Geração da telefonia móvel tem início com a tecnologia LTE e é gerenciada pelas normas estabelecidas no grupo 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*). Apesar de na visão da ITU (*International Telecommunication Union*), entidade ligada à Organização das Nações Unidas, o LTE não cumprir com todas as exigências técnicas necessárias para ser considerada um padrão 4G, comercialmente, a tecnologia é aceita e está operante em diversos países, sendo que no Brasil o mesmo já está sendo implantado com suas limitações e em diferente frequência [7].

Assim como a tecnologia HSPA+, o padrão LTE chama a atenção pelas velocidades com as quais se pode trabalhar dependendo da combinação de recursos implementados na rede e do aparelho do usuário, pode-se chegar a taxas de 300 Mbps para *download* e 75 Mbps para *upload*, porém essas taxas ainda não foram implementadas [59].

O LTE pode ser classificado com relação a velocidade, o nível de compatibilidade de aparelhos e o sistema:

- LTE Nível 1: *download* de até 10 Mbps; *upload* de até 5 Mbps;
- LTE Nível 2: *download* de até 50 Mbps; *upload* de até 25 Mbps;
- LTE Nível 3: *download* de até 100 Mbps; *upload* de até 50 Mbps;
- LTE Nível 4: *download* de até 150 Mbps; *upload* de até 50 Mbps;
- LTE Nível 5: *download* de até 300 Mbps; *upload* de até 75 Mbps.

Independente da categoria estas velocidades dificilmente são alcançadas em sua totalidade, pois existem uma série de fatores que determinam as taxas em rede LTE. A quantidade de antenas em uso de maneira simultânea MIMO, a largura de banda canal que, quanto maior a largura de banda disponível, maior é a taxa de transferência de dados, a frequência de operação, a modulação usada e técnicas de correção de erro [35], [68].

O LTE também se diferencia pela forma de acesso. Enquanto as tecnologias UMTS e HSPA são baseadas no padrão W-CDMA, o LTE utiliza as especificações OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), que distribui as informações das transmissões entre diversos subconjuntos paralelos de portadoras, sendo este outro aspecto que favorece velocidades maiores para o *downlink* [18].

Para o *uplink*, o LTE utilizado é o SC-FDMA (*Single Carrier Frequency Division Multiple Access*) que é uma especificação semelhante ao OFDMA, mas que consegue reduzir

o consumo de potência, fazendo com que o uso de energia por parte dos dispositivos conectados também diminua. Apesar do nome, o SC-FDMA também pode utilizar subconjuntos de portadoras [32], [68].

Apesar das características do LTE serem bastante inovadoras para as comunicações já existe uma atualização da mesma, denominada de *LTE Advanced*. Esta é compatível com os requisitos da ITU para uma tecnologia 4G, além de ofertar uma taxa de até 1 Gb/s para *download* e 500 Mb/s para *upload* [33].

Para o entendimento do sistema global do LTE exige-se uma abordagem cronológica dos fatos iniciando pelo Sistema UMTS, posteriormente a tecnologia HSPA e HSPA+, e os *Releases*. Além dos itens citados anteriormente, é necessário abordar a arquitetura da rede LTE a arquitetura de protocolos LTE, frequência de operação e os aspectos de interface aérea levando em consideração a implementação do MIMO, OFDMA e SC-FDMA [20], [68].

3.1 ARQUITETURA DE REDE

Existe uma tendência para que as redes mudem os serviços que utilizam CS (*circuit switch*) para uma rede baseada totalmente em IP, PS (*packet switch*). Hoje, isto já ocorre nas redes fixas, onde as operadoras já migraram seus serviços de telefonia para PS, oferecendo ambos os acessos de internet e telefonia via DSL ou *cable modem*. Nas redes sem fio isto ainda não ocorre, já que se deve ao fato da arquitetura das redes existentes 2G, 3G entre outras ainda serem otimizadas para CS, tanto no acesso quanto no core [19], [32].

Por outro lado, com o aumento das bandas de transmissão, o 3GPP optou que a próxima geração de telefonia móvel seria baseada somente em PS. Como resultados, apareceram duas frentes de pesquisa, o programa LTE, focado no *design* de uma nova arquitetura para a rede de acesso e interface ar, e o programa SAE (*Service Architecture Evolution*). Hoje estes dois programas foram combinados em uma única fonte de pesquisa, o EPS (*Evolved Packet System*) [32].

3.2 ARQUITETURA EPS (EVOLVED PACKET SYSTEM)

A arquitetura de rede EPS é modelada para permitir a integração com outras redes de comunicação baseadas no protocolo IP. Essa tecnologia também permite conectividade com outras formas de acesso, tanto as padronizadas pelo 3GPP como as de banda larga fixa, como a DSL (*Digital Subscriber Line*). A Figura 11 mostra a arquitetura básica da EPS.

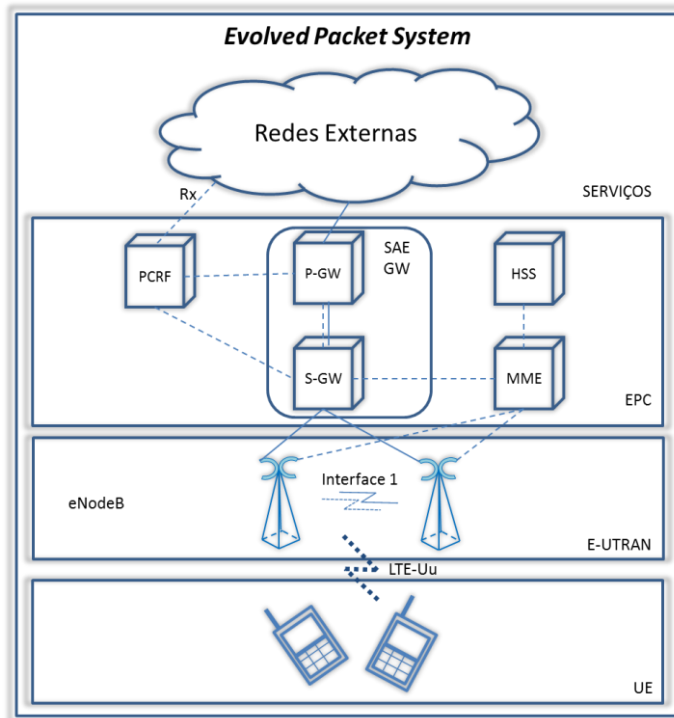


Figura 11: Arquitetura básica LTE EPS.

Fonte: http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialintlte/pagina_4.asp.

A rede utilizada no LTE é considerada mais simples do que as utilizadas em redes anteriores, uma vez que os pacotes são processados e gerenciados no núcleo EPC. Esse processo produz respostas mais rápidas, melhorando a taxa de transmissão e o tempo de latência [26].

Uma característica comum em redes sem fio é a rápida variação na taxa de transmissão de dados, ocasionada pelas características do meio de transmissão e fenômenos climáticos. A fim de contornar esse obstáculo, a arquitetura EPS faz uso de retransmissão no *eNodeB* para gerenciar tal variação, onde adota algoritmos de controle de fluxo de dados no núcleo principal da arquitetura EPC que auxiliam na redução do *overflow* ou perda de dados [16].

O fato de utilizar o protocolo IP cria a possibilidade de intensificar a convergência entre serviços, viabilizando aplicações em tempo real, característica importante e enfatizada nas normas do 3GPP. Com a presença de redes fixas, o LTE pode funcionar de modo complementar, onde o usuário pode transitar entre a rede móvel e a rede fixa, tendo uma maior facilidade e comodidade para os diversos serviços de comunicação.

Através da utilização dos protocolos IP na arquitetura, a transmissão de vídeo HD (*High Definition*) é possível, já que o sistema tem características para operar em tempo real e permite sincronizações entre os dispositivos interconectados, o que favorece uma maior qualidade de serviços.

Diferente dos outros *releases* ocorrentes no 3GPP, no LTE, a arquitetura de rede tem 4 grandes domínios conforme nota-se na Figura 11, mostrada anteriormente, e são descritos na sequência:

- UE – *User Equipment*;
- E-UTRAN – *Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network*;
- EPC – *Evolved Packet Core Network*;
- *Services*.

As grandes diferenças podem ser verificadas na E-UTRAN e no EPC (*Evolved Packet Core*). Na E-UTRAN, tem-se a remoção RNC (*Radio Network Controller*). De fato, a E-UTRAN é composta de uma rede MESH de *eNodeBs* que se comunicam através da interface 1 mostrada na Figura 11. No EPC diversos equipamentos como MME, S-GW, HSS, P-GW e PCRF, que serão definidos a seguir [16].

O MME (*Mobility Management Entity*) é o artefato de controle principal no EPC que tem como funções a autenticação, segurança, gerenciamento de mobilidade, gerenciamento de perfil do usuário, conexão e autorização de serviços.

O S-GW (*Serving Gateway*) é o elemento que faz o gerenciamento e comutação dos túneis do *User Plane* e o P-GW (*Packet Data Network Gateway*) é o roteador entre o EPS e redes de pacotes externas ele também tem a função de filtragem e controle de pacotes requeridos para os serviços em questão, ou seja, o P-GW aloca endereços IP para o UE, onde este endereço é usado para a comunicação com outros *hosts* em redes externas, que no caso pode ser a *internet*.

O PCRF (*Policy and Charging Resource Function*) é o componente da rede LTE responsável pelo PCC (*Policy and Charging Control*). O PCRF decide quando e como se deve gerenciar os serviços em termos de QoS e dá informações ao P-GW. Desta forma, as políticas de controle podem ser configuradas para um determinado serviço. E o HSS (*Home Subscriber Server*) é o banco de dados de registro do usuário.

É importante notar que a arquitetura lógica apresentada é relativamente simples na sua descrição geral e comparada as arquiteturas das gerações anteriores. Entretanto, cada elemento, se estudado detalhadamente, executa uma grande quantidade de funções e procedimentos conjuntamente, ou seja, o número de elementos na arquitetura diminuiu, porém as funções de cada elemento na arquitetura aumentaram.

3.3 ARQUITETURA DE PROTOCOLOS

A 3GPP adotou como premissas iniciais no desenvolvimento dos protocolos a interface rádio da rede *evolved* UTRAN e os seguintes pontos:

- Simplificar a arquitetura de protocolos;
- Inexistência de canais dedicados com objetivo de se obter uma camada MAC (*Media Access Control*) simplificada;
- Evitar a existência de funções similares entre os elementos de acesso e os elementos de *core*;

O projeto do LTE é completamente baseado em canais compartilhados e de *broadcast*, não havendo mais nenhum canal dedicado para trafegar dados a usuários específicos. Esta escolha aumenta a eficiência da interface aérea, fazendo com que a rede seja capaz de controlar a utilização dos recursos da interface aérea, de acordo com a demanda de cada usuário em tempo real, não existindo mais a necessidade de alocação de recursos fixos para cada usuário, independentemente dos requerimentos necessários [56].

Os canais lógicos no sistema proveem os serviços e funções requisitados pelas altas camadas (NAS-*Non Access Stratum*) para a entrega de aplicações e serviços. Os canais lógicos por sua vez, são mapeados pelos canais de transporte na camada 2, através de elementos RRC (*Radio Resource Control*).

Estes canais são responsáveis pelo controle e gerenciamento do fluxo de dados, tais como retransmissões, controle de erros e priorização. O tráfego gerado pelos usuários é gerenciado na camada 2 pelo protocolo PDCP (*Packet Data Convergence Protocol*). A interface ar e as conexões da camada física são controladas e gerenciadas pela camada 1, através do RLC (*Radio Link Control*) e MAC (*Media Access Control*) [56].

Os canais da interface rádio no LTE podem ser separados em dois tipos, canais físicos e sinais físicos. Os canais físicos correspondem a um conjunto de elementos que carregam informações originadas pelas altas camadas (NAS). Os sinais físicos correspondem a um conjunto de elementos utilizados unicamente pela camada física, que não carregam informações originadas pelas altas camadas. A Figura 12 mostra a distribuição dos canais lógicos, de transporte e físicos no LTE.

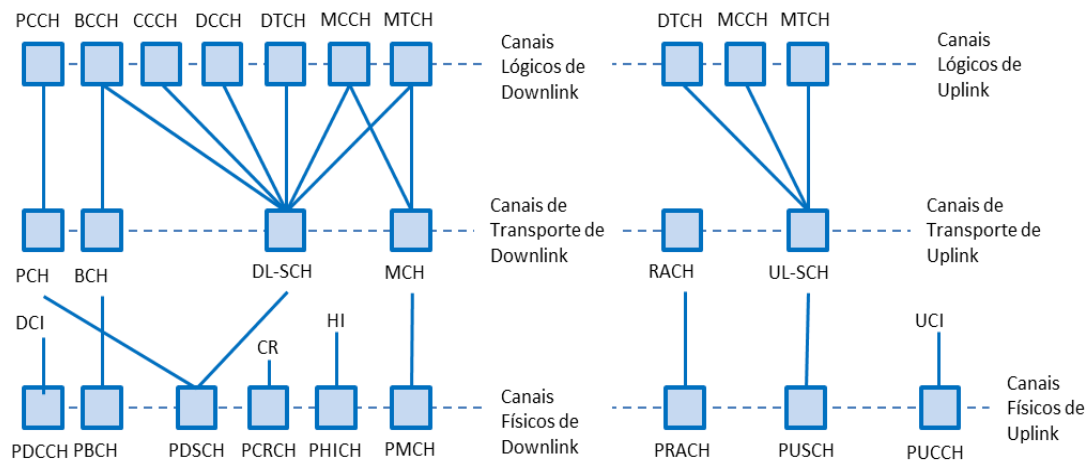


Figura 12: Estrutura dos canais lógicos, de transporte e físicos no LTE.

Fonte: Traduzido de ANRITSU [56].

3.3.1 CANAIS FÍSICOS

Os canais físicos correspondem a um conjunto de elementos que transportam as informações provenientes das camadas mais altas. Os sinais físicos são utilizados somente pela camada física e não carregam nenhum tipo de informação das camadas mais altas [56].

Canais físicos de *downlink*:

- *Physical Downlink Control Channel (PDCCH)* - Carrega as principais informações de alocação de recursos;
- *Physical Broadcast Channel (PBCH)* - Carrega informações de acesso dos usuários que solicitam acesso à rede;
- *Physical Downlink Shared Channel (PDSCH)* - Carrega informações do DL-SCH;
- *Physical Control Format Indicator Channel (PCFICH)* - Informa ao usuário o número de símbolos OFDM utilizados no PDCCH;
- *Physical Hybrid Indicator Channel (PHICH)* - Respostas de ACK/NAKs (*Acknowledge / Negative Acknowledge*) das transmissões de *uplink*;
- *Physical Multicast Channel (PMCH)* - Carrega informações de *multicast*;

Sinais Físicos de *downlink*:

- Sinal de referência;
- Sinal de sincronização.

Canais Físicos de *uplink*:

- *Physical Random Access Channel* (PRACH) - Canal de *uplink* utilizado para funções de acesso randômico;
- *Physical Uplink Shared Channel* (PUSCH) - Carrega as informações do UL-SCH;
- *Physical Uplink Control Channel* (PUCCH) - Respostas de ACK/NAKs das transmissões de *downlink*.

Sinais Físicos de *uplink*:

- Sinal de referência de demodulação – Associado às transmissões de PUSCH ou PUCCH.

3.3.2 CANAIS DE TRANSPORTE

Com o objetivo de se reduzir a complexidade da arquitetura de protocolos do LTE, o número de canais de transporte foi reduzido. Isto se tornou possível através da utilização de canais compartilhados, e não mais dedicados [56].

Canais de transporte no *downlink*:

- *Paging Channel* (PCH) - Utilizado para transmitir PCCH;
- *Broadcast Channel* (BCH) - Canal de transporte mapeado pelo BCCH;
- *Downlink Shared Channel* (DL-SCH) - Principal canal para transferência de dados de *downlink*. Responsável pela alocação dinâmica dos recursos, através de verificações da modulação, codificação e potência de transmissão;
- *Multicast Channel* (MCH) - Utilizado na transmissão das informações do MCCH.

Canais de transporte no *uplink*:

- *Random Access Channel* (RACH) - Utilizado para requerimentos do acesso randômico;
- *Uplink Shared Channel* (UL-SCH) - Principal canal para transferência de dados no *uplink* - responsável pela alocação dinâmica dos recursos, através de verificações da modulação, codificação e potência de transmissão.

3.3.3 CANAIS LÓGICOS

Os canais lógicos podem ser classificados em canais lógicos de controle e canais lógicos de tráfego [47].

Canais lógicos de controle:

- *Paging Control Channel* (PCCH) - Utilizado para informações de *paging*;
- *Broadcast Control Channel* (BCCH) - Fornece informações sistêmicas para todos os terminais conectados na eNodeB;
- *Common Control Channel* (CCCH) - Utilizado para informações de acesso randômico;
- *Dedicated Control Channel* (DCCH) - Carrega informações específicas de controle para cada usuário (controle de potência, *handover*, etc);
- *Multicast Control Channel* (MCCH) - Transmissão de informações necessárias para a repetição de *multicast*.

Canais lógicos de tráfego:

- *Dedicated Traffic Channel* (DTCH) - Canal ponto a ponto (*uplink e downlink*) - Utilizado para transmitir dados aos usuários;
- *Multicast Traffic Channel* (MTCH) - Utilizado para transmissão de dados *multicast*.

3.4 MIMO (*MULTIPLE-INPUT MULTIPLE-OUTPUT*)

A tecnologia MIMO emprega o uso de múltiplas antenas contidas na transmissão e na recepção dos sistemas de comunicações sem fio. Esta tecnologia é capaz de oferecer ganhos significativos nas taxas de dados, sem a necessidade de se utilizar mais banda ou potência adicional para a transmissão dos sinais. Na Figura 13 é possível observar o sistema de transmissão e recepção utilizando a tecnologia MIMO [68].

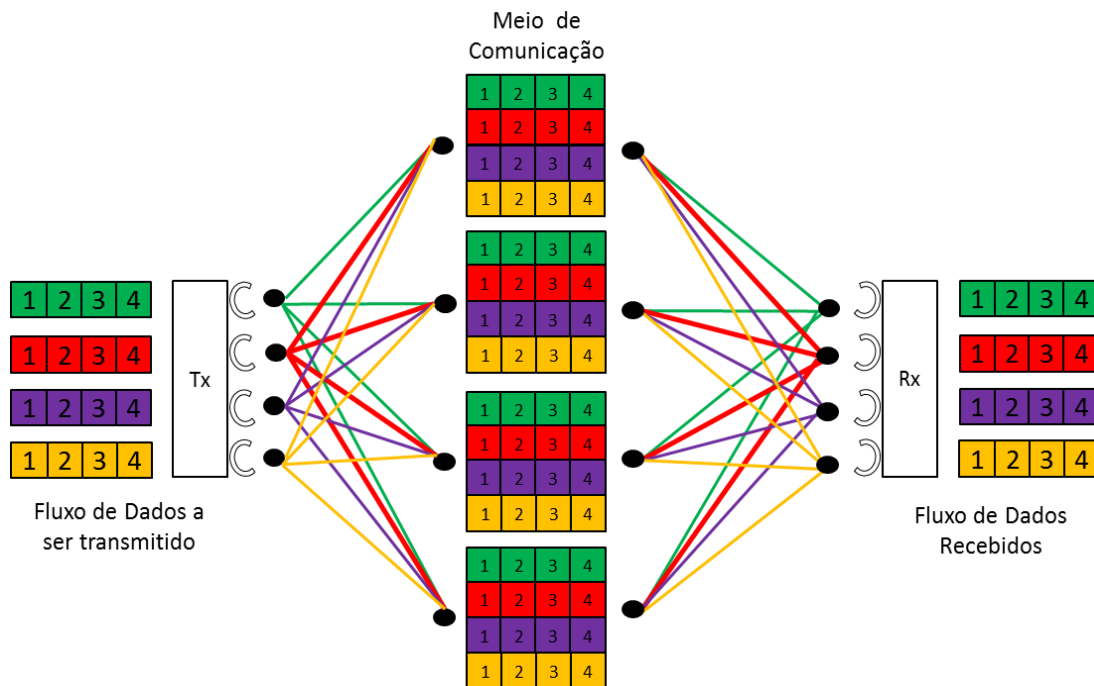


Figura 13: Transmissão e recepção dos dados com MIMO.

Fonte: Adaptado de BARTH, U. *3GPP Long Term Evolution - System Architecture Evolution Overview*, 2006.

A comunicação sem fio com a utilização desta tecnologia aproveita da propagação de multipercurso para aumentar a taxa de transmissão e o alcance, ou reduzir as taxas de erro por *bit* (eficiência espectral), através do envio e recebimento de mais de um sinal no mesmo canal ao mesmo tempo, ao invés de tentar eliminar os efeitos da propagação de multipercurso. A Figura 13 demonstra a transmissão e recepção dos dados com MIMO [56].

Embora este sistema aumente a complexidade do sistema em termos de processamento e o número de antenas necessárias, permite elevadas taxas de dados juntamente com uma maior eficiência espectral, como resultado.

Os esquemas empregados na tecnologia LTE variam entre o *uplink* e *downlink*. A razão para isto é o de manter o custo baixo do terminal, ou seja, existe um maior número de terminais do que estações bases. Com esta tecnologia, é comum empregar um maior número de antenas nas estações bases, já que o aparelho receptor móvel possuirá apenas uma única antena [56], [68].

Em funcionamento, vários terminais móveis podem transmitir simultaneamente no mesmo canal, ou canais, mas não interferem uns com os outros porque existem padrões de ortogonalidade entre eles. Esta técnica é também referida como domínio SDMA (*Space-Division Multiple Access*).

3.5 SDMA (*SPACE-DIVISION MULTIPLE ACCESS*)

O SDMA é uma técnica de acesso, usada em sistemas de comunicações móveis, que permite a utilização do mesmo conjunto de frequências de telefonia celular em uma determinada área de serviço.

Essa técnica aumenta a capacidade do sistema e a qualidade da transmissão do sinal, pois trabalha com feixes estreitos e múltiplas antenas. Através do uso de antenas inteligentes SDMA serve diferentes usuários dentro da mesma região, ou seja, duas células podem utilizar o mesmo conjunto de frequências desde que estejam separadas por uma distância mínima de reutilização [32].

Utilizando antenas com feixes estreitos, a energia de radiofrequência pode ter maior alcance na estação base. Esta propriedade do SDMA permite que as estações base tenham cobertura de rádio maior com menos energia irradiada. Além de permitir um maior ganho e qualidade na comunicação.

Nos sistemas tradicionais de rede de telefonia móvel, os sinais transmitidos na estação base irradiam em todas as direções dentro da célula, sem o conhecimento da localização da estação móvel. Na arquitetura SDMA os sinais se baseiam na localização do móvel, assim economiza recursos de rede e impede a transmissão do sinal redundante em áreas onde os dispositivos móveis estão atualmente inativos. Na estação base, o SDMA se adapta continuamente para o ambiente do rádio, proporcionando ao usuário sinais de *uplink* e *downlink* com melhor qualidade [32].

3.6 FREQUÊNCIA ADOTADA PARA O LTE NO BRASIL

Devido ao comportamento físico de operação dos meios eletromagnéticos, é sabido que a melhor frequência para operar o LTE é a faixa de 700 MHz. Porém no Brasil esta frequência ainda não está sendo utilizado, fato este que só será solucionado com o fim da transição da TV aberta analógica e liberação dos canais para a TV aberta digital. No país o *swith off* inicia em 2016 e irá até 2018.

O Ministério das Comunicações publicou a portaria 14 de 6/02/2013 que constitui diretrizes para adiantamento do processo de transição da TV Aberta analógica para a TV aberta digital no Brasil, além de solicitar a Anatel que inicie os estudos para disponibilizar a faixa de 698 MHz a 806 MHz para 4G.

A Anatel divulgou logo em seguida, dia 21 de fevereiro de 2013, um regulamento sobre a nova destinação da faixa de 700 MHz, onde ela recomenda a adoção do plano de banda da APT (*Asia Pacific Telecommunity*) que permite uso de 90 MHz (45+45 MHz) de espectro.

Enquanto se espera pela liberação da faixa de 700 MHz, a Anatel destinou para o 4G (Res. 544 de 11/08/2010) a faixa de frequências de 2,5 GHz a 2.690 MHz. O espectro nesta faixa de frequência, destinado para o LTE no Brasil, pode ser observado na Figura 14.

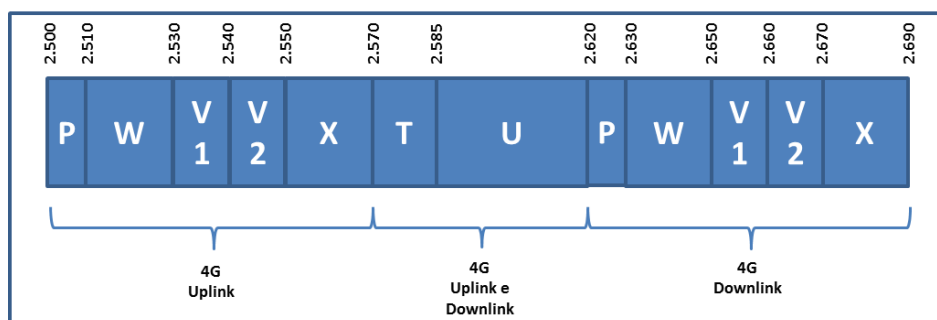


Figura 14: Espectro 2,5 GHz para o LTE Brasil.

Fonte: Adaptado de http://www.teleco.com.br/4g_freq.asp.

As faixas de frequências entre 2500-2570 MHz e 2620-2690 MHz (P, W, V e X) foram destinadas para operação FDD (canais separados para transmissão e recepção). Já as subfaixas T e U para operação TDD (transmissão e recepção no mesmo canal).

Tabela 2: Faixa de operação do LTE em 2,5 GHz.

Subfaixa (MHz)	Largura de banda (MHz)	Transmissão da	
		Estação móvel (MHz)	ERB (MHz)
P	10+10	2500-2510	2620-2630
W	20+20	2510-2530	2630-2650
V1	10+10	2530-2540	2650-2660
V2	10+10	2540-2550	2660-2670
X	20+20	2550-2570	2670-2690
T	15	2570-2585	
U	35	2585-2620	

Fonte: http://www.teleco.com.br/4g_freq.asp, 4G: Frequências e licitações 22/02/2013.

Tabela 3: Faixa de operação do LTE em 700 MHz.

Bloco	Largura de banda (MHz)	Faixa da transmissão da estação (MHz)	
		Móvel/Terminal	Base/Repetidora
Nº			
1	5+5	703 - 708	758 – 763
2	10+10	708 - 713	763 – 768
3		713 - 718	768 – 773
4	10+10	718 - 723	773 – 778
5		723 - 728	778 – 783
6	10+10	728 - 733	783 – 788
7		733 - 738	788 – 793
8	10+10	738 - 743	793 – 798
9		743 - 748	798 – 803

Fonte: Anatel, resolução Nº 625, de 11 de novembro, 2013 [53].

A Tabela 2 e Tabela 3 mostram, respectivamente, a faixa de operação do LTE em 2,5 GHz e 700 MHz.

De acordo com a resolução Nº 625, de 11 de novembro, 2013, que relata o regulamento sobre as condições de uso de radiofrequências na faixa de 698 MHz a 806 MHz, a nova destinação da faixa aos serviços de telecomunicações está internacionalmente harmonizada. O Brasil adotará o arranjo definido na recomendação UIT-R M.1036-4 (arranjo A5: APT) que permite uso de 90 MHz (45+45 MHz) por serviços de telecomunicações, com ganhos de escala associados ao uso de infraestrutura e terminais produzidos em escala global [53], [54].

A Anatel finalizou, no dia 3 de junho de 2014 as consultas públicas que abordavam as propostas de edital de licitação para autorização de uso de radiofrequências na faixa de 700 MHz, associada à autorização para prestação do serviço móvel pessoal (Consulta Pública 19/2014), e de Regulamento sobre condições de convivência entre o serviço de radiodifusão de sons e imagens do Sistema Brasileiro de Televisão Digital e os serviços de Telecomunicações na faixa de 698 MHz a 806 MHz (Consulta Pública 18/2014) [6].

Na Resolução da ANATEL nº 640, de 11 de julho de 2014, que aprova o regulamento sobre as condições de convivência entre os serviços de radiodifusão de sons e imagens e de retransmissão de televisão do SBTVD e os serviços de radiocomunicação operando na faixa de 698 MHz a 806 MHz. Nesta resolução é destacado que a largura de faixa ocupada não deve causar interferências prejudiciais entre blocos adjacentes, além do que a potência deve ser a mínima necessária para atender com boa qualidade e confiabilidade os serviços necessários.

A resolução apresenta as técnicas de mitigação que serão utilizadas e os casos que são considerados interferências prejudiciais [54], [55].

3.7 DOWNLINK LTE

3.7.1 OFDM (ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION MULTIPLEXING)

O OFDM é uma técnica em que se baseia na multiplexação pela divisão da frequência. Esta técnica utiliza da sobreposição das portadoras, o que possibilita um ganho espectral de até 50% em relação à técnica FDM [36].

O OFDM distribui a informação de dados sobre um grande número de subportadoras, que são encaixadas em frequências precisas. Essa precisão faz com que ocorra a ortogonalidade, o que faz com que na demodulação não ocorra interferência entre as portadoras. Os benefícios de OFDM são alta eficiência espectral, robustez contra interferência de sinais de RF e baixa distorção em propagação multi-percurso.

No OFDM utiliza-se a IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*) na modulação e a FFT (*Fast Fourier Transform*) na demodulação. Utiliza-se um total de 256 portadoras, podendo usar a modulação QAM ou PSK [36].

No LTE, o compartilhamento de recursos no espectro por múltiplos usuários ocorre com um refinamento do OFDM, o OFDMA. O OFDMA é uma técnica onde os subcanais são alocados no domínio da frequência e os símbolos OFDM são alocados no domínio do tempo, conforme ilustrado na Figura 15.

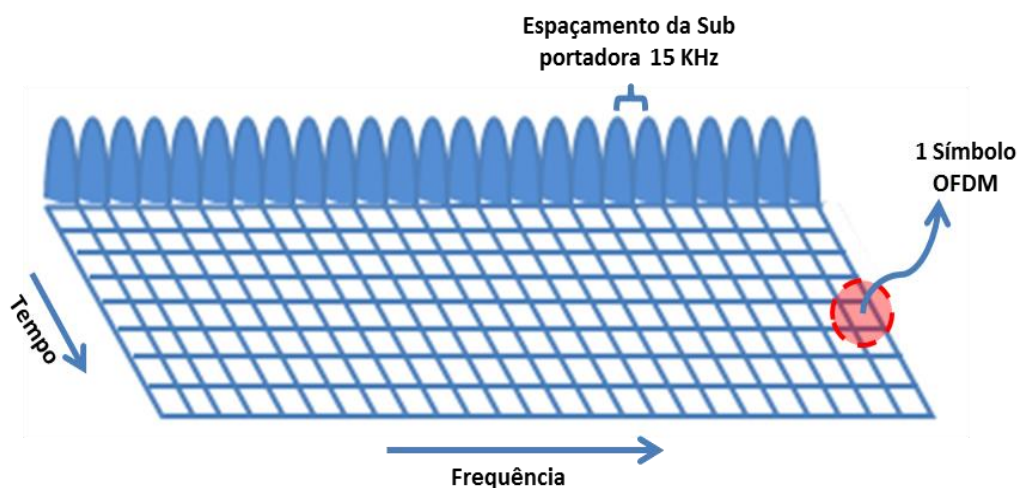


Figura 15: Técnica OFDM.

Fonte: Adaptado de KARLSSON [58].

3.7.2 OFDMA (ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION MULTIPLE ACCESS)

Uma das grandes diferenças presentes no LTE atual em relação aos *releases* anteriores do UMTS é a forma de acesso múltiplo. Até o HSPA+, a forma padrão era o W-CDMA sendo que com o LTE, o acesso múltiplo é OFDMA.

A tecnologia OFDMA transmite no domínio da frequência em diversas subportadoras paralelamente o que, no domínio do tempo, correspondem a múltiplas ondas senoidais com diferentes frequências. O OFDMA será utilizado apenas no enlace direto no sistema LTE, ou seja, para *downlink*.

Algumas características importantes no OFDMA são:

- Excelente desempenho do OFDMA em canais com presença de *fading* seletivo em frequência;
- Baixa complexidade do receptor banda base;
- Boas propriedades espectrais e gerenciamento de múltiplas larguras de banda;
- Adaptação de enlace e readequação do domínio de frequências;
- Compatibilidade com receptores avançados e novas tecnologias de antenas.

A Figura 16 mostra o transmissor e o receptor utilizado para o OFDMA.

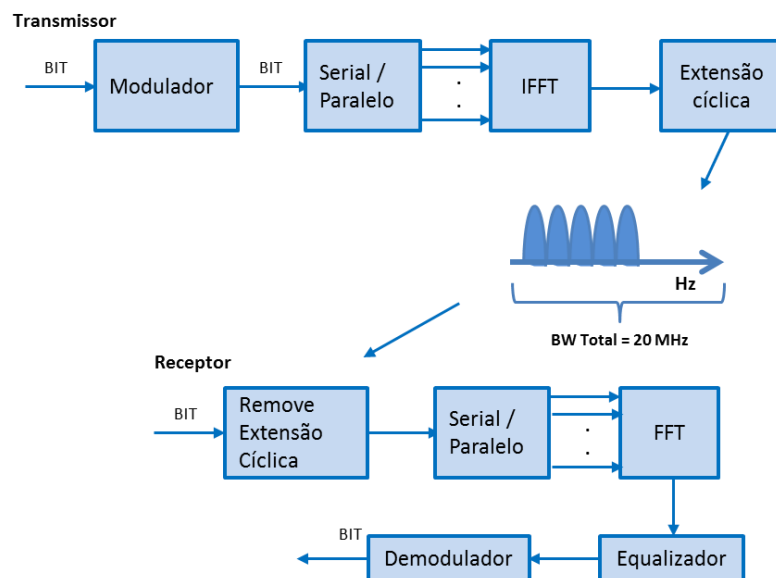


Figura 16: Transmissor e receptor OFDMA.

Fonte: Adaptado de S. MARTIN [58].

Diferentemente do 3G, que utiliza uma única portadora, no LTE, utiliza-se uma técnica de transmissão denominada OFDMA. Esta permite que sejam transmitidos dados utilizando múltiplas portadoras estreitas simultaneamente, dependendo da banda utilizada, por exemplo: 5, 10,15 e 20 MHz [49]. O OFDMA tem sua camada física baseada no OFDM, tecnologia empregada no *downlink* do LTE. De forma semelhante ao OFDM, o OFDMA emprega múltiplas subportadoras sobrepostas no domínio da frequência.

A principal diferença está na subdivisão das subportadoras em grupos, onde cada grupo, formado por 12 subportadoras com espaçamento regular de 15 kHz cada, são um *resource block*. O número de *resource blocks* está associado à banda disponível, conforme apresentado na Tabela 2. A duração de um símbolo OFDM é de 66,667 μ s e o prefixo cíclico padrão é de 4,7 μ s, logo, o tempo total de transmissão de um símbolo OFDM é de 71,367 μ s.

O prefixo cíclico é transmitido antes de cada símbolo OFDM como medida de prevenção ao multi-percurso. Para aplicações onde existe grande degradação por multi-percurso, um prefixo cíclico de 16,67 μ s pode ser utilizado, no entanto este maior prefixo cíclico faz com que seja reduzido o *throughput*, mantendo-se a mesma duração do símbolo [36].

Como os dados são alocados em *resource blocks*, um usuário pode ser alocado em um *resource block* inteiro no domínio da frequência. No domínio do tempo, a alocação deve ser analisada e pode ser modificada na transmissão em intervalos de 1 ms (esta decisão é tomada na *eNodeB*). O conjunto de múltiplas subportadoras são independentes quanto à modulação, e no LTE elas podem ser moduladas em QPSK, 16-QAM ou 64-QAM.

O menor agrupamento de dados agregados é referido ao *resource block*, que contem 12 subportadoras e 7 símbolos para cada subportadora (no caso de se utilizar o prefixo cíclico curto). Este grupo de 12 subportadoras tem uma banda de 180 kHz e 0,5 ms de duração no domínio do tempo (1 *slot*). Dois *slots* são agrupados em um *subframe*, referente a um TTI (*Transmit Time Interval*) [58].

Para aumentar as taxas de dados para os dispositivos móveis, a alocação dos recursos da rede pode concatenar vários *resource blocks* no domínio do tempo e da frequência.

É importante deixar claro que nem todos os *resource elements* de um *resource block* são alocados para a transmissão de dados, podendo ser utilizados também para outros fins, como por exemplo, referência do canal piloto e medidas de qualidade dos canais de *downlink* [58].

3.8 UPLINK LTE

3.8.1 SC-FDMA (SIGLE CARRIER FREQUENCY DIVISION MULTIPLE ACCESS)

Apesar de o OFDMA atender aos requisitos de *downlink*, suas propriedades não são recomendáveis para o *uplink*, principalmente devido ao desvanecimento do parâmetro chamado *PAPR* (*Peak to Average Power Ratio*), já que esta técnica permite diminuir a necessidade de transmissores complexos, diferentemente do OFDM [58].

No *uplink* do LTE, como já destacado, não será utilizado o OFDMA propriamente dito, ou seja, uma forma de acesso múltiplo diferente é aplicada, o SC-FDMA. Embora, assemelhe-se a uma forma de tecnologia OFDMA com implementação diferente.

O motivo para a utilização do SC-FDMA é o consumo de bateria do móvel. Sabe-se que o consumo de potência é algo chave para o *handset* sendo que no *eNodeB*, o consumo de potência é algo fácil de ser controlado. A eficiência na utilização de energia é muito afetada pela modulação utilizada na transmissão de RF, sendo que o OFDMA tem uma alta relação pico/média, o que exige uma amplificação linear, o que se torna ineficiente para esse sistema.

Desta forma, o LTE utiliza o sistema de modulação SC-FDMA uma forma híbrida, combinando uma baixa relação pico/média com a boa eficiência contra múltiplos percursos e alocação flexível de subportadoras do OFDM [58].

Os blocos de transmissão SC-FDMA são baseados em um espaçamento de 15 kHz, semelhante ao utilizado no enlace direto, sendo que na forma mais simples, o receptor utilizará pelo menos 12 subportadoras, perfazendo um total de 180 kHz.

Há diferentes formas para se gerar um sinal SC-FDMA. O mais conhecido e utilizado é a *DTF-s-OFDM* (*Discret Fourier Transform - spread - OFDM*) adotado pela E-UTRAN. Seu princípio de funcionamento é ilustrado na Figura 17.

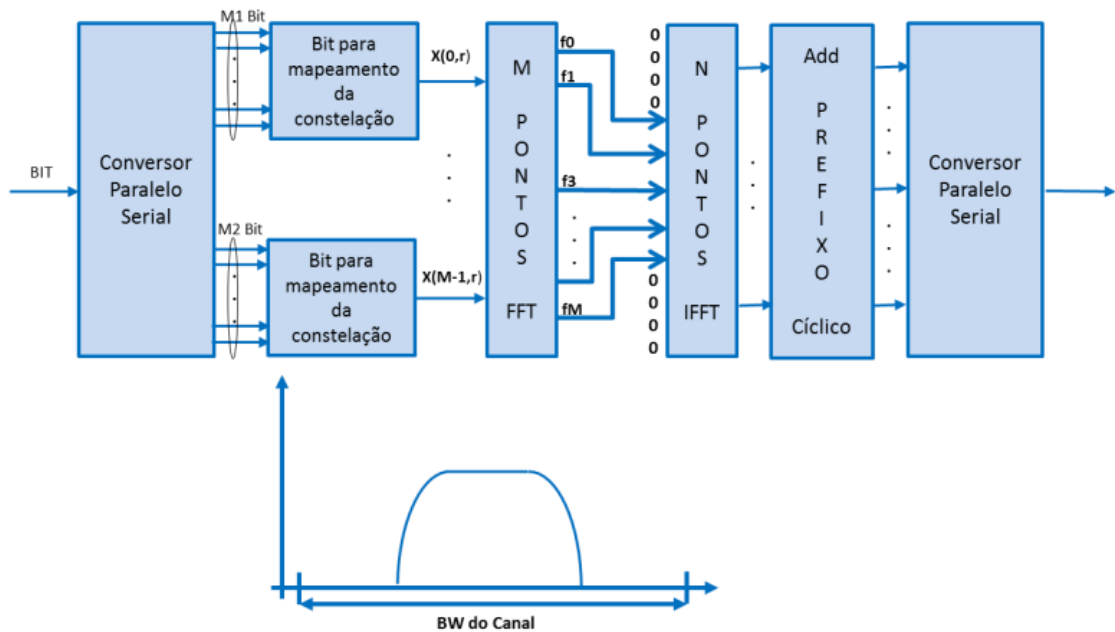


Figura 17: Diagrama de bloco da DFT – OFDM.

Fonte: Traduzido de Rohde & Schwarz [56].

Inicialmente o fluxo de dados é convertido de serial para paralelo e cada *bit* modulado e transformado do domínio do tempo para o domínio da frequência através da transformada rápida de Fourier (FFT) e o resultado é mapeado nas subportadoras disponíveis. Após o sinal ser submetido à transformada inversa de Fourier (IFFT) é adicionado o prefixo cíclico, que é utilizado como um tempo de guarda entre os símbolos. Ao final do processo o sinal é convertido novamente de paralelo para serial [56].

O DFT no OFDMA é a diferença fundamental entre a geração de sinal do SC-FDMA e do OFDMA. Em um sinal SC-FDMA, cada subportadora utilizada para transmissão contém informação de todos os símbolos modulados transmitidos. Em contrapartida, cada subportadora com um sinal OFDM carrega informações relacionadas a um símbolo específico.

Classifica-se o SC-FDMA como um sistema híbrido que, combina o baixo PAPR do SC utilizado no GSM com o bom desempenho relacionado ao multi-percurso do OFDM.

Apesar do nome, o SC-FDMA também transmite dados na interface aérea utilizando-se múltiplas subportadoras, assim como o OFDMA. Como exemplo, pode-se observar a Figura 18, onde no OFDMA os quatro símbolos QPSK são transmitidos paralelamente, sendo um em cada subportadora, e no SC-FDMA os quatro símbolos são transmitidos em série em quatro tempos distintos [56].

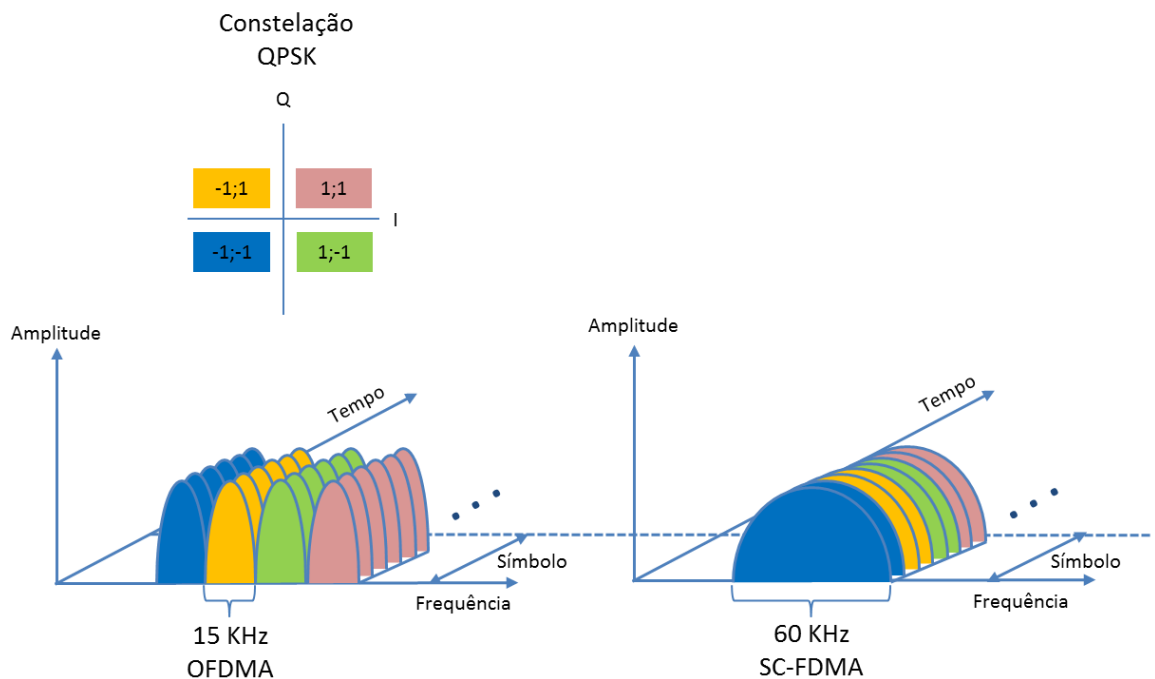


Figura 18: Transmissão utilizando OFDMA x SC-FDMA.

Fonte: Adaptado de S. MARTIN [58].

No OFDMA, cada subportadora carrega somente informações de um símbolo específico. NO SC-FDMA, cada subportadora contém informações de todos os símbolos transmitidos.

No *uplink*, os dados são transmitidos também em 12 subportadoras, como no *downlink*, com o mesmo TTI de 1 ms.

No OFDMA são tomados grupos de *input* de *bits* para montar as subportadoras que são processadas com IFFT para ter um sinal no tempo. No SC-FDMA primeiro se tem uma FFT sobre grupos de *input* para espalhar sobre todas subportadoras, e em seguida usar o resultado no IFFT que cria o sinal no tempo. Este é o motivo que por vezes o SC-FDMA é referido como FFT espalhado OFDM.

3.9 PRINCIPAIS MODULAÇÕES DO LTE

3.9.1 PSK (*PHASE SHIFT KEYING*)

O PSK é uma forma de modulação em que a informação do sinal digital é embutida nos parâmetros de fase da portadora. Neste sistema de modulação, quando há uma transição de um *bit* 0 para um *bit* 1 ou de um *bit* 1 para um *bit* 0, a onda portadora sofre uma alteração de fase

de 180° . Esta forma em particular do PSK é chamada de BPSK (*Binary Phase Shift Keying*). Quando não há nenhuma destas transições, ou seja, quando bits subsequentes são iguais, a portadora continua a ser transmitida com a mesma fase [57].

A modulação QPSK é uma técnica de modulação derivada do PSK, que utiliza parâmetros de fase e quadratura da onda portadora para modular o sinal de informação. Por exemplo, se for transmitido 2 bits por símbolo tem-se 4 tipos de símbolos possíveis, a portadora pode assumir 4 valores de fase diferentes, cada um deles correspondendo a um *dibit*, como por exemplo 45° , 135° , 225° e 315° [51].

Adicionalmente, para se diminuir o espectro de frequência do sinal transmitido, os bits podem passar por um filtro antes de entrarem no modulador, para que a transição entre os bits seja suavizada.

A forma de onda do sinal PSK é descrita pela equação 1.

$$S(t) = \cos(\omega_c t + \varphi_k) \quad (1)$$

onde,

ω_c – Frequência da portadora [Rad/s];

t - Tempo [s];

ω_k – Defasagem do sinal.

A constelação da modulação PSK e QPSK pode ser visualizada, respectivamente, na Figura 19 e Figura 20.

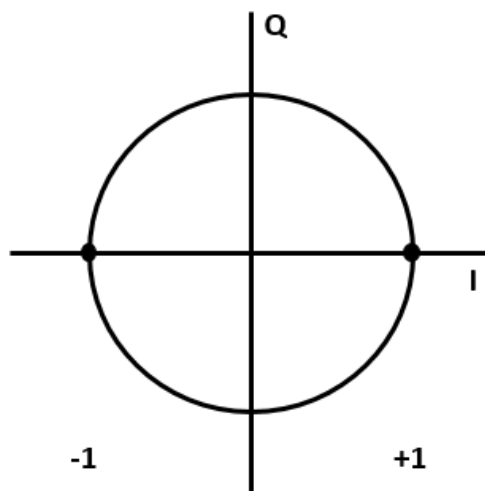


Figura 19: Constelação da modulação PSK.

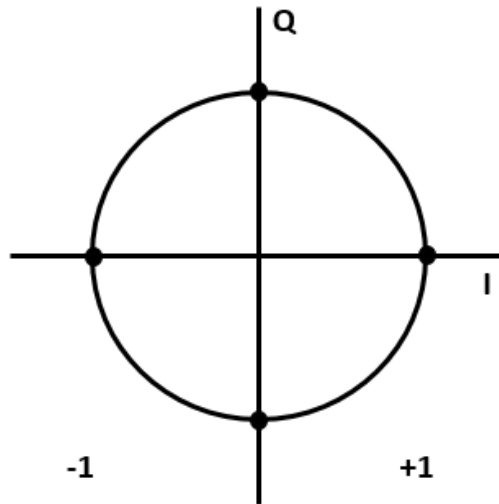


Figura 20: Constelação da modulação QPSK.

A curva de taxa de erro de *bit* (BER) está na Figura 22 e pode ser visualizada na seção 3.9.2. A curva permite comparar as modulações QPSK, 16 QAM e 64 QAM quanto a quantidade de bits errados no total de *bits* transmitidos.

3.9.2 QAM (*QUADRATURE AMPLITUDE MODULATION*)

Nesta forma de modulação, os símbolos são mapeados em um diagrama de fase e quadratura, sendo que cada símbolo apresenta uma distância específica da origem do diagrama que representa a sua amplitude, diferentemente da modulação PSK, na qual todos os símbolos estão a igual distância da origem. Isto significa que as informações são inseridas nos parâmetros de amplitude e quadratura da onda portadora [51], [57].

No caso de 16 QAM, a constelação apresenta 16 símbolos, sendo 4 em cada quadrante do diagrama, o que significa que cada símbolo representa 4 *bits*. Pode-se ter também, por exemplo, o modo 64 QAM, cuja constelação apresenta 64 símbolos, cada um deles representando 6 *bits*. A Figura 21 mostra as constelações geradas pelos dois modos QAM mencionados acima [51], [57].

Pode-se notar que no modo 16 QAM alcança-se uma taxa de transmissão menor do que no modo 64 QAM, uma vez que cada símbolo transporta um número menor de *bits*. No entanto, no modo 16 QAM, a distância euclidiana entre os símbolos é maior do que no caso do modo 64QAM. Isto permite que o modo 16 QAM possibilite uma melhor qualidade de serviço (QoS), pois a maior distância entre os símbolos dificulta erros de interpretação no receptor quando este detecta um símbolo [57].

A equação que rege a modulação QAM é:

$$S(t) = A_k \cos(\omega_c t + \varphi_k) \quad (2)$$

onde,

A_k – Fator de modificação da amplitude;

ω_c – Frequência da portadora;

t – Tempo [s];

ω_k – Defasagem do sinal.

Na Figura 21 é apresentada a constelação da modulação 64-QAM.

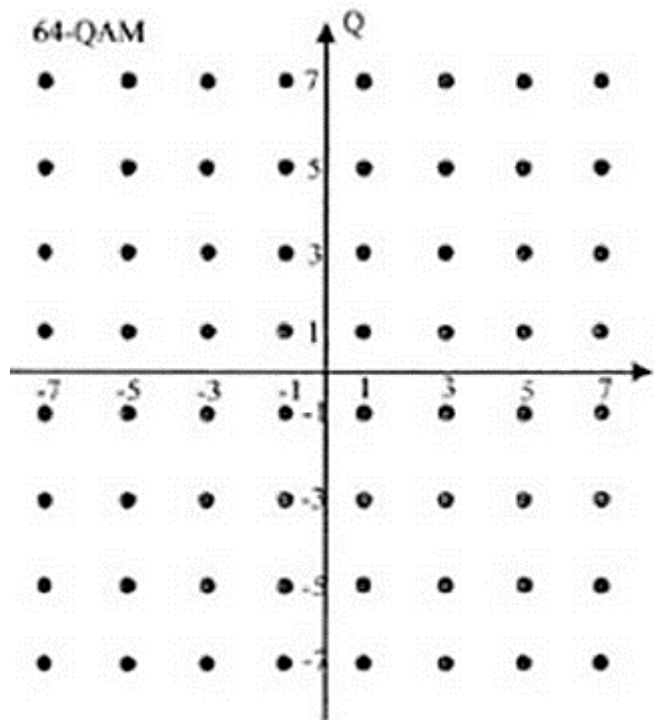


Figura 21: Constelação da modulação QAM.

A curva de BER para a modulação QAM sem codificação de canal pode ser observada na Figura 22.

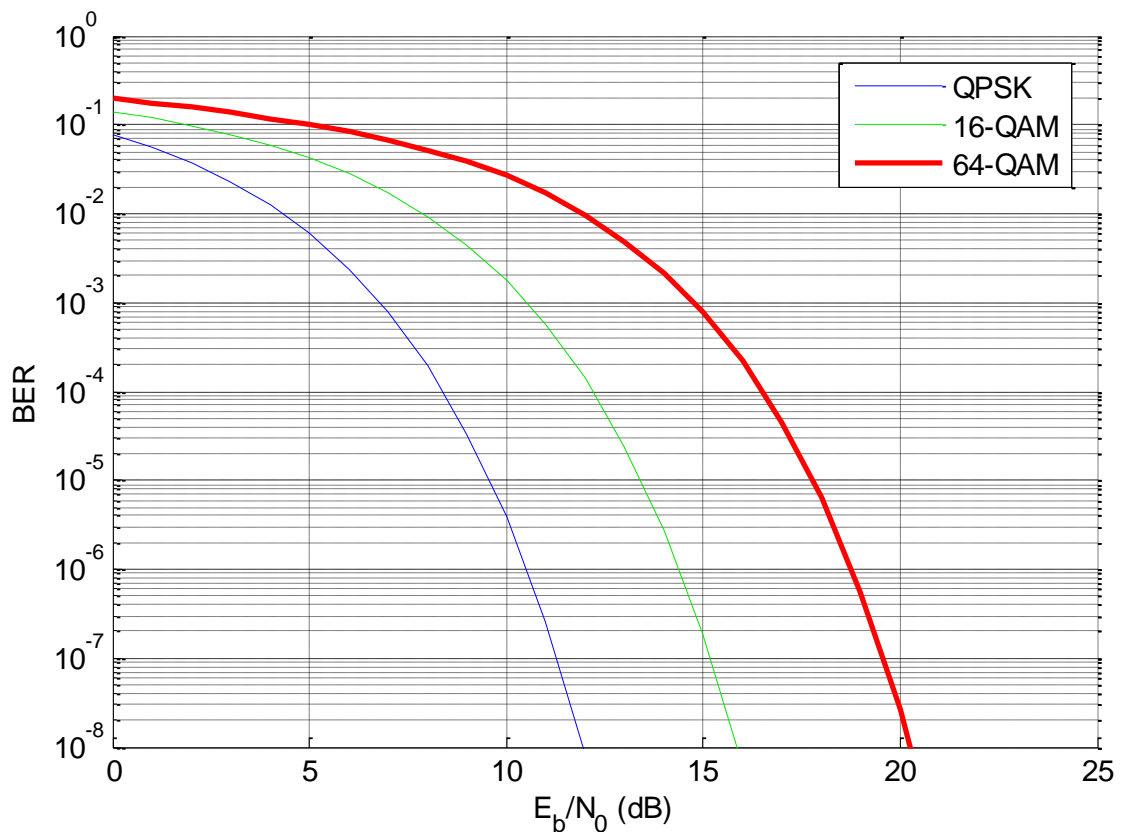


Figura 22: Curva de taxa de erro de bit (BER) para as modulações QPSK, 16 QAM, e 64 QAM.

3.10 CODIFICAÇÃO E DECODIFICAÇÃO DE CANAL

O LTE teve como motivação, além do aumento da taxa de transferência, um melhor aproveitamento do espectro. Isso significa que para uma mesma faixa licenciada, mais usuários podem ser atendidos com melhor qualidade.

Outra vantagem dos sistemas LTE é a menor latência associada à comunicação, ou seja, o tempo de resposta do sistema. Outras tecnologias possuem um tempo de resposta alto o que dificulta a implantação da voz sobre redes IP.

Para atingir o máximo da capacidade do canal é necessária a utilização de esquemas de codificação de dados. Para o LTE o codificador convolucional utilizado é o *turbo-code*, apesar da sua complexidade para a decodificação.

3.10.1 CODIFICADOR CONVOLUCIONAL

Os códigos convolucionais podem ser mostrados através de um gráfico (treliça) que leva em consideração os estados dos registradores (D) como uma função temporal. A Figura 23 mostra o codificador convolucional gerador da treliça.

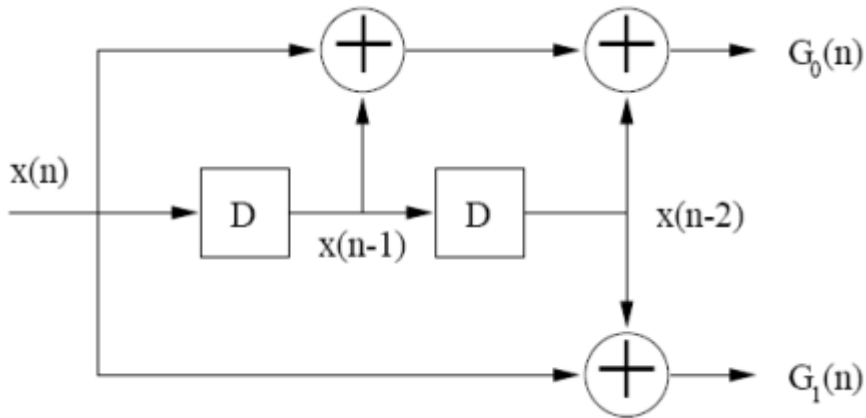


Figura 23: Codificador convolucional com dois registradores.

Fonte: Adaptado de Haykin [57].

O gráfico em treliça representado na Figura 24 mostra o comportamento da máquina de estados com o tempo. Tomando um estado inicial em que todos os registradores têm valor zero, são representados quais os estados que a máquina pode assumir e as saídas que o codificador pode apresentar em se tendo as duas possibilidades de entrada [20].

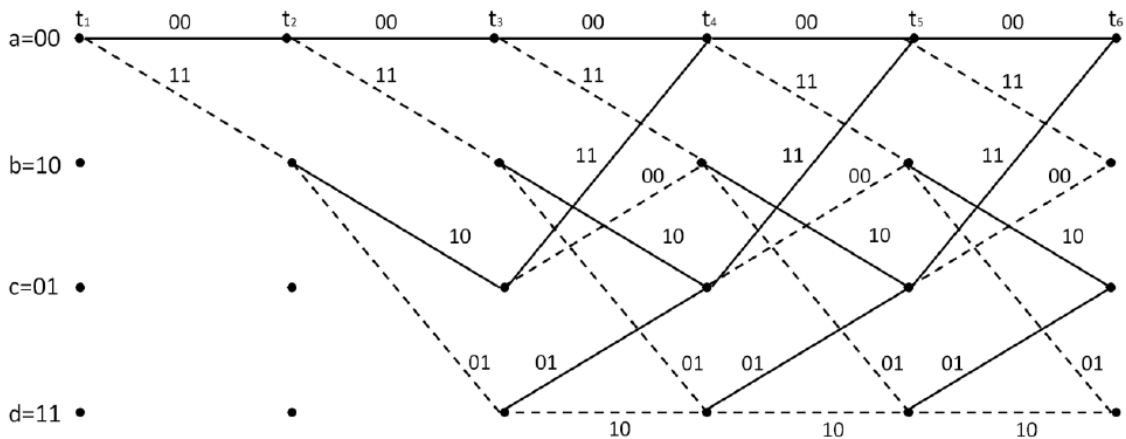


Figura 24: Gráfico de treliça.

Fonte: Adaptado de Haykin [57].

As linhas sólidas representam as saídas geradas a partir de um bit de entrada de valor zero, e uma linha tracejada denota a saída do decodificador para uma entrada binária de valor um. Os nós caracterizam os estados possíveis dos registradores do codificador. Os gráficos em treliça têm todos os registradores em zero como estado inicial (representado nesse gráfico pelo estado a=00). Partindo deste estado, a entrada pode levar a dois caminhos na treliça dependendo do seu valor, ou seja, do dado a ser codificado [20].

A grande dificuldade enfrentada na utilização de esquemas de codificação convolucional se dá na complexidade do decodificador.

A função de erros para cada ramo da treliça é representada pela distância entre os dados recebidos e todas as possibilidades da sequência. Essas distâncias são calculadas pela distância de Hamming.

3.10.2 CODIFICADOR *TURBO-CODE*

Um *turbo code* é uma combinação de dois codificadores simples. A entrada é um bloco de N bits de informação. Os dois codificadores geram símbolos de paridade de dois códigos simples convolucionais recursivos, cada qual com um pequeno número de estados [57].

Turbo codes utilizam um algoritmo decodificador iterativo baseado em decodificadores simples individuais combinados para a simples constituição dos códigos. Cada decodificador constituinte envia uma estimativa futura em probabilidades de bits decodificados para o outro decodificador, e utiliza os bits estimados correspondentes do outro decodificador como uma probabilidade já existente. Os bits de informação corrompidos por um canal de interferência são disponibilizados para cada decodificador para serem as novas probabilidades a priori [60].

Os decodificadores usam o MAP (*Maximum a Posteriori*) como algoritmo decodificador de *bits*. O *turbo code* permuta entre as saídas dos dois decodificadores até alcançar a convergência satisfatória. A saída final é uma versão refinada e quantizada das estimativas prováveis de um dos decodificadores. A Figura 25 mostra o diagrama do decodificador *turbo code* [60].

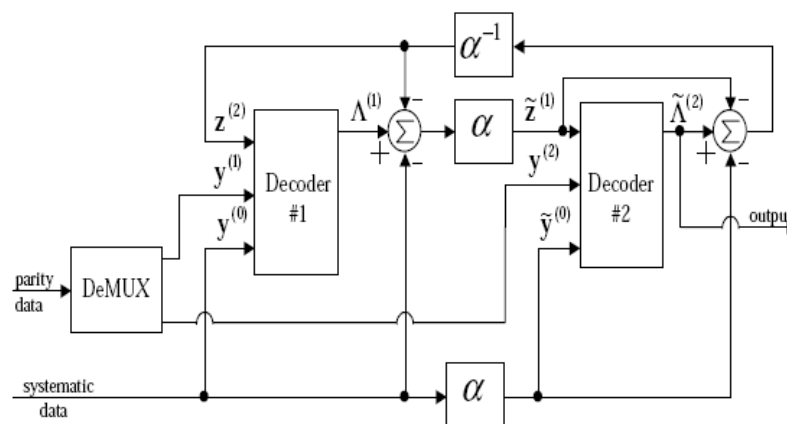


Figura 25: Decodificador *turbo code*.

Fonte: Bernard Sklar [60].

4. PROJETO DA REDE LTE

Para projetar uma rede LTE, primeiramente, é necessário identificar quais as características que devem ser levadas em consideração para obter a otimização da rede, ou seja, quais os parâmetros e técnicas devem ser respeitados para que a rede opere nas melhores condições possíveis. O objetivo é obter a maior cobertura 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.

Inicialmente, o planejamento da rede consiste em se obter informações como a cobertura desejada, a quantidade de usuários, estimativas de tráfego por usuário, serviços a serem oferecidos, a qualidade de serviço requerida QoS (*Quality of Service*), a capacidade necessária, características dos equipamentos e funcionalidades que podem ser utilizadas.

Na fase final do projeto, é necessário realizar uma simulação para que as características do sistema sejam alcançadas na teoria e na prática, sendo que o objetivo do projeto deve ser mantido.

O planejamento detalhado pode ocorrer adjunto da escolha do modelo de propagação, da definição dos locais de instalação, KPI's (*Key Performance Indicator*), cobertura e capacidade. A próxima etapa é o dimensionamento que tem por objetivo final dimensionar os equipamentos para atender a demanda de cobertura e capacidade da região a ser atendida, juntamente com esse item entra a parametrização do sistema. 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.

4.1 LINK BUDGET

O *link budget* é uma das etapas realizadas como pré-projeto da rede de comunicação. Com o *link budget* se calcula a máxima perda de propagação permitida para que os usuários alocados nas bordas das células tenham condições de utilizar o sistema.

Através deste cálculo podem-se determinar a área de cobertura e raio da célula, permitindo estimar a quantidade de estações de 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 cálculo, devido às múltiplas reflexões que o sinal propagado irá sofrer, existem diversos softwares que ajudam nesse cálculo e que utilizam mapas de precisão para melhor, adequar o tipo de relevo e

o comportamento do sinal no sistema, devem ser feitos os cálculos de *uplink* e de *downlink* separados, dada a distinção dos parâmetros em cada sentido de transmissão. A potência de transmissão, o ganho das antenas e as perdas do sistema são parâmetros que devem ser levados em consideração no cálculo.

A equação 3 é a equação utilizada no cálculo do *link budget* em dB para a propagação no espaço livre:

$$L = P_{tx} + G_{tx} - L_{tx} - SNR_{Req} - S_{rx} + G_{rx} - L_{rx} + G_{dv} - M \quad (3)$$

onde,

- L - Máxima perda no espaço livre;
- P_{tx} - Potência de transmissão [dBm];
- G_{tx} - Ganho da antena de transmissão [dBi];
- L_{tx} - Perdas na transmissão [dB]
- SNR_{Req} - Relação sinal ruído requerida [dB];
- S_{rx} - Sensibilidade na recepção [dB]
- G_{rx} - Ganho da antena de recepção [dBi];
- L_{rx} - Perdas na recepção [dB];
- G_{dv} - Ganho de diversidade [dBi];
- M - Margem de desvanecimento [dB].

Existe o fator de desvanecimento (M) que é a margem a ser considerada no *link budget* a fim de garantir que o terminal móvel consiga operar nos limites das células, onde a relação sinal ruído mais interferência será baixa. Essa margem deve ser considerada devido ao multipercurso.

A referência usualmente adotada para esse cálculo segue a distribuição de Rayleigh, onde para áreas urbanas o valor adotado deve ser entre 4 dB e 6 dB [50].

A relação sinal ruído depende 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.

A máxima perda encontrada é o menor valor de perda no espaço livre (L) na comparação entre *downlink* e *uplink* sendo adotada na determinação do raio da célula, assim nos dois itens posteriores serão demonstrados o cálculo do *Link Budget* para *downlink* e *uplink*.

4.2 **LINK BUDGET PARA DOWNLINK E UPLINK EM 2,5 GHz**

Esta seção tem como característica apresentar o *Link Budget* na faixa de 2,5 GHz. Esta faixa se encontra em utilização para o LTE implantado no Brasil. Serão apresentados cálculos de relação sinal ruído, *throughput*, perda de propagação e raio máximo da célula para o sistema operar dentro das características de projeto, sendo considerado 3 tipos de modulação, QPSK, 16 QAM e 64 QAM.

4.2.1 **LINK BUDGET PARA DOWNLINK**

Os parâmetros necessários e os valores adotados para o cálculo do *link budget* de *downlink* são mostrados na sequência.

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: 5 dB.

O valor da sensibilidade requerida na recepção adotado para o cálculo do *link budget de downlink* é de -92 dBm (a maior sensibilidade requerida, para 20 MHz de largura de banda - série 36101 da 3GPP). Este cálculo deve ser realizado para o pior caso, pois se o sistema operar com larguras de bandas diferentes, perde-se a cobertura, impactando diretamente na configuração espacial das *eNodeBs*.

Sensibilidade requerida recepção - 5 MHz -98 dBm;

Sensibilidade requerida recepção - 10 MHz -95 dBm;

Sensibilidade requerida recepção - 15 MHz -93,2 dBm;

Sensibilidade requerida recepção - 20 MHz -92 dBm.

Utilizando a equação 4 e a sensibilidade para o pior caso que é de -92 dBm, pode-se determinar o valor de *L* em dB para *downlink*.

$$L_{Downlink} = P_{tx} + G_{tx} - L_{tx} - SNR_{Req} - S_{rx} + G_{rx} - L_{rx} + G_{dv} - M \quad (4)$$

$$L_{Downlink} = 48 + 18 - 3 - 0 - (-92) + 0 - 0 + 0 - 5 \quad (5)$$

$$L_{Downlink} = 150 \text{ dB} \quad (6)$$

4.2.2 LINK BUDGET PARA UPLINK

Os parâmetros necessários e os valores adotados para o cálculo do *link budget* de *uplink* são mostrados na sequência.

Potência de transmissão 23 dBm;

Ganho da antena transmissora 0 dBi;

Perdas na transmissão 0 dB;

SNR 0 dB;

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 5 dB.

A potência de transmissão adotada para o móvel segue o padrão 3GPP para a máxima potência permitida de acordo com a Série 36101 da 3GPP, com tolerância de ± 2 dB. O valor adotado para a sensibilidade requerida na recepção está conforme a série 36104 da 3GPP [63], sendo que os valores para as faixas de frequências de 5 MHz à 20 MHz são de -101,5 dBm para as modulações QPSK, 16 QAM e 64 QAM [64].

Utilizando a equação 7 e a sensibilidade para o pior caso que é de -101,5 dBm, determina-se o valor de L em dB para *uplink*.

$$L_{Uplink} = P_{tx} + G_{tx} - L_{tx} - SNR_{Req} - S_{rx} + G_{rx} - L_{rx} + G_{dv} - M \quad (7)$$

$$L_{Uplink} = 23 + 0 - 0 - 0 - (-101,5) + 18 - 3 + 3 - 5 \quad (8)$$

$$L_{Uplink} = 137,5 \text{ dB} \quad (9)$$

4.2.3 Dimensionamento do Sistema LTE em 2,5 GHz

O dimensionamento do sistema começa com as características de tráfego dos usuários da rede, sendo que um modelo de propagação deve ser escolhido para melhor adequar as características técnicas necessárias para a operação do sistema. Os modelos de propagação fornecem estimativas das perdas de propagação considerando, distância entre transmissor e receptor, fatores de terreno, altura das antenas transmissoras e receptoras e as frequências utilizadas. Alguns fatores são essenciais para o dimensionamento:

- Topologia da rede: Fator este que influencia diretamente a capacidade da rede e a área de cobertura dos serviços. A topologia pode ser em barramento, estrela, anel, árvore, *mesh* e modos mistos, sendo que cada topologia tem as suas particularidades;
- Largura de banda e *throughput*: Fator importante para definir quantos *bits* por segundo estarão sendo transmitido no sistema, ou seja, a vazão é uma medida importante para definir quais aplicações poderão ser implementadas;
- Padronização: Fator que deve ser seguido devido a diversidade de equipamentos existentes no mercado. Seguir as recomendações do 3GPP e órgãos responsáveis pelas comunicações é de extrema importância para o dimensionamento do sistema.

O modelo de propagação utilizado nesse trabalho é o recomendado pelo 3GPP. O modelo SUI (*Stanford University Interim*), que é a continuação das pesquisas de Erceg et al, e refere-se a determinação da cobertura da rede [66].

O modelo SUI modela o sistema para diferentes terrenos, que podem ser classificados como sendo do tipo:

- Tipo A: Terreno montanhoso com alta densidade de obstáculos (árvores e prédios);
- Tipo B: Terreno montanhoso com baixa densidade de obstáculos ou planície com alta densidade de obstáculos;
- Tipo C: Planície de baixa densidade de obstáculos.

Para fim de demonstração de dimensionamento, neste trabalho será considerado o pior caso, sendo o terreno do tipo A, resultando em uma quantidade maior de estações rádio base.

Para calcular a perda de propagação o modelo SUI segue a fórmula apresentada na equação 10.

$$L = A + 10\alpha \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_f + X_h + S \quad (10)$$

onde,

L - Máxima perda no modelo de propagação de SUI;

A - Perda no espaço livre considerando a distância d_0 ;

α - Fator de perda do caminho em função da altura da estação rádio base;

d - Distância ou raio máximo de atuação da célula [m];

d_0 - Distância de referência [m];

X_f - Correção da frequência [dB];

X_h - Correção da altura da antena receptora [dB];

S - Desvanecimento de acordo com o tipo de terreno [dB].

O modelo deve considerar que d será sempre maior que d_0 , onde $d_0=100\text{m}$.

Para obter a perda no espaço livre referente à distância d_0 (A), segue a equação 11 que leva em consideração o comprimento de onda associado à frequência de operação (λ). A correção de frequência (X_f) pode ser obtida pela equação 12 sendo f a frequência em MHz. A correção de altura pode ser obtida através da equação 13 e equação 14, dependendo do tipo de terreno escolhido, sendo a equação 13 para terrenos do tipo A e B e a equação 14 para terrenos do tipo C. A variável h é a altura da antena receptora. O fator de perda do caminho em função da altura da estação rádio base leva em consideração as variáveis a , b e c que são valores calculados empiricamente e podem ser retirados da Tabela 4, além de h_b que é a altura da estação rádio base, esse fator pode ser calculado através da equação 15.

$$A = 20 \log\left(\frac{4\pi d_0}{\lambda}\right) \quad (11)$$

$$X_f = 6 \log\left(\frac{f}{2000}\right) \quad (12)$$

$$X_h = -10,8 \log\left(\frac{h}{2}\right) \quad (13)$$

$$X_h = -20 \log\left(\frac{h}{2}\right) \quad (14)$$

$$\alpha = a - bh_b + \frac{c}{h_b} \quad (15)$$

Tabela 4: Valores dos parâmetros empíricos do modelo SUI.

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

Fonte: V. Erceg et. Al, “An empirically based path loss model for wireless channels in suburban environments” [66].

Se considerado para cálculo a frequência do LTE em 2,5 GHz, altura da recepção 2 metros e uma rádio base a 30 metros, sendo o desvanecimento 4 dB, pode-se obter a máxima distância de atuação da célula (d) através das equações anteriores conforme mostrado nos cálculos a seguir.

Utilizando a equação 16 é possível calcular a perda no espaço livre para o sistema:

$$A = 20 \log \left(\frac{4\pi 100}{3 \times 10^8 / 2,6 \times 10^9} \right) \quad (16)$$

$$A = 80,74 \text{ dB} \quad (17)$$

A partir da equação 18 e com o valor de frequência adotado se calcula a correção de frequência conforme abaixo:

$$X_f = 6 \log \left(\frac{2600}{2000} \right) \quad (18)$$

$$X_f = 0,6836 \text{ dB} \quad (19)$$

A correção da altura da antena receptora pode ser feita pela equação 20, e é mostrada abaixo:

$$X_h = -10,8 \log \left(\frac{2}{2} \right) \quad (20)$$

$$X_h = 0 \text{ dB} \quad (21)$$

A perda do caminho em função da altura da antena na estação rádio base deve ser calculada a partir da equação 22 e posteriormente substituída na equação 24.

$$\alpha = 4,6 - 0,0075 \times 30 + \frac{12,6}{30} \quad (22)$$

$$\alpha = 4,79 \text{ dB} \quad (23)$$

Substituindo α na equação 24 tem-se:

$$L = 80,74 + 10 \times 4,79 \log\left(\frac{d}{100}\right) + 0,6836 + 0 + 4 \quad (24)$$

Com todos os fatores calculados, usam-se os valores da perda de propagação (L) calculados nos subcapítulos 4.2.1 e 4.2.2 para realizar o balanceamento do canal juntamente com a equação, assim é possível determinar o raio máximo das células (d).

Substituindo os valores na equação 25 e considerando a maior perda de percurso que é a de *uplink* determina-se:

$$138,5 = 80,74 + 10 \times 4,79 \log\left(\frac{d}{100}\right) + 0,6836 + 0 + 4 \quad (25)$$

$$d \cong 1,3 \text{ Km} \quad (26)$$

4.2.4 CÁLCULO DE *THROUGHPUT* MÁXIMO

O *throughput* é calculado considerando 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 (a banda varia de 1.4 até 20 MHz). A equação 27 mostra o cálculo de *throughput*.

$$\text{Throughput} = \frac{1}{T_s} \times N_b \times S_p \quad (27)$$

onde,

T_s – Tempo de símbolo [s];

N_b – Número de *bits*;

S_p – Número de subportadoras.

Para calcular o *throughput* no LTE, é necessário lembrar que o tempo de transmissão de um símbolo OFDM é de 71,367 μ s, conforme mostrado em 3.7.2. A Tabela 5 mostra o número de subportadoras para cada largura de banda.

Tabela 5: Largura de banda e subportadoras LTE.

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

Fonte: V. Erceg et. Al, “An empirically based path loss model for wireless channels in suburban environments” [66].

Cada modulação transporta uma quantidade de *bits* por símbolo. Utilizando a Tabela 5 e a equação 27, é possível calcular *throughput* para cada largura de banda e, respectivamente, para as modulações QPSK, 16 QAM e 64 QAM.

Como exemplo escolheu-se variar a largura de faixa e manter a modulação de 64 QAM.

Para 5 MHz e 64 QAM tem-se:

$$Throughput = \frac{1}{0,000071367} \times 6 \times 300 \quad (28)$$

$$Throughput = 25,2 \text{ Mbps} \quad (29)$$

Para 10 MHz e 64 QAM tem-se:

$$Throughput = \frac{1}{0,000071367} \times 6 \times 600 \quad (30)$$

$$Throughput = 50,4 \text{ Mbps} \quad (31)$$

Para 15 MHz e 64 QAM tem-se:

$$Throughput = \frac{1}{0,000071367} \times 6 \times 900 \quad (32)$$

$$Throughput = 75,7 \text{ Mbps} \quad (33)$$

Para 20 MHz e 64 QAM tem-se:

$$Throughput = \frac{1}{0,000071367} \times 6 \times 1200 \quad (34)$$

$$\textit{Throughput} = 100,9 \text{ Mbps} \quad (35)$$

Foram feitos os cálculos para os demais valores de frequência e modulação. Cada valor do *throughput* para as demais frequências e modulações podem ser calculados da mesma maneira utilizando a equação 27 e a Tabela 5. Na Tabela 6 observa-se os valores de *throughput*.

Tabela 6: Tabela de *throughput* para as modulações QPSK, 16 QAM e 64 QAM para faixa de 2,5 GHz.

Largura de banda e modulação	<i>Throughput (Mbps)</i>
5 MHz – QPSK	8,4
5 MHz – 16 QAM	16,8
5 MHz – 64 QAM	25,2
10 MHz – QPSK	16,8
10 MHz – 16 QAM	33,6
10 MHz – 64 QAM	50,4
15 MHz – QPSK	25,2
15 MHz – 16 QAM	50,4
15 MHz – 64 QAM	75,7
20 MHz – QPSK	33,6
20 MHz – 16 QAM	67,9
20 MHz – 64 QAM	100,9

No gráfico da Figura 26 é apresentado o resultado final do *throughput* da camada física do LTE para as três modulações e faixa de operação de 5 – 20 MHz.

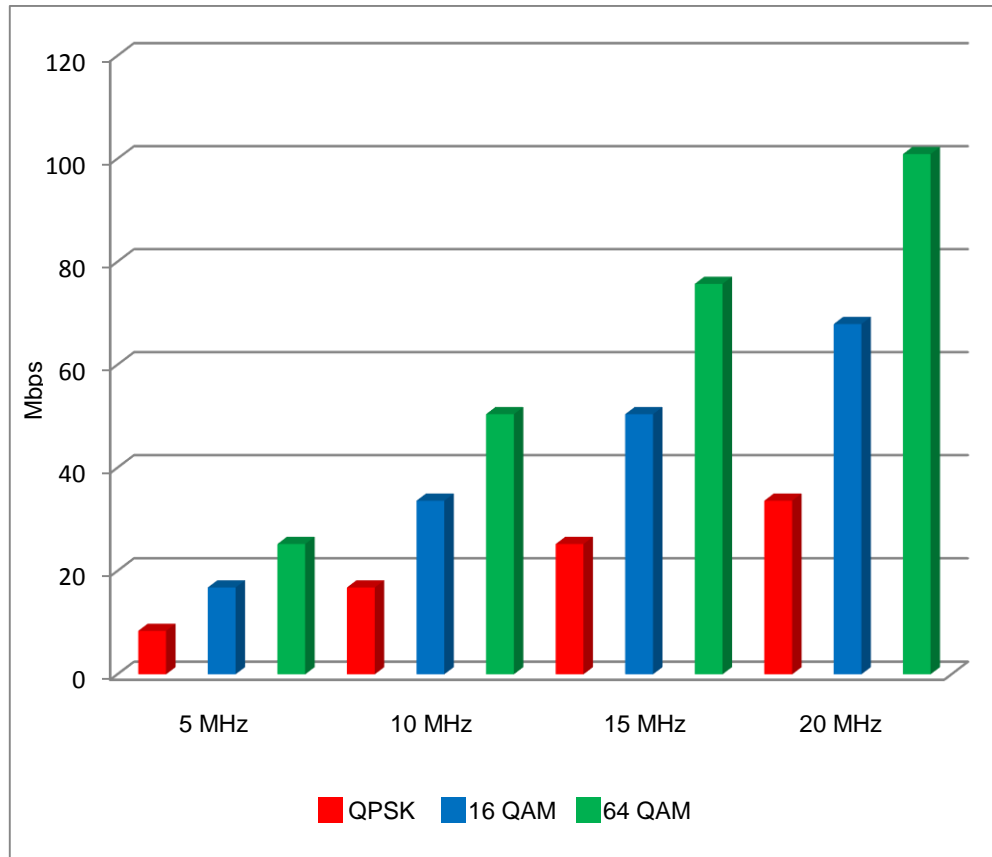


Figura 26: Gráfico do *throughput* na camada física do LTE.

4.2.5 CÁLCULO DA MÁXIMA EFICIÊNCIA ESPECTRAL

A largura de banda do canal de comunicação é um recurso extremamente importante e que deve ser adequado para o sistema operante. A eficiência espectral é a relação entre o número de *bits* transmitidos por segundo e a largura de banda ocupada pelo sinal transmitido, servindo de medida de qualidade em relação a estes atributos. A transmissão de símbolos com mais de duas formas de onda possíveis, faz diminuir o débito de símbolos mantendo o débito binário. A largura de banda é linearmente dependente do débito de símbolos, sendo esta uma forma de melhorar a eficiência espectral. Assim tem-se que a eficiência espectral é a razão do *throughput* da rede pela largura de banda do canal, e pode ser calculada para cada modulação de acordo com a equação 34.

$$Eficiência\ Espectral = \frac{Throughput}{Largura\ de\ Banda} \quad (36)$$

onde,

Eficiência espectral – Relação de *bits/seg/hertz*;

Throughput - Quantidade de dados processados ou transmitidos em um determinado espaço de tempo [Mbps];

Largura de banda - É a faixa de frequência ocupada pelo sinal modulado no sistema.

Para a modulação QPSK com largura de banda de 5 MHz tem-se um *throughput* de 8,4 Mbps, assim apresenta-se a máxima eficiência espectral conforme equação 37.

$$\text{Máx Eficiência Espectral}_{QPSK} = \frac{\text{Máx Throughput}}{\text{Largura de Banda}} \quad (37)$$

$$\text{Máx Eficiência Espectral}_{QPSK} = \frac{8,4}{5} \quad (38)$$

$$\text{Máx Eficiência Espectral}_{QPSK} = 1,68 \frac{\text{bits}}{\text{seg}}/\text{hertz} \quad (39)$$

Para a modulação 16 QAM com largura de banda de 15 MHz tem-se um *throughput* de 50,4 Mbps, assim obtém-se a máxima eficiência espectral conforme equação 40.

$$\text{Máx Eficiência Espectral}_{QPSK} = \frac{\text{Máx Throughput}}{\text{Largura de Banda}} \quad (40)$$

$$\text{Máx Eficiência Espectral}_{QPSK} = \frac{50,4}{15} \quad (41)$$

$$\text{Máx Eficiência Espectral}_{QPSK} = 3,37 \frac{\text{bits}}{\text{seg}}/\text{hertz} \quad (42)$$

Por fim, na modulação 64 QAM com largura de banda de 20 MHz traz-se um *throughput* de 100,9 Mbps, assim tem-se a máxima eficiência espectral conforme equação 43.

$$\text{Máx Eficiência Espectral}_{QPSK} = \frac{\text{Máx Throughput}}{\text{Largura de Banda}} \quad (43)$$

$$\text{Máx Eficiência Espectral}_{QPSK} = \frac{100,9}{20} \quad (44)$$

$$\text{Máx Eficiência Espectral}_{QPSK} = 5,04 \frac{\text{bits}}{\text{seg}}/\text{hertz} \quad (45)$$

Na Figura 27 é possível observar a máxima eficiência espectral no Sistema LTE para as modulações QPSK, 16 QAM e 64 QAM.

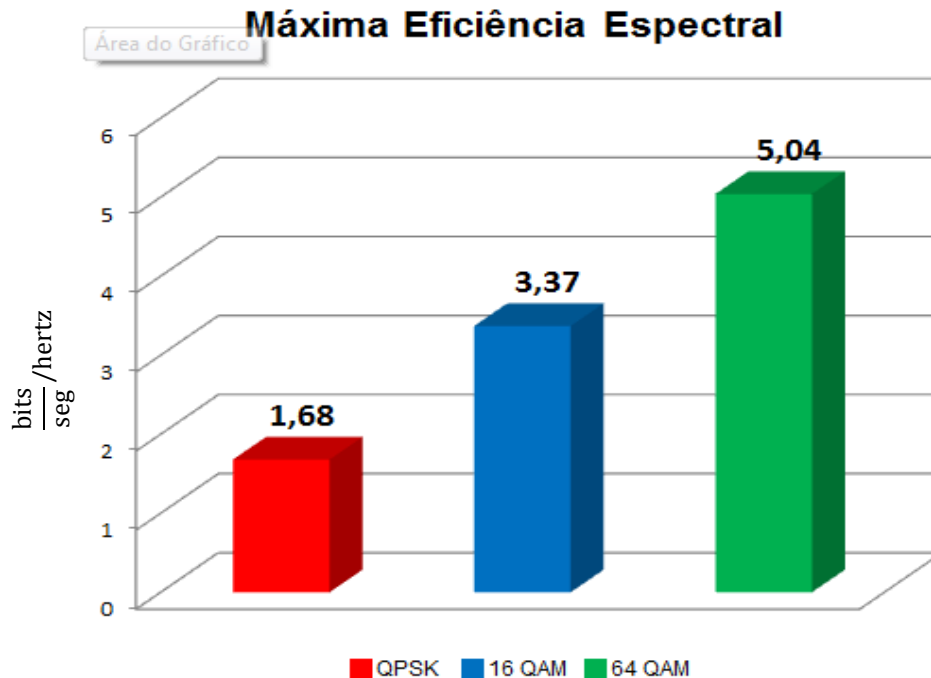


Figura 27: Máxima eficiência espectral do LTE.

4.2.6 CÁLCULO DA CAPACIDADE DO CANAL E DA RELAÇÃO SINAL RUÍDO

Cada modulação utilizada nos sistemas de comunicações influencia na área de serviço do sistema operante, sendo assim cada tipo de modulação possui requisitos mínimos entre os níveis de sinal, ruído e interferência.

A relação entre os sinais podem variar em pontos distintos dentro de uma mesma célula, podendo assim fazer em alguma área de cobertura o requisito mínimo que não seja atendido para os tipos de modulação disponíveis. Se isto ocorrer, a qualidade oferecida não será suficiente para que os serviços requisitados operem.

O canal utilizado é um canal AWGN, que tem como característica ser um canal com ruído branco capaz de degradar a comunicação ao ser adicionado ao sinal transmitido. Este tipo de ruído é um dos mais comportados, podendo ser modelado matematicamente através de uma gaussiana. O ruído branco é um sinal aleatório e tem um modelamento matemático que possui largura de faixa infinita, média e correlação zero entre suas amplitudes medidas em instantes de tempo distintos, ou seja, o valor da amplitude do ruído em um determinado instante independe daquele observado em outro instante de tempo qualquer. O termo gaussiano se deve

ao fato desse tipo de ruído possuir uma função densidade de probabilidade gaussiana com média zero, com desvio padrão igual à sua tensão RMS e variância igual à potência dissipada em um resistor de 1W [12].

As larguras dos canais utilizados influenciam diretamente na capacidade de um sistema, conforme o teorema de Shannon-Hartley [11], [67], que afirma que a capacidade máxima do canal, em *bits* por segundo, de um canal sujeito ao ruído pode ser calculada por:

$$C = B \times \log_2(1 + SNR) \quad (46)$$

onde,

C – Capacidade do canal [bps];

B – Largura de banda do canal utilizado [Hz];

SNR – Relação sinal ruído [dB].

A taxa máxima de comunicação R utilizada neste tipo de canal deve ser menor ou igual à capacidade C do canal de acordo com o teorema de Shannon-Hartley [11], [12].

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 [12].

Em 4.2.4, foram calculadas 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, as taxas de códigos não foram levadas em consideração. Nesta seção será determinada a capacidade dos canais e também o SNR requerido para que cada modulação seja utilizada.

Na Tabela 7 é possível observar a taxa de código de modulação que será utilizada para a base dos cálculos.

Tabela 7: Taxa de código de modulação.

Modulação	Taxa de código
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

A taxa de código indica quantos *bits* para cada tipo de modulação será usado para transmitir a 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 7, e utilizando a equação de *throughput* acrescida da taxa de códigos, têm-se os novos valores de *throughput* para o sistema.

$$Throughput = \frac{1}{T_s} \times N_b \times S_p \times R_c \quad (47)$$

onde,

T_s – Tempo de símbolo [s];

N_b – Número de *bits*;

S_p – Número de subportadoras;

R_c – Taxa de códigos de modulação.

Na Tabela 8, é possível observar os novos valores de *throughput* calculados para as modulações QPSK, 16 QAM e 64 QAM, considerando as taxas de códigos de modulação.

Tabela 8: *Throughput* considerando a taxa de código de modulação.

Largura de banda e modulação	Taxa de código de modulação	Throughput (Mbps)
5 MHz – QPSK	1/2	4,20
5 MHz – QPSK	3/4	6,31
5 MHz – 16 QAM	1/2	8,41
5 MHz – 16 QAM	3/4	12,61
5 MHz – 64 QAM	1/2	12,61
5 MHz – 64 QAM	2/3	16,81
5 MHz – 64 QAM	3/4	18,92
5 MHz – 64 QAM	5/6	21,02
10 MHz – QPSK	1/2	8,41
10 MHz – QPSK	3/4	12,61
10 MHz – 16 QAM	1/2	16,81
10 MHz – 16 QAM	3/4	25,22
10 MHz – 64 QAM	1/2	25,22
10 MHz – 64 QAM	2/3	33,63
10 MHz – 64 QAM	3/4	37,83
10 MHz – 64 QAM	5/6	42,04
15 MHz – QPSK	1/2	12,61
15 MHz – QPSK	3/4	18,92
15 MHz – 16 QAM	1/2	25,22
15 MHz – 16 QAM	3/4	37,83
15 MHz – 64 QAM	1/2	37,83
15 MHz – 64 QAM	2/3	50,44
15 MHz – 64 QAM	3/4	56,75
15 MHz – 64 QAM	5/6	63,05
20 MHz – QPSK	1/2	16,81
20 MHz – QPSK	3/4	25,22
20 MHz – 16 QAM	1/2	33,63
20 MHz – 16 QAM	3/4	50,44
20 MHz – 64 QAM	1/2	50,44

Largura de banda e modulação	Taxa de código de modulação	Throughput (Mbps)
20 MHz – 64 QAM	2/3	67,26
20 MHz – 64 QAM	3/4	75,67
20 MHz – 64 QAM	5/6	84,07

Os valores calculados representam a capacidade máxima do canal para cada largura de faixa do canal, assim encontrar o SNR requerido para cada modulação e taxa de código conforme equação 48.

Para o cálculo do SNR, considerando a largura de banda de 15 MHz e o *throughput* de 63,05 Mbps. Para o cálculo utiliza-se a mesma da equação 46, tem-se:

$$C = B \times \log_2(1 + SNR) \quad (48)$$

$$63,05 = 15 \times \log_2(1 + SNR) \quad (49)$$

$$SNR = 17,4216 \quad (50)$$

Ao passar esse valor para decibel tem-se:

$$SNR_{dB} = 10 \log SNR \quad (51)$$

$$SNR_{dB} = 12,4109 \text{ dB} \quad (52)$$

Para cada modulação e taxa de código é possível ter um valor de SNR. Na Tabela 9 são mostrados esses valores.

Tabela 9: SNR para cada modulação e taxa de código de modulação.

Modulação	Taxa de código de modulação	SNR (dB)
QPSK	1/2	-1,02
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

4.2.7 RAIÓ MÁXIMO EM FUNÇÃO DA MODULAÇÃO E SNR

Em 4.2.3 foi calculado o raio teórico para o sistema, desprezando a relação sinal ruído existente em qualquer sistema de comunicação. Considerando o SNR como zero é possível calcular apenas o número de estações rádio base para cobrir a área de interesse. O valor encontrado em 4.2.3 é importante, 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 de dados [11], [12].

Neste subcapítulo serão levados em consideração os valores de SNR calculados na Tabela 9, a fim de determinar os raios máximos de modulação e respectivo *throughput*.

No LTE, o principal indicador relacionado à capacidade de transferência de dados é a distribuição do SNR ao longo da célula, usando *softwares* apropriados é possível levar em consideração o relevo do local onde o sistema será implantado, o que permite um resultado cada vez mais próximo da prática.

Conforme já calculado no subcapítulo anterior, a máxima perda permitida no sistema (L) ocorre no *uplink*, considerando este o pior caso e substituindo os valores de SNR calculados para cada modulação e taxa de código, calcula-se o raio máximo utilizando os dados abaixo:

Potência de transmissão 23 dBm;

Ganho da antena transmissora 0 dBi;

Perdas na transmissão 0 dB;

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 5 dB;

* SNR em dB será variável de acordo com a modulação.

A equação de perda no *uplink* utilizada é a mesma já apresentada anteriormente e é mostrada na equação 53. Como exemplo será considerado uma largura de banda de 15 MHz, o *throughput* de 63,05 Mbps para uma modulação de 64 QAM e SNR de 12,4109 dB.

$$L_{Uplink} = P_{tx} + G_{tx} - L_{tx} - SNR_{Req} - S_{rx} + G_{rx} - L_{rx} + G_{dv} - M \quad (53)$$

$$L_{Uplink} = 23 + 0 - 0 - 12,4109 - (-101,5) + 18 - 3 + 3 - 5 \quad (54)$$

$$L_{Uplink} = 125,09 \text{ dB} \quad (55)$$

Calculado o valor de L no sistema é possível calcular o máximo raio para a modulação escolhida através da equação 56.

$$L = A + 10\alpha \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_f + X_h + S \quad (56)$$

Com todos os fatores calculados, usa-se o novo valor da perda de propagação (L) calculado para realizar o balanceamento do canal, assim é possível determinar o raio máximo da célula (d).

Substituindo os valores na equação 56 e considerando a maior perda de percurso que é a de *uplink* determina-se:

$$125,09 = 80,74 + 10 \times 4,79 \log\left(\frac{d}{100}\right) + 0,6836 + 0 + 4 \quad (57)$$

$$d \cong 673 \text{ m} \quad (58)$$

Para as demais modulações, à distância ou raio máximo será apresentado na Tabela 10, esses valores foram obtidos da mesma forma apresentado no exemplo anterior.

Tabela 10: Raio máximo para cada modulação, taxa de código e SNR.

Modulação	Taxa de código de modulação	SNR (dB)	Raio (m)
QPSK	1/2	-1,02	1283,761
QPSK	3/4	1,45	1140,036
16 QAM	1/2	3,44	1036,033
16 QAM	3/4	6,76	883,2073
64 QAM	1/2	6,76	883,2073
64 QAM	2/3	9,68	767,5423
64 QAM	3/4	11,06	718,2775
64 QAM	5/6	12,41	673,1449

À medida que a distância entre a transmissão e a recepção se torna maior, os níveis de sinal ruído diminuem 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 mais bem alocadas para que o serviço escolhido seja mantido operante.

A variação de *throughput* em função da distância pode ser observada na Figura 28, Figura 29, Figura 30, Figura 31 que apresentam os gráficos de *throughput* versus distância para as quatro larguras de bandas apresentadas neste capítulo. A análise gráfica permite observar que a máxima distância de atuação das modulações não se altera com 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, ou seja, a sensibilidade na recepção varia à medida que a largura de faixa muda conforme mostrado anteriormente nas seções 4.2.1 e 4.2.2.

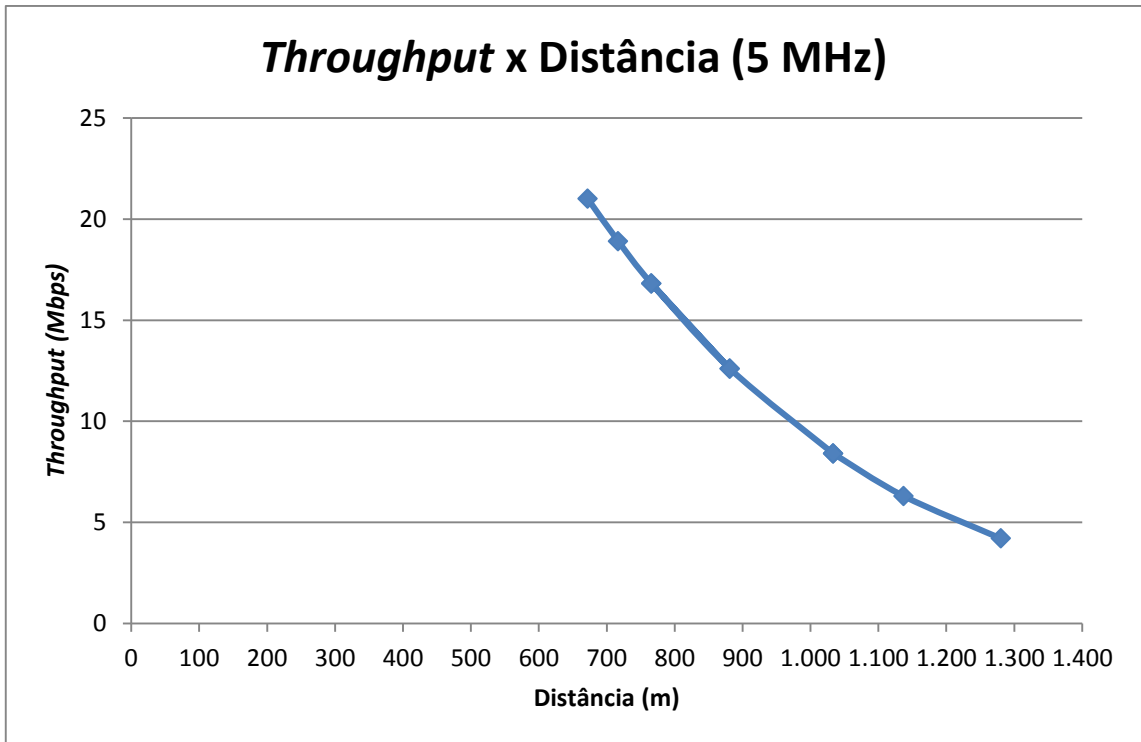


Figura 28: Variação do *throughput* pela distância para largura de banda de 5 MHz.

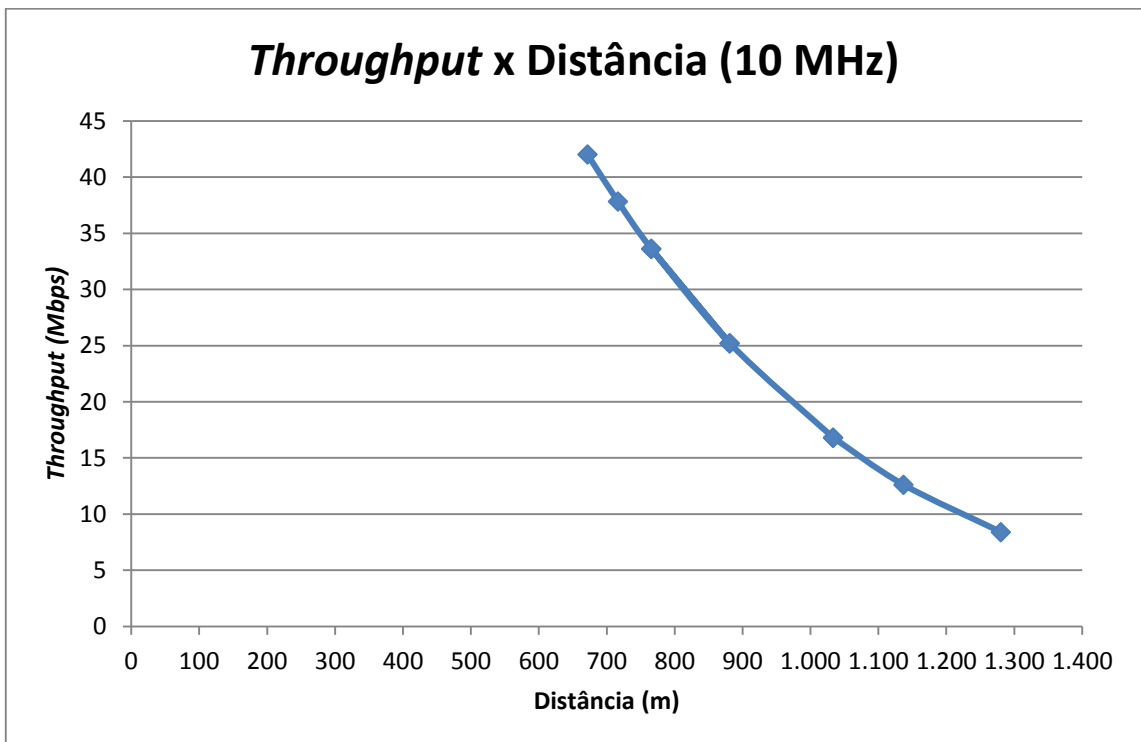


Figura 29: Variação do *throughput* pela distância para largura de banda de 10 MHz.

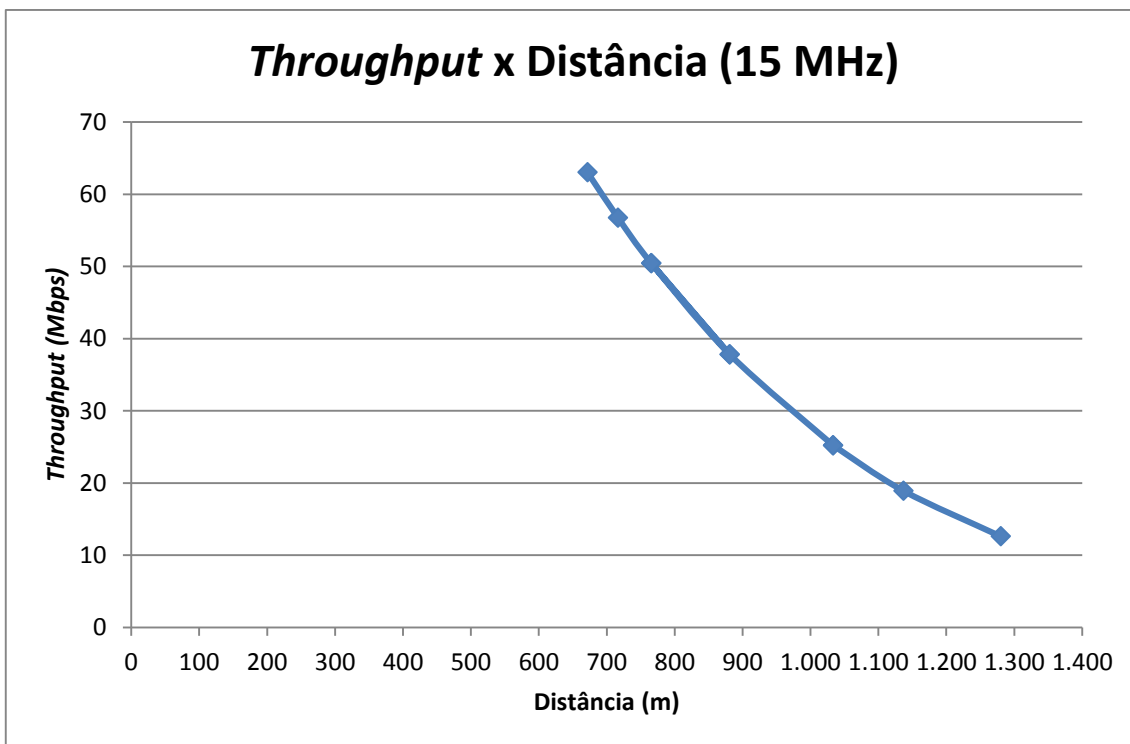


Figura 30: Variação do *throughput* pela distância para largura de banda de 15 MHz.

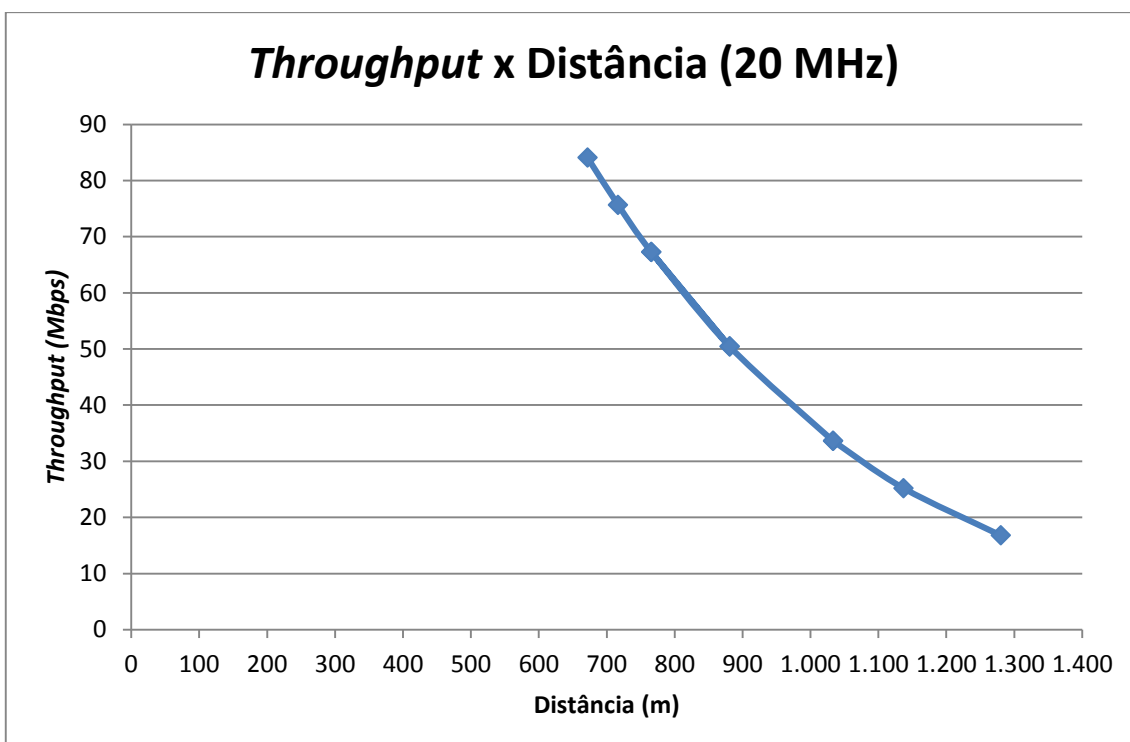


Figura 31: Variação do *throughput* pela distância para largura de banda de 20 MHz.

Na Tabela 11, é possível analisar todos os parâmetros calculados neste capítulo. Conforme se observa na tabela o máximo *throughput* atingido é com a largura de faixa de 20

MHz e é de aproximadamente 100,9 Mbps. Tendo que esse é o maior valor obtido, 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* por símbolo (64 QAM), ou seja, taxa de código igual a 1.

Tabela 11: Resumo de todos os parâmetros calculados para as larguras de banda de 5 MHz – 20 MHz.

Largura de banda (MHz)	Modulação	Subportadoras	Bits/Simb	Taxa de código	SNR (dB)	Throughput (Mbps)	Perda de propagação (dB)	Distância (m)
5	QPSK	300	2	0,50	-1,0185	4,2036	138,5185	1280,1779
5	QPSK	300	2	0,75	1,4512	6,3054	136,0488	1137,0088
5	QPSK	300	2	1,00	3,4390	8,4072	134,0610	1033,4953
5	16 QAM	300	4	0,50	3,4390	8,4072	134,0610	1033,4953
5	16 QAM	300	4	0,75	6,7619	12,6109	130,7381	881,0689
5	16 QAM	300	4	1,00	9,6792	16,8145	127,8208	765,8927
5	64 QAM	300	6	0,50	6,7619	12,6109	130,7381	881,0689
5	64 QAM	300	6	0,67	9,6792	16,8145	127,8208	765,8927
5	64 QAM	300	6	0,75	11,0613	18,9163	126,4387	716,7137
5	64 QAM	300	6	0,83	12,4118	21,0181	125,0882	671,7070
5	64 QAM	300	6	1,00	15,0514	25,2217	122,4486	591,7419
10	QPSK	600	2	0,50	-1,0185	8,4072	138,5185	1280,1779
10	QPSK	600	2	0,75	1,4512	12,6109	136,0488	1137,0088
10	QPSK	600	2	1,00	3,4390	16,8145	134,0610	1033,4953
10	16 QAM	600	4	0,50	3,4390	16,8145	134,0610	1033,4953
10	16 QAM	600	4	0,75	6,7619	25,2217	130,7381	881,0689
10	16 QAM	600	4	1,00	9,6792	33,6290	127,8208	765,8927
10	64 QAM	600	6	0,50	6,7619	25,2217	130,7381	881,0689
10	64 QAM	600	6	0,67	9,6792	33,6290	127,8208	765,8927
10	64 QAM	600	6	0,75	11,0613	37,8326	126,4387	716,7137
10	64 QAM	600	6	0,83	12,4118	42,0362	125,0882	671,7070
10	64 QAM	600	6	1,00	15,0514	50,4435	122,4486	591,7419
15	QPSK	900	2	0,50	-1,0185	12,6109	138,5185	1280,1779
15	QPSK	900	2	0,75	1,4512	18,9163	136,0488	1137,0088
15	QPSK	900	2	1,00	3,4390	25,2217	134,0610	1033,4953
15	16 QAM	900	4	0,50	3,4390	25,2217	134,0610	1033,4953
15	16 QAM	900	4	0,75	6,7619	37,8326	130,7381	881,0689
15	16 QAM	900	4	1,00	9,6792	50,4435	127,8208	765,8927
15	64 QAM	900	6	0,50	6,7619	37,8326	130,7381	881,0689
15	64 QAM	900	6	0,67	9,6792	50,4435	127,8208	765,8927
15	64 QAM	900	6	0,75	11,0613	56,7489	126,4387	716,7137
15	64 QAM	900	6	0,83	12,4118	63,0544	125,0882	671,7070
15	64 QAM	900	6	1,00	15,0514	75,6652	122,4486	591,7419

Largura de banda (MHz)	Modulação	Subportadoras	Bits/Simb	Taxa de código	SNR (dB)	Throughput (Mbps)	Perda de propagação (dB)	Distância (m)
20	QPSK	1200	2	0,50	-1,0185	16,8145	138,5185	1280,1779
20	QPSK	1200	2	0,75	1,4512	25,2217	136,0488	1137,0088
20	QPSK	1200	2	1,00	3,4390	33,6290	134,0610	1033,4953
20	16 QAM	1200	4	0,50	3,4390	33,6290	134,0610	1033,4953
20	16 QAM	1200	4	0,75	6,7619	50,4435	130,7381	881,0689
20	16 QAM	1200	4	1,00	9,6792	67,2580	127,8208	765,8927
20	64 QAM	1200	6	0,50	6,7619	50,4435	130,7381	881,0689
20	64 QAM	1200	6	0,67	9,6792	67,2580	127,8208	765,8927
20	64 QAM	1200	6	0,75	11,0613	75,6652	126,4387	716,7137
20	64 QAM	1200	6	0,83	12,4118	84,0725	125,0882	671,7070
20	64 QAM	1200	6	1,00	15,0514	100,8870	122,4486	591,7419

4.3 LINK BUDGET PARA DOWNLINK E UPLINK EM 700 MHz

Esta seção tem como característica apresentar o *link budget* na faixa de 700 MHz, faixa esta que será utilizada para o LTE no Brasil a partir de 2018. Serão apresentados os mesmos cálculos da seção 4.2, sendo considerado os 3 tipos de modulação, QPSK, 16 QAM e 64 QAM.

4.3.1 LINK BUDGET PARA DOWNLINK

Os parâmetros que serão utilizados para a faixa de 700 MHz serão os mesmos já empregados para a faixa de 2,5 GHz. Os valores adotados para o cálculo do *link budget* de *downlink* são mostrados na abaixo:

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: 5 dB.

O valor da sensibilidade requerida na recepção adotado para o cálculo do *link budget* de *downlink* é de -92 dBm (a maior sensibilidade requerida com modulação QPSK, para 20 MHz de largura de banda).

Utilizando a equação 59 e a sensibilidade para o pior caso que é de -92 dBm, pode-se determinar o valor de L em dB para *downlink*.

$$L_{Downlink} = P_{tx} + G_{tx} - L_{tx} - SNR_{Req} - S_{rx} + G_{rx} - L_{rx} + G_{dv} - M \quad (59)$$

$$L_{Downlink} = 48 + 18 - 3 - 0 - (-92) + 0 - 0 + 0 - 5 \quad (60)$$

$$L_{Downlink} = 150 \text{ dB} \quad (61)$$

4.3.2 LINK BUDGET PARA UPLINK

Os parâmetros necessários e os valores adotados para o cálculo do *link budget* de *uplink* são mostrados na sequência.

Potência de transmissão 23 dBm;

Ganho da antena transmissora 0 dBi;

Perdas na transmissão 0 dB;

SNR 0 dB;

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 5 dB.

Utilizando a equação 62 e a sensibilidade para o pior caso que é de -101,5 dBm, determina-se o valor de L em dB para *uplink*.

$$L_{Uplink} = P_{tx} + G_{tx} - L_{tx} - SNR_{Req} - S_{rx} + G_{rx} - L_{rx} + G_{dv} - M \quad (62)$$

$$L_{Uplink} = 23 + 0 - 0 - 0 - (-101,5) + 18 - 3 + 3 - 5 \quad (63)$$

$$L_{Uplink} = 137,5 \text{ dB} \quad (64)$$

4.3.3 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA LTE EM 700 MHz

O dimensionamento do sistema na faixa de 700 MHz seguem os mesmos princípios já empregados na seção 4.2. Os itens para dimensionamento são: as características de tráfego dos usuários da rede, distância entre transmissor e receptor, fatores de terreno, altura das antenas transmissoras e receptoras e as frequências utilizadas. Alguns fatores são essenciais para o dimensionamento:

- Topologia da rede: Fator este que influencia diretamente a capacidade da rede e a área de cobertura dos serviços. A topologia pode ser em barramento, estrela, anel, árvore, *mesh* e modos mistos, sendo que cada topologia tem as suas particularidades.
- Largura de banda e *throughput*: Fator importante para definir quantos *bits* por segundo estarão sendo transmitidos no sistema, ou seja, a vazão é uma medida importante para definir quais aplicações poderão ser implementadas.
- Padronização: Fator que deve ser seguido devido a diversidade de equipamentos existentes no mercado. Seguir as recomendações do 3GPP e órgãos responsáveis pelas comunicações é de extrema importância para o dimensionamento do sistema.

O modelo de propagação que será usado é o SUI, a escolha do mesmo é para fins de comparação dos parâmetros calculados para as duas faixas de frequência.

Para fim de demonstração de dimensionamento, neste trabalho será considerado o pior caso, sendo o terreno do tipo A, resultando em uma quantidade maior de estações rádio base.

Para calcular a perda de propagação o modelo SUI segue as fórmulas já apresentadas na seção 4.2, e para esta seção 4.3 as mesmas serão utilizadas para a frequência de 700 MHz.

Considera-se para cálculo a frequência do LTE em 700 MHz, altura da recepção 2 metros e um rádio base a 30 metros, sendo o desvanecimento 4 dB, pode-se obter a máxima distância de atuação da célula (*d*) através das equações anteriores, conforme mostrado nos cálculos a seguir.

Utilizando a equação 65 é possível calcular a perda no espaço livre para o sistema, conforme demonstrado abaixo:

$$A = 20 \log \left(\frac{4\pi 100}{3 \times 10^8 / 700 \times 10^6} \right) \quad (65)$$

$$A = 69,343 \text{ dB} \quad (66)$$

A partir da equação 67 e com o valor de frequência adotado se calcula a correção de frequência conforme abaixo:

$$X_f = 6 \log\left(\frac{f}{2000}\right) \quad (67)$$

$$X_f = 6 \log\left(\frac{700}{2000}\right) \quad (68)$$

$$X_f = -2,7355 \text{ dB} \quad (69)$$

A correção da altura da antena receptora pode ser feita pela equação 70, e é mostrada abaixo:

$$X_h = -10,8 \log\left(\frac{h}{2}\right) \quad (70)$$

$$X_h = -10,8 \log\left(\frac{2}{2}\right) \quad (71)$$

$$X_h = 0 \text{ dB} \quad (72)$$

A perda do caminho em função da altura da antena na estação rádio base deve ser calcula a partir da equação 73 e posteriormente substituída na equação 75.

$$\alpha = 4,6 - 0,0075 \times 30 + \frac{12,6}{30} \quad (73)$$

$$\alpha = 4,79 \text{ dB} \quad (74)$$

Substituindo α na equação 75, obtém:

$$L = 69,343 + 10 \times (-2,735) \log\left(\frac{d}{100}\right) + 0,6836 + 0 + 4 \quad (75)$$

Substituindo os valores e considerando a maior perda de percurso que é a de *uplink* determina-se:

$$138,5 = 69,343 + 10 \times (-2,735) \log\left(\frac{d}{100}\right) + 0,6836 + 0 + 4 \quad (76)$$

$$d \cong 2,6 \text{ Km} \quad (77)$$

4.3.4 CÁLCULO DE *THROUGHPUT* MÁXIMO

O *throughput* é calculado considerando o tempo do símbolo como visto anteriormente na seção 4.2. Para fins de comparação estão sendo adotados os mesmos parâmetros, a modulação continuará a mesma, assim o *throughput* máximo para a faixa de 700 MHz será mostrado na Tabela 12 Para uma taxa de código igual a 1.

Tabela 12: Tabela de *throughput* para as modulações QPSK, 16 QAM e 64 QAM para faixa de 700 MHz.

Largura de banda e modulação	<i>Throughput (Mbps)</i>
5 MHz – QPSK	8,4
5 MHz – 16 QAM	16,8
5 MHz – 64 QAM	25,2
10 MHz – QPSK	16,8
10 MHz – 16 QAM	33,6
10 MHz – 64 QAM	50,4
15 MHz – QPSK	25,2
15 MHz – 16 QAM	50,4
15 MHz – 64 QAM	75,7
20 MHz – QPSK	33,6
20 MHz – 16 QAM	67,9
20 MHz – 64 QAM	100,9

No gráfico da Figura 32 é apresentado o resultado final do *throughput* da camada física do LTE para as três modulações e faixa de operação de 5 - 20 MHz, como o *throughput* é independente da frequência, então dispõe-se do mesmo resultado para as duas faixas de operação.

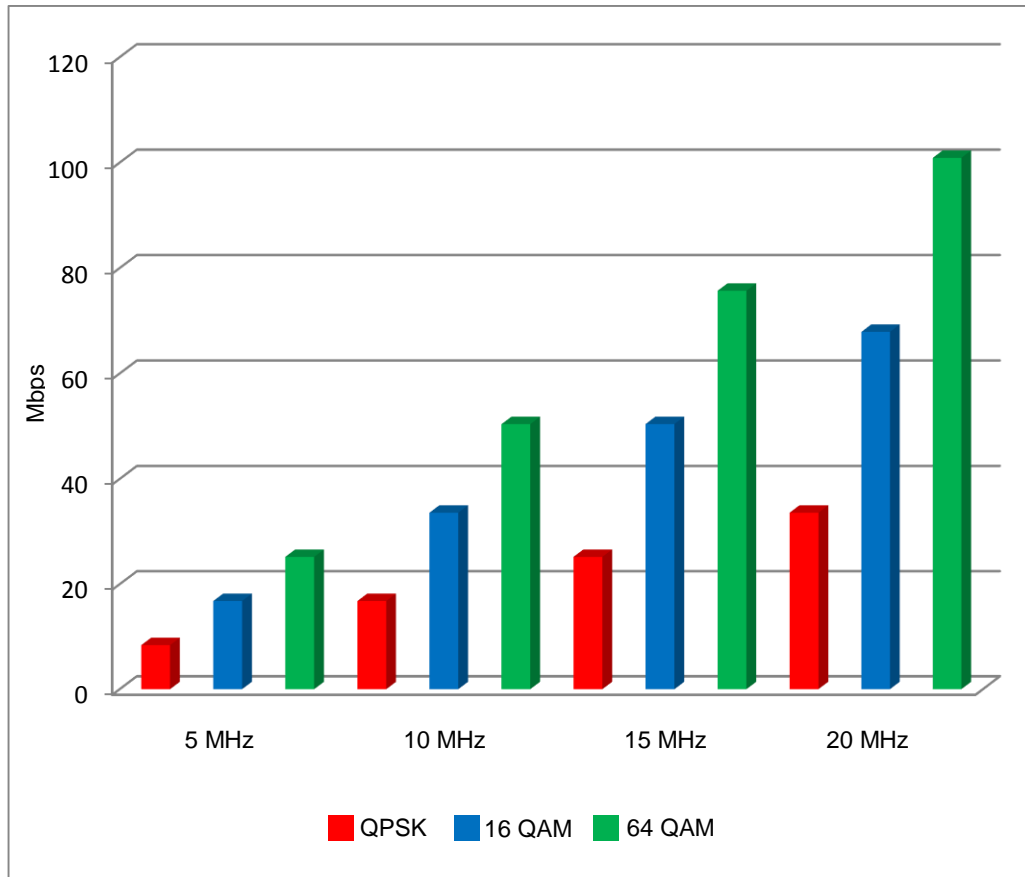


Figura 32: Gráfico do *throughput* na camada física do LTE faixa 700 MHz.

4.3.5 CÁLCULO DA MÁXIMA EFICIÊNCIA ESPECTRAL

Conforme visto anteriormente na seção 4.2.5, a largura de banda do canal de comunicação é um recurso extremamente importante e que deve ser adequado para o sistema operante. A eficiência espectral é a relação entre o número de *bits* transmitidos por segundo e a largura de banda ocupada pelo sinal transmitido, servindo de medida de qualidade em relação a estes atributos. Como o *throughput* calculado para as duas faixas foram o mesmo e estão adotando as mesmas larguras de banda, então a eficiência espectral também será a mesma para a faixa de 700 MHz.

Na Figura 33 é possível observar a máxima eficiência espectral no Sistema LTE para as modulações QPSK, 16QAM e 64QAM, e notar que não houve variação para com relação à frequência de 2,5 GHz.

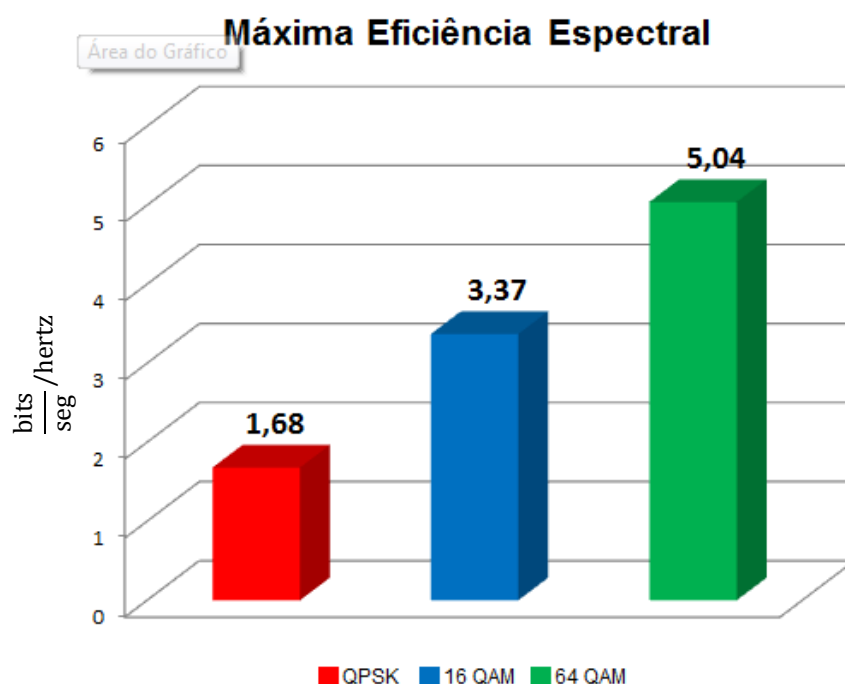


Figura 33: Máxima eficiência espectral do LTE faixa de 700 MHz.

4.3.6 CÁLCULO DA CAPACIDADE DO CANAL E DA RELAÇÃO SINAL RUÍDO EM 700 MHz

Conforme apresentado na seção 4.2.6 para faixa de 2,5 GHz, a relação entre os sinais podem variar em pontos distintos dentro de uma mesma célula, o que faz com que os requisitos mínimos para operação do sistema não estejam fazendo em uma área de cobertura o requisito mínimo não atendendo o que permite que a qualidade oferecida não seja real.

Para a faixa de 700 MHz, o canal utilizado será o AWGN, que tem como característica ser um canal com ruído branco capaz de degradar a comunicação ao ser adicionado ao sinal transmitido e para fins de estudo pode ser modelado através de uma gaussiana.

A capacidade máxima do canal, em *bits* por segundo, de um canal sujeito ao ruído pode ser calculada conforme já mostrado em 4.2.6.

Levando em consideração os valores das taxas de códigos de cada modulação, têm-se os novos valores de *throughput* para o sistema. Na Tabela 13, é possível observar os novos valores de *throughput* calculados para as modulações QPSK, 16 QAM e 64 QAM, considerando as taxas de códigos de modulação.

Tabela 13: *Throughput* considerando a taxa de código de modulação.

Largura de banda e modulação	Taxa de código de modulação	<i>Throughput</i> (Mbps)
5 MHz – QPSK	1/2	4,20
5 MHz – QPSK	3/4	6,31
5 MHz – 16 QAM	1/2	8,41
5 MHz – 16 QAM	3/4	12,61
5 MHz – 64 QAM	1/2	12,61
5 MHz – 64 QAM	2/3	16,81
5 MHz – 64 QAM	3/4	18,92
5 MHz – 64 QAM	5/6	21,02
10 MHz - QPSK	1/2	8,41
10 MHz - QPSK	3/4	12,61
10 MHz – 16 QAM	1/2	16,81
10 MHz – 16 QAM	3/4	25,22
10 MHz – 64 QAM	1/2	25,22
10 MHz – 64 QAM	2/3	33,63
10 MHz – 64 QAM	3/4	37,83
10 MHz – 64 QAM	5/6	42,04
15 MHz - QPSK	1/2	12,61
15 MHz - QPSK	3/4	18,92
15 MHz – 16 QAM	1/2	25,22
15 MHz – 16 QAM	3/4	37,83
15 MHz – 64 QAM	1/2	37,83
15 MHz – 64 QAM	2/3	50,44
15 MHz – 64 QAM	3/4	56,75
15 MHz – 64 QAM	5/6	63,05
20 MHz - QPSK	1/2	16,81
20 MHz - QPSK	3/4	25,22
20 MHz – 16 QAM	1/2	33,63
20 MHz – 16 QAM	3/4	50,44
20 MHz – 64 QAM	1/2	50,44

Largura de banda e modulação	Taxa de código de modulação	Throughput (Mbps)
20 MHz – 64 QAM	2/3	67,26
20 MHz – 64 QAM	3/4	75,67
20 MHz – 64 QAM	5/6	84,07

Os valores calculados representam a capacidade máxima do canal para cada largura de faixa, a partir desses valores é possível encontrar os valores de SNR para o sistema de acordo com a modulação e taxa de código. Na Tabela 14 é possível observar todos os valores.

Tabela 14: SNR para cada modulação e taxa de código de modulação.

Modulação	Taxa de código de modulação	SNR (dB)
QPSK	1/2	-1,02
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

4.3.7 RAIOS MÁXIMO EM FUNÇÃO DA MODULAÇÃO E SNR EM 700 MHz

Em 4.2.3 foi calculado o raio teórico para o sistema em 700 MHz, desprezando a relação sinal ruído existente em qualquer sistema de comunicação, ou seja, foi considerado SNR igual a 0.

Para fins de comparação, neste subcapítulo serão levados em consideração os valores de SNR calculados na Tabela 14, a fim de determinar os raios máximos e respectivos *throughput*.

Para cálculo dos raios serão considerados os dados abaixo:

Potência de transmissão 23 dBm;

Ganho da antena transmissora 0 dBi;

- Perdas na transmissão 0 dB;
- 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 5 dB;
- * SNR em dB será variável de acordo com a modulação.

À distância ou raio máximo será apresentado na Tabela 15, esses valores foram obtidos da mesma forma apresentado na seção 4.2.7.

Tabela 15: Raio máximo para cada modulação, taxa de código e SNR.

Modulação	Taxa de código de modulação	SNR (dB)	Raio (m)
QPSK	1/2	-1,02	1283,761
QPSK	3/4	1,45	1140,036
16 QAM	1/2	3,44	1036,033
16 QAM	3/4	6,76	883,2073
64 QAM	1/2	6,76	883,2073
64 QAM	2/3	9,68	767,5423
64 QAM	3/4	11,06	718,2775
64 QAM	5/6	12,41	673,1449

Da mesma forma que já apresentado na seção 4.3.7, tem-se que à medida que a distância entre a transmissão e a recepção se torna maior, os níveis de sinal ruído diminuem 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 mais bem alocadas para que o serviço escolhido seja mantido operante.

A variação de *throughput* em função da distância pode ser observada na Figura 34 até Figura 37 que apresentam os gráficos de *throughput* versus distância para as quatro larguras de bandas apresentadas neste capítulo. A análise gráfica permite observar que a máxima distância de atuação das modulações não se altera com 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, ou seja, a sensibilidade na recepção varia à medida que a largura de faixa muda.

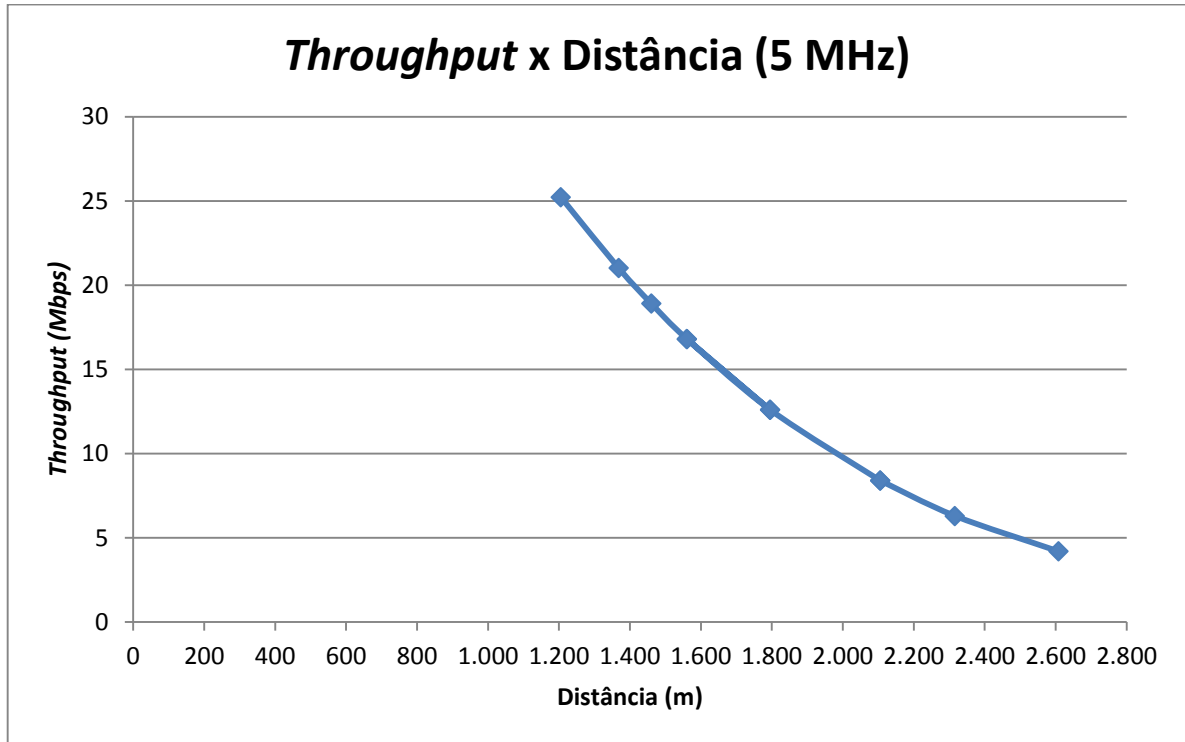


Figura 34: Variação do *throughput* pela distância para largura de banda de 5 MHz.

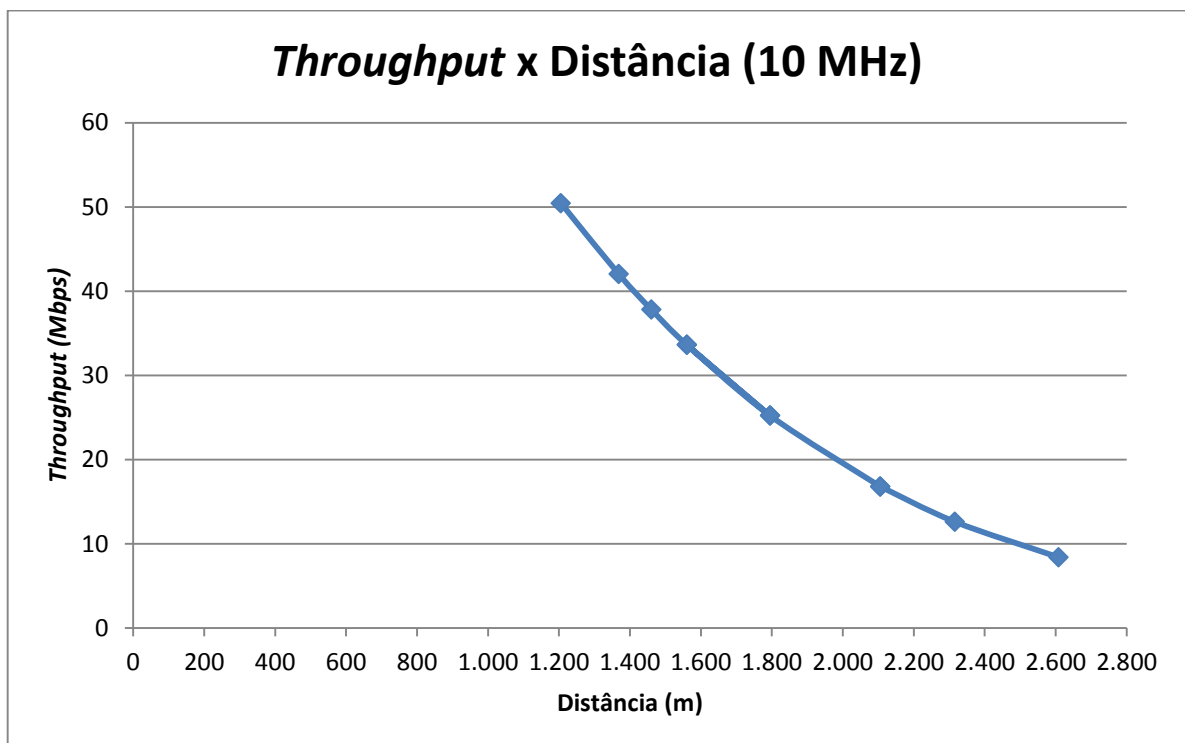


Figura 35: Variação do *throughput* pela distância para largura de banda de 10 MHz.

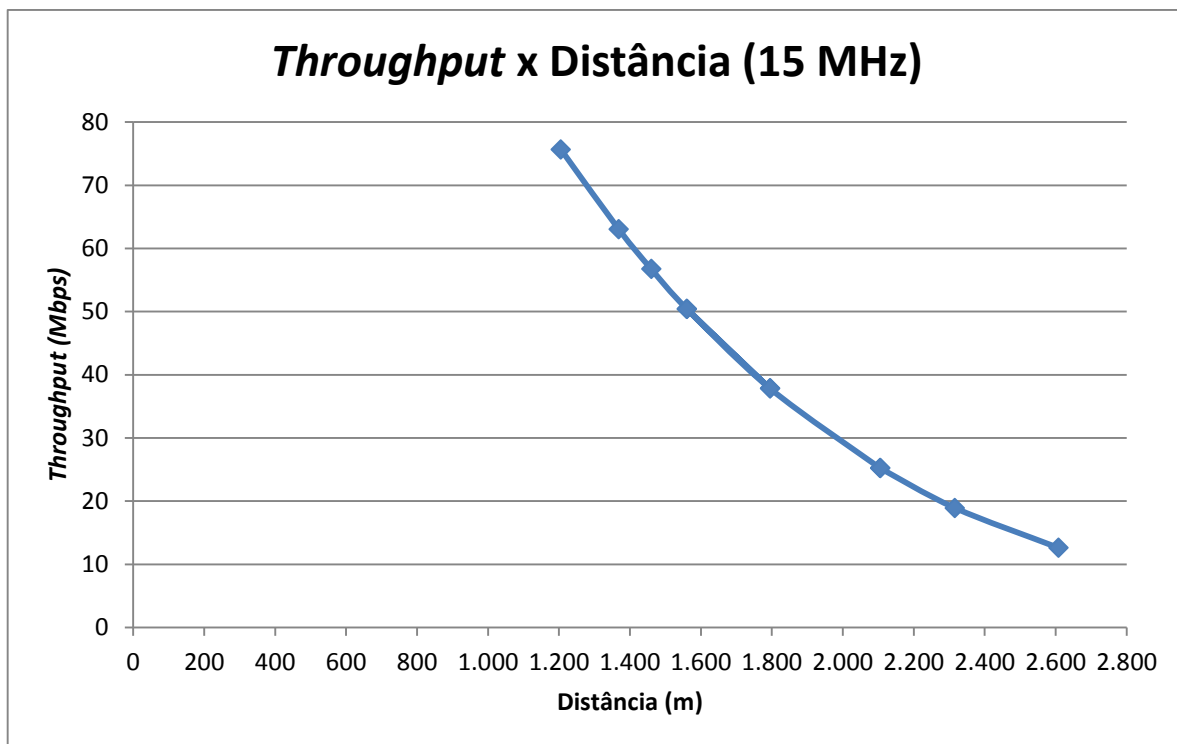


Figura 36: Variação do *throughput* pela distância para largura de banda de 15 MHz.

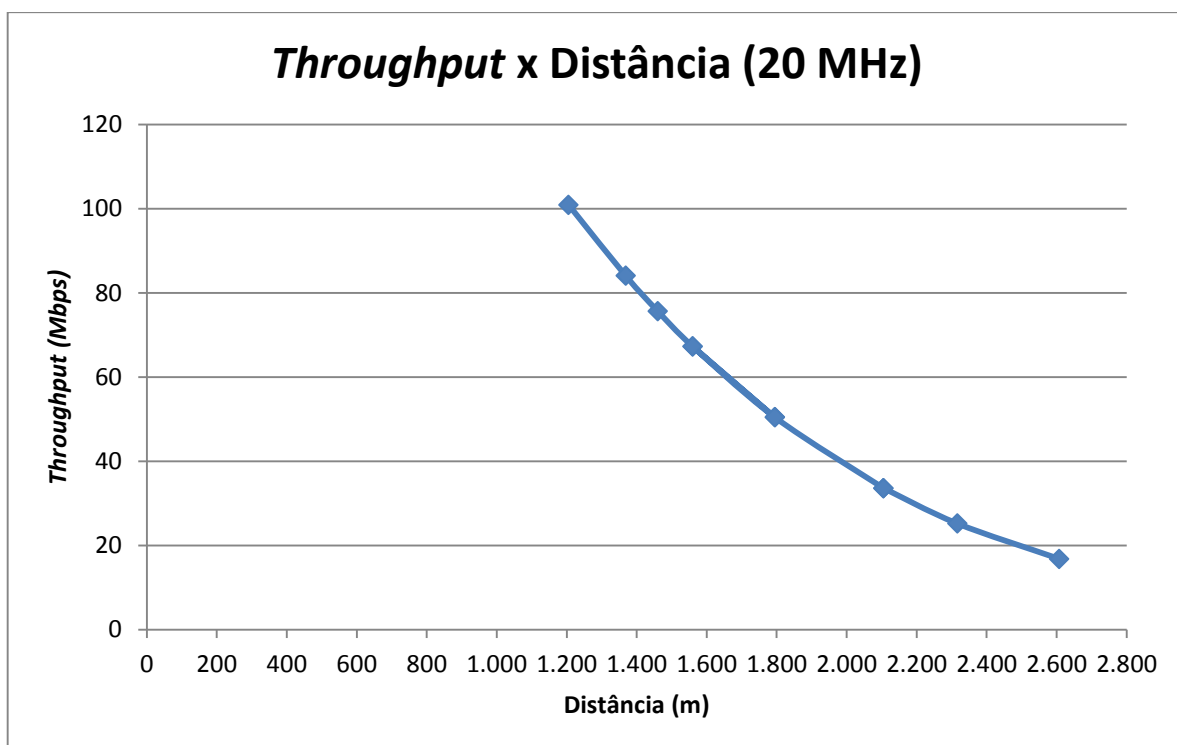


Figura 37: Variação do *throughput* pela distância para largura de banda de 20 MHz.

Na Tabela 16, é possível analisar todos os parâmetros calculados neste capítulo. Conforme se observa na tabela o máximo *throughput* atingido também é com a largura de faixa

de 20 MHz e é de, aproximadamente, 100,9 Mbps. Tendo que esse é o maior valor obtido, 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, ou seja, taxa de código igual a 1. A diferença entre as duas faixas de operação do LTE é observada no raio máximo da célula.

Tabela 16: Resumo de todos os parâmetros calculados para as larguras de banda de 5 MHz – 20 MHz.

Largura de banda (MHz)	Modulação	Subportadoras	Bits/Simb	Taxa de código	SNR (dB)	Throughput (Mbps)	Perda de propagação (dB)	Distância (m)
5	QPSK	300	2	0,50	-1,0185	4,2036	138,5185	2607,8024
5	QPSK	300	2	0,75	1,4512	6,3054	136,0488	2316,1578
5	QPSK	300	2	1,00	3,4390	8,4072	134,0610	2105,2945
5	16 QAM	300	4	0,50	3,4390	8,4072	134,0610	2105,2945
5	16 QAM	300	4	0,75	6,7619	12,6109	130,7381	1794,7923
5	16 QAM	300	4	1,00	9,6792	16,8145	127,8208	1560,1712
5	64 QAM	300	6	0,50	6,7619	12,6109	130,7381	1794,7923
5	64 QAM	300	6	0,67	9,6792	16,8145	127,8208	1560,1712
5	64 QAM	300	6	0,75	11,0613	18,9163	126,4387	1459,9905
5	64 QAM	300	6	0,83	12,4118	21,0181	125,0882	1368,3091
5	64 QAM	300	6	1,00	15,0514	25,2217	122,4486	1205,4151
10	QPSK	600	2	0,50	-1,0185	8,4072	138,5185	2607,8024
10	QPSK	600	2	0,75	1,4512	12,6109	136,0488	2316,1578
10	QPSK	600	2	1,00	3,4390	16,8145	134,0610	2105,2945
10	16 QAM	600	4	0,50	3,4390	16,8145	134,0610	2105,2945
10	16 QAM	600	4	0,75	6,7619	25,2217	130,7381	1794,7923
10	16 QAM	600	4	1,00	9,6792	33,6290	127,8208	1560,1712
10	64 QAM	600	6	0,50	6,7619	25,2217	130,7381	1794,7923
10	64 QAM	600	6	0,67	9,6792	33,6290	127,8208	1560,1712
10	64 QAM	600	6	0,75	11,0613	37,8326	126,4387	1459,9905
10	64 QAM	600	6	0,83	12,4118	42,0362	125,0882	1368,3091
10	64 QAM	600	6	1,00	15,0514	50,4435	122,4486	1205,4151
15	QPSK	900	2	0,50	-1,0185	12,6109	138,5185	2607,8024
15	QPSK	900	2	0,75	1,4512	18,9163	136,0488	2316,1578
15	QPSK	900	2	1,00	3,4390	25,2217	134,0610	2105,2945
15	16 QAM	900	4	0,50	3,4390	25,2217	134,0610	2105,2945
15	16 QAM	900	4	0,75	6,7619	37,8326	130,7381	1794,7923
15	16 QAM	900	4	1,00	9,6792	50,4435	127,8208	1560,1712
15	64 QAM	900	6	0,50	6,7619	37,8326	130,7381	1794,7923
15	64 QAM	900	6	0,67	9,6792	50,4435	127,8208	1560,1712
15	64 QAM	900	6	0,75	11,0613	56,7489	126,4387	1459,9905

Largura de banda (MHz)	Modulação	Subportadoras	Bits/Simb	Taxa de código	SNR (dB)	Throughput (Mbps)	Perda de propagação (dB)	Distância (m)
15	64 QAM	900	6	0,83	12,4118	63,0544	125,0882	1368,3091
15	64 QAM	900	6	1,00	15,0514	75,6652	122,4486	1205,4151
20	QPSK	1200	2	0,50	-1,0185	16,8145	138,5185	2607,8024
20	QPSK	1200	2	0,75	1,4512	25,2217	136,0488	2316,1578
20	QPSK	1200	2	1,00	3,4390	33,6290	134,0610	2105,2945
20	16 QAM	1200	4	0,50	3,4390	33,6290	134,0610	2105,2945
20	16 QAM	1200	4	0,75	6,7619	50,4435	130,7381	1794,7923
20	16 QAM	1200	4	1,00	9,6792	67,2580	127,8208	1560,1712
20	64 QAM	1200	6	0,50	6,7619	50,4435	130,7381	1794,7923
20	64 QAM	1200	6	0,67	9,6792	67,2580	127,8208	1560,1712
20	64 QAM	1200	6	0,75	11,0613	75,6652	126,4387	1459,9905
20	64 QAM	1200	6	0,83	12,4118	84,0725	125,0882	1368,3091
20	64 QAM	1200	6	1,00	15,0514	100,8870	122,4486	1205,4151

5. SIMULAÇÃO DO SISTEMA LTE

Após os cálculos de *link budget* se faz necessário simular os resultados encontrados. Este capítulo tem o intuito de demonstrar os cálculos mostrados no capítulo 4 de modo a comparar o sistema LTE operando em 2,5 GHz e em 700 MHz. Para as simulações foi desenvolvido, no *software* Microsoft Excel, um programa que utiliza o modelo de propagação SUI para projetar o raio de uma célula operante na frequência desejada, além de que para o cálculo pode-se levar em consideração o *throughput*, a perda de propagação, a taxa de código, a modulação, largura de banda entre outros fatores importantes para o dimensionamento de um *link* LTE.

Na Figura 38 é mostrado a primeira parte do *software*. Esta parte é utilizada para configuração dos parâmetros do sistema destacando-se potência de transmissão, ganho da antena de transmissão, sensibilidade requerida, frequência entre outros fatores importantes que podem ser observados. Esses parâmetros são adicionados nas lacunas de cor azul claro.

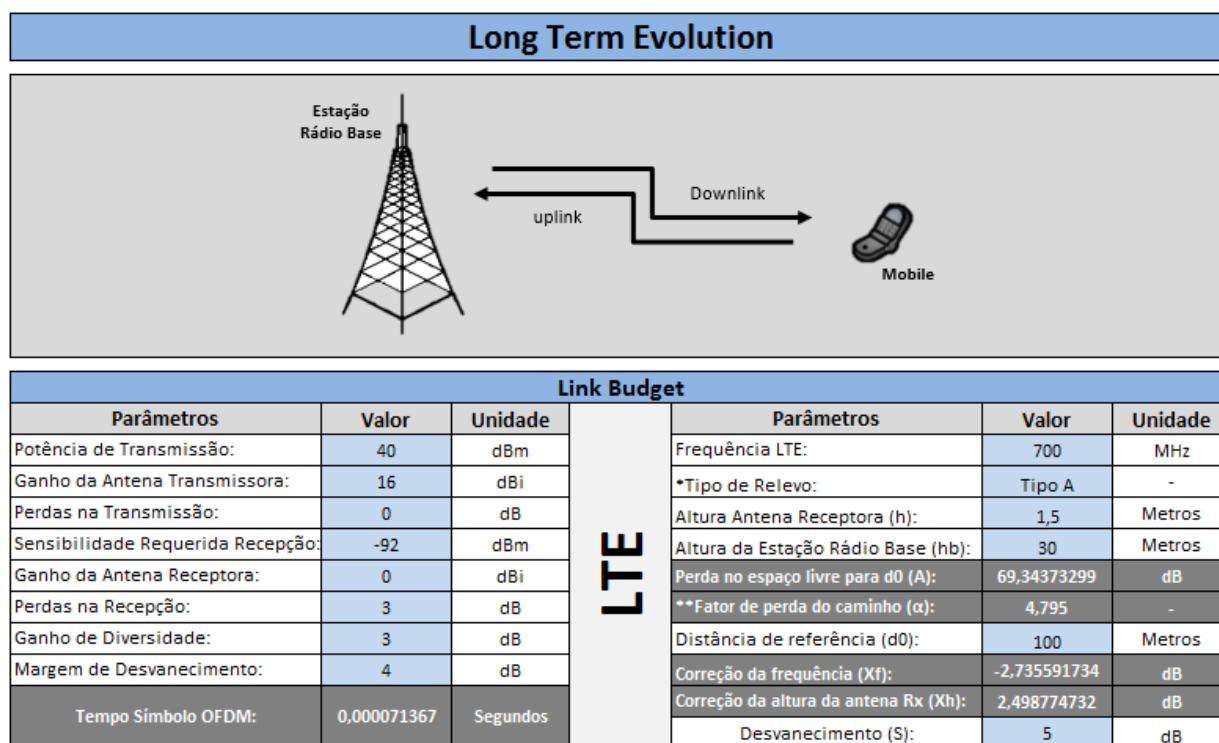


Figura 38: *Software* desenvolvido para realizar o *link budget*.

Com os parâmetros preenchidos é possível observar na segunda fase do *software* os gráficos de *throughput* X distância para as larguras de banda de 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz e 20 MHz para a frequência escolhida. A Figura 28 até Figura 31, já apresentadas anteriormente,

mostram como é graficamente no software a relação *throughput* X distância para as larguras de banda.

Com os gráficos de *throughput* X distância apresentados, é possível definir quais valores serão adotados para o dimensionamento das células de cobertura. Dependendo dos parâmetros escolhidos o raio da célula será maior ou menor.

Na terceira fase do *software* é possível dimensionar o número de estações bases necessárias para cobrir a área de interesse. A Figura 39 mostra a terceira parte do *software*, é nela parte que a área em km² que se deseja cobrir é preenchida e, a partir desse ponto, se escolhe qual será a modulação utilizada, a largura de banda e a taxa de código desejadas no dimensionamento. Será mostrado após a escolha destes dados parâmetros importantes como a relação sinal ruído, o raio da célula, área da célula, razão de reuso, distância de reuso e o número de estações rádio bases. Além desses parâmetros é sabido que ao se trabalhar com setorização se tem uma relação co-canal melhor, o *software* também permite dimensionar uma setorização tripla o que permite um ganho de até 3dB em relação um sistema operante sem setorização.

As lacunas em azul claro são as que devem ser preenchidas com os valores desejados e que melhor adequem o sistema a ser operado, no caso o sistema LTE operando em 2,5 GHz ou 700 MHz.

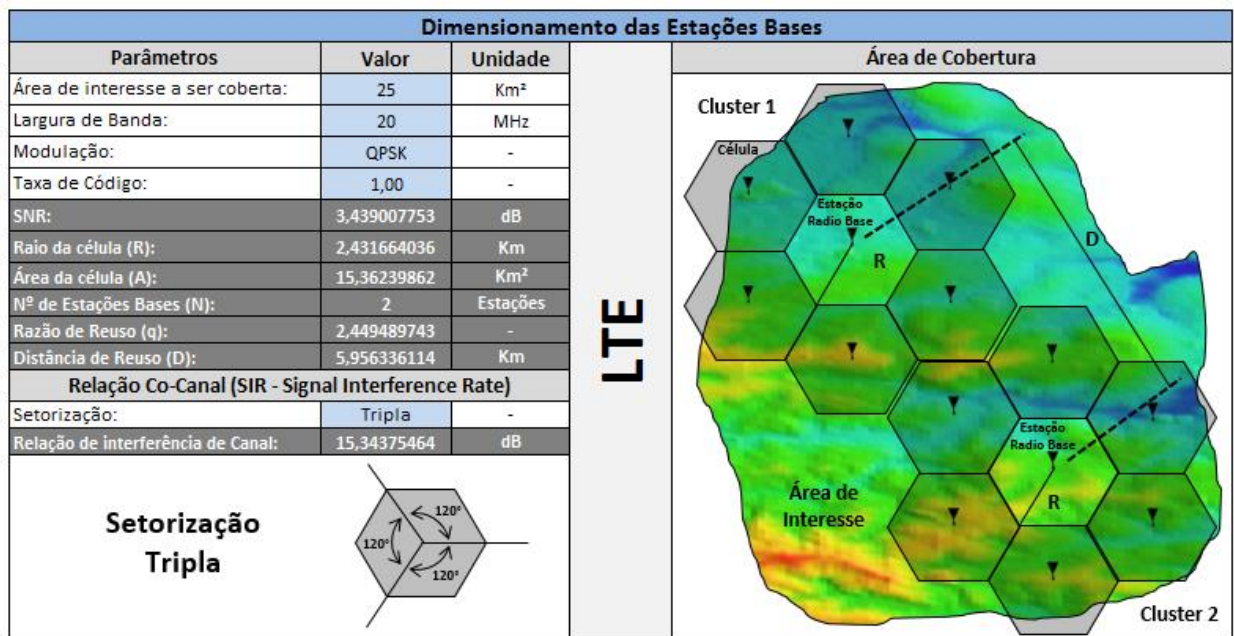


Figura 39: Terceira parte do *software* onde é possível calcular o número de estações rádio bases para cobrir uma determinada área.

Após o cálculo de *link budget* realizado no *software* e o dimensionamento estabelecido é viável utilizar um *software* de predição para analisar a propagação do sinal no terreno e obter a total cobertura da área de interesse.

A fim de comparar o sistema LTE em 2,5 GHz com um em 700 MHz um estudo de caso é apresentado na sequência, utilizando o *software* LB Network desenvolvido e o *software* de predição *radio mobile*.

5.1 ESTUDO DE CASO

Como estudo de caso, uma área de 25 km² foi escolhida na cidade de Campinas. A área possui um relevo do tipo A no modelo SUI, onde um número grande de obstáculos é levado em conta, sendo eles morros e prédios. A Figura 40 mostra a região escolhida na cidade de Campinas.

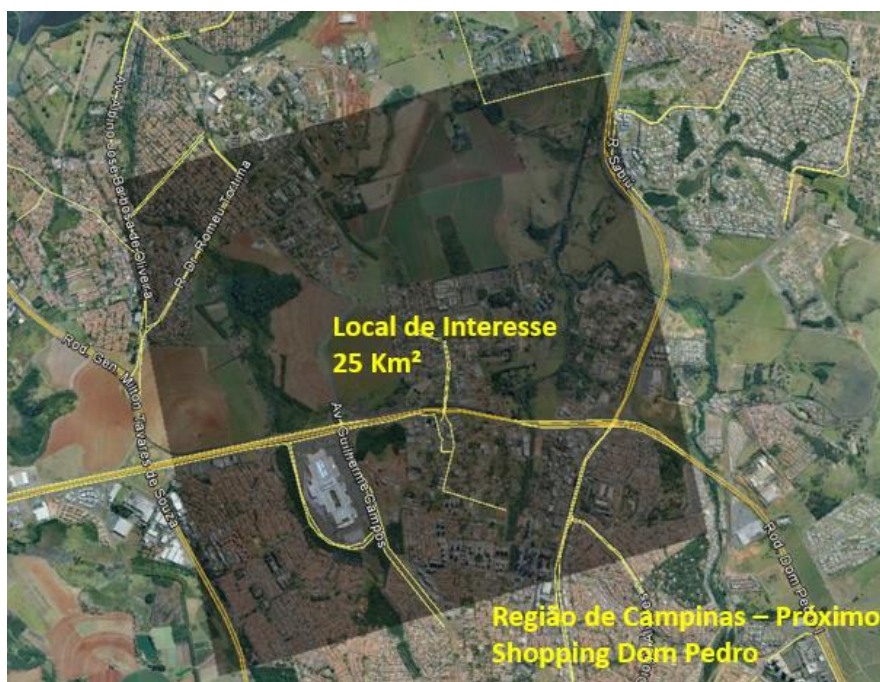


Figura 40: Local de interesse para cobertura utilizando sistema LTE.

Com a região definida os parâmetros de projeto devem ser inseridos no *software* desenvolvido.

5.1.1 SISTEMA EM 2,5 GHz

Para a faixa de frequência de 2,5 GHz as características de sistema são as mostradas na Figura 41.

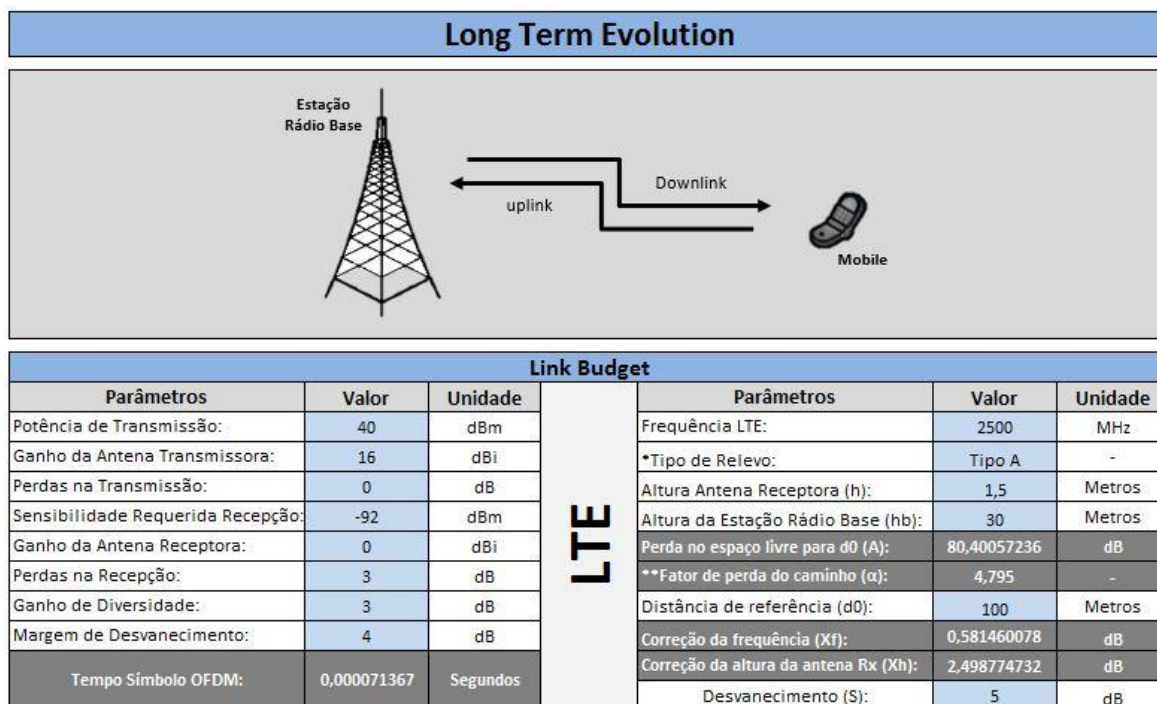


Figura 41: Parâmetros utilizados para frequência de 2,5 GHz.

Com os resultados obtidos, vede Tabela 17 e Figura 42, optou-se para fins de comparação um sistema operando com modulação QPSK, taxa de código de 1 e largura de banda de 20 MHz. Com esses parâmetros escolhidos (linha amarela na Tabela 17) o resultado de número de estações rádio bases encontrado para cobrir a região de interesse foi de 7 estações para a frequência de 2,5 GHz, esse resultado pode ser observado na Figura 43.

Tabela 17: Resultados obtidos para frequência de 2,5 GHz.

Largura de banda (MHz)	Modulação	Subportadoras	Bits/Símb.	Taxa de código	SNR (dB)	Throughput (Mbps)	Perda de propagação (dB)	Distância (m)
5	QPSK	300	2	0,50	-1,0185	4,2036	145,0185	1510,4177
5	QPSK	300	2	0,75	1,4512	6,3054	142,5488	1341,4996
5	QPSK	300	2	1,00	3,4390	8,4072	140,5610	1219,3693
5	16 QAM	300	4	0,50	3,4390	8,4072	140,5610	1219,3693
5	16 QAM	300	4	0,75	6,7619	12,6109	137,2381	1039,5290
5	16 QAM	300	4	1,00	9,6792	16,8145	134,3208	903,6383
5	64 QAM	300	6	0,50	6,7619	12,6109	137,2381	1039,5290
5	64 QAM	300	6	0,67	9,6849	16,8229	134,3151	903,3951
5	64 QAM	300	6	0,75	11,0613	18,9163	132,9387	845,6145
5	64 QAM	300	6	0,83	12,4129	21,0198	131,5871	792,4727

Largura de banda (MHz)	Modulação	Subportadoras	Bits/Símb.	Taxa de código	SNR (dB)	Throughput (Mbps)	Perda de propagação (dB)	Distância (m)
5	64 QAM	300	6	1,00	15,0514	25,2217	128,9486	698,1665
10	QPSK	600	2	0,50	-1,0185	8,4072	145,0185	1510,4177
10	QPSK	600	2	0,75	1,4512	12,6109	142,5488	1341,4996
10	QPSK	600	2	1,00	3,4390	16,8145	140,5610	1219,3693
10	16 QAM	600	4	0,50	3,4390	16,8145	140,5610	1219,3693
10	16 QAM	600	4	0,75	6,7619	25,2217	137,2381	1039,5290
10	16 QAM	600	4	1,00	9,6792	33,6290	134,3208	903,6383
10	64 QAM	600	6	0,50	6,7619	25,2217	137,2381	1039,5290
10	64 QAM	600	6	0,67	9,6849	33,6458	134,3151	903,3951
10	64 QAM	600	6	0,75	11,0613	37,8326	132,9387	845,6145
10	64 QAM	600	6	0,83	12,4129	42,0396	131,5871	792,4727
10	64 QAM	600	6	1,00	15,0514	50,4435	128,9486	698,1665
15	QPSK	900	2	0,50	-1,0185	12,6109	145,0185	1510,4177
15	QPSK	900	2	0,75	1,4512	18,9163	142,5488	1341,4996
15	QPSK	900	2	1,00	3,4390	25,2217	140,5610	1219,3693
15	16 QAM	900	4	0,50	3,4390	25,2217	140,5610	1219,3693
15	16 QAM	900	4	0,75	6,7619	37,8326	137,2381	1039,5290
15	16 QAM	900	4	1,00	9,6792	50,4435	134,3208	903,6383
15	64 QAM	900	6	0,50	6,7619	37,8326	137,2381	1039,5290
15	64 QAM	900	6	0,67	9,6849	50,4687	134,3151	903,3951
15	64 QAM	900	6	0,75	11,0613	56,7489	132,9387	845,6145
15	64 QAM	900	6	0,83	12,4129	63,0594	131,5871	792,4727
15	64 QAM	900	6	1,00	15,0514	75,6652	128,9486	698,1665
20	QPSK	1200	2	0,50	-1,0185	16,8145	145,0185	1510,4177
20	QPSK	1200	2	0,75	1,4512	25,2217	142,5488	1341,4996
20	QPSK	1200	2	1,00	3,4390	33,6290	140,5610	1219,3693
20	16 QAM	1200	4	0,50	3,4390	33,6290	140,5610	1219,3693
20	16 QAM	1200	4	0,75	6,7619	50,4435	137,2381	1039,5290
20	16 QAM	1200	4	1,00	9,6792	67,2580	134,3208	903,6383
20	64 QAM	1200	6	0,50	6,7619	50,4435	137,2381	1039,5290
20	64 QAM	1200	6	0,67	9,6849	67,2916	134,3151	903,3951
20	64 QAM	1200	6	0,75	11,0613	75,6652	132,9387	845,6145
20	64 QAM	1200	6	0,83	12,4129	84,0792	131,5871	792,4727
20	64 QAM	1200	6	1,00	15,0514	100,8870	128,9486	698,1665

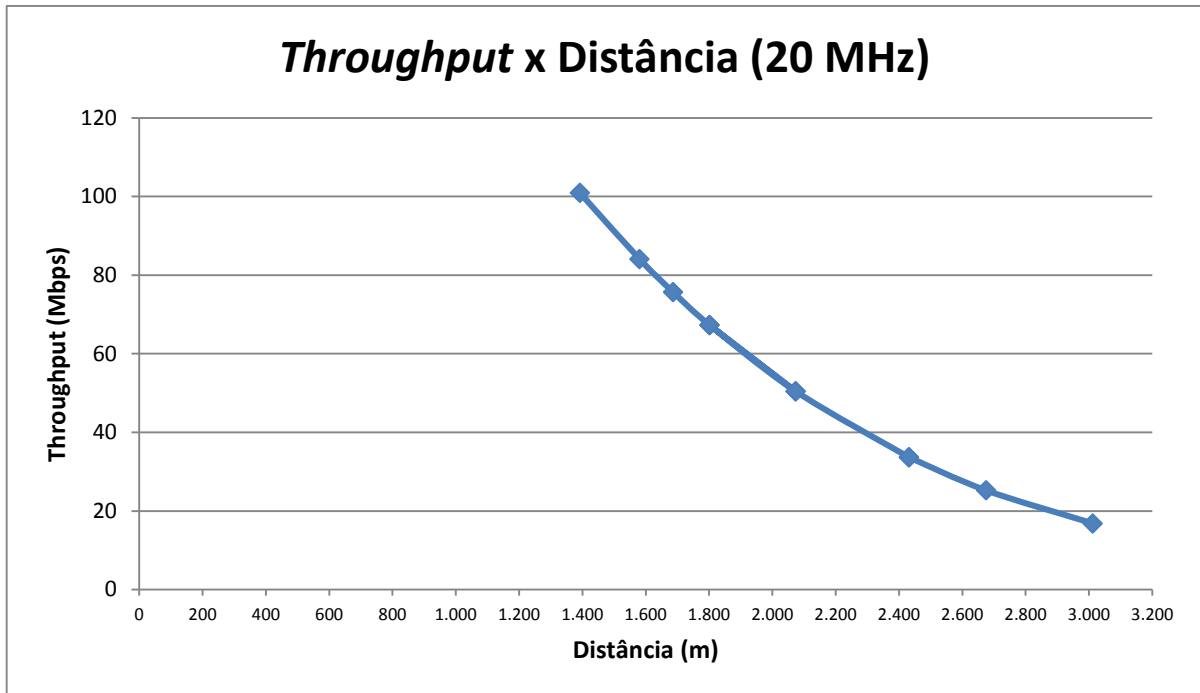


Figura 42: Relação *throughput* X distância para a largura de banda escolhida.

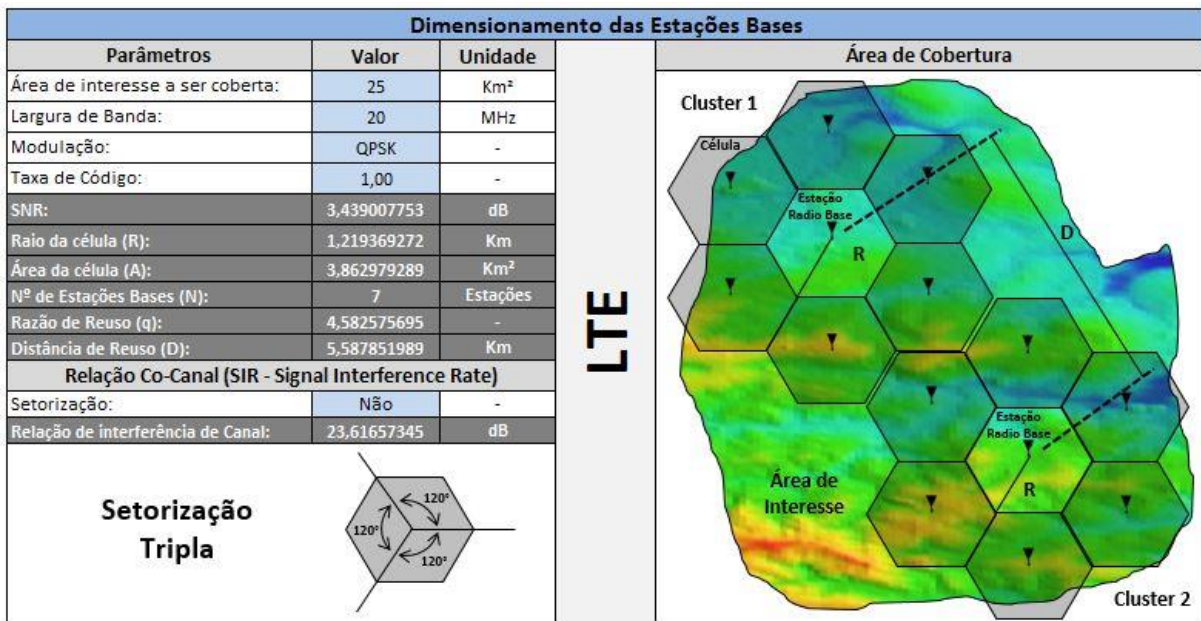


Figura 43: Resultado do número de estações rádio bases no *software* para frequência de 2,5 GHz.

Com o resultado de 7 estações rádio bases para cobrir a área de interesse, se faz necessário criar sete sites no *radio mobile* cada qual com suas características conforme já aplicado no *software* anterior, ou seja, potência de transmissão, ganho da antena, etc.

A distribuição dos sete *sites* pela área de interesse se faz de modo a utilizar torres já existentes, ou pontos estratégicos onde é sabido que aquele local é apropriado para instalação

de torre e implantação do sistema rádio. No estudo de caso, utiliza-se duas torres existentes na região e os outros 5 pontos foram espalhados de modo a respeitar o raio de cobertura da célula.

Os *sites* criados possuem as coordenadas e suas respectivas alturas apresentadas na Tabela 18.

Tabela 18: Coordenadas dos *sites* criados na região de interesse.

Sites	Latitude	Longitude	Altura (M)
1	22°50'49.84"S	47° 3'39.56"O	40
2	22°51'9.76"S	47° 3'28.03"O	40
3	22°49'31.80"S	47° 4'11.65"O	40
4	22°50'5.34"S	47° 3'13.41"O	40
5	22°50'8.55"S	47° 2'12.89"O	40
6	22°51'27.79"S	47° 4'25.03"O	40
7	22°48'53.53"S	47° 2'25.77"O	40

A região de interesse com os *sites* plotados pode ser vista na Figura 44 e Figura 45 (*radio mobile*).



Figura 44: Região de interesse com as 7 estações rádio bases distribuídas.

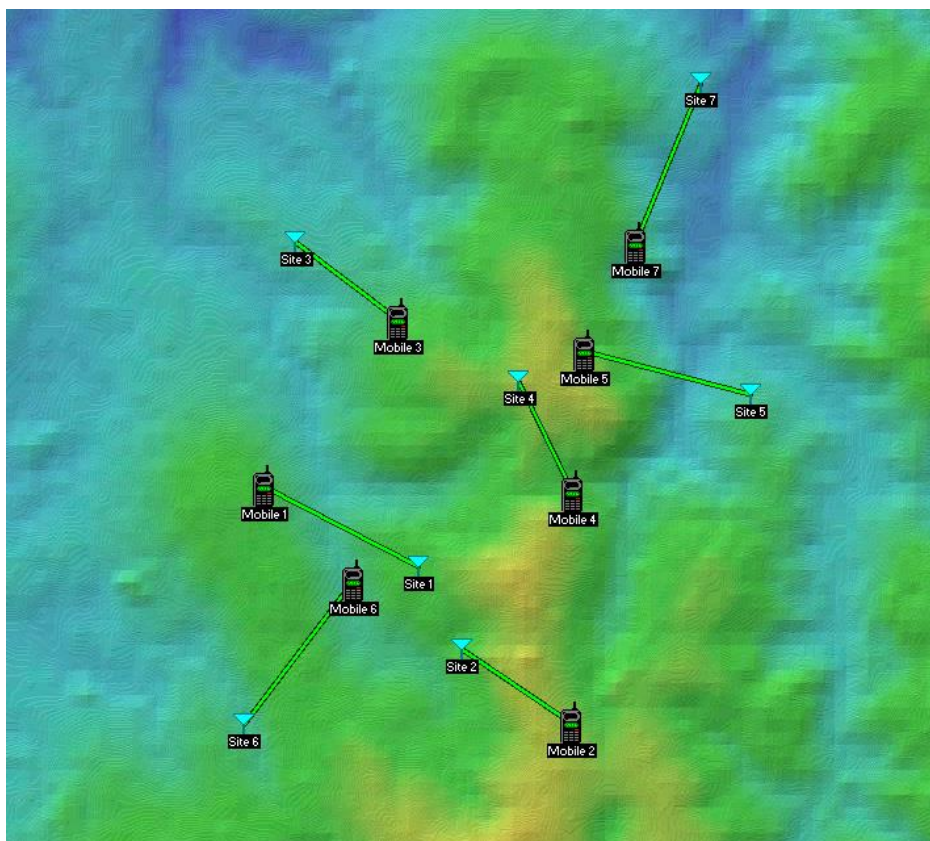


Figura 45: Região de interesse com as 7 estações plotadas no *radio mobile*.

No *radio mobile*, existe um *link* criado para cada *site* que é estabelecido entre o transmissor (estação rádio base) e o receptor (celular). Quando este *link* está com a tonalidade verde isso significa que existe visada e os parâmetros aplicados estão sendo respeitados. Como exemplo, o *link* estabelecido pelo *site 1* e *mobile 1* é mostrado na Figura 46.

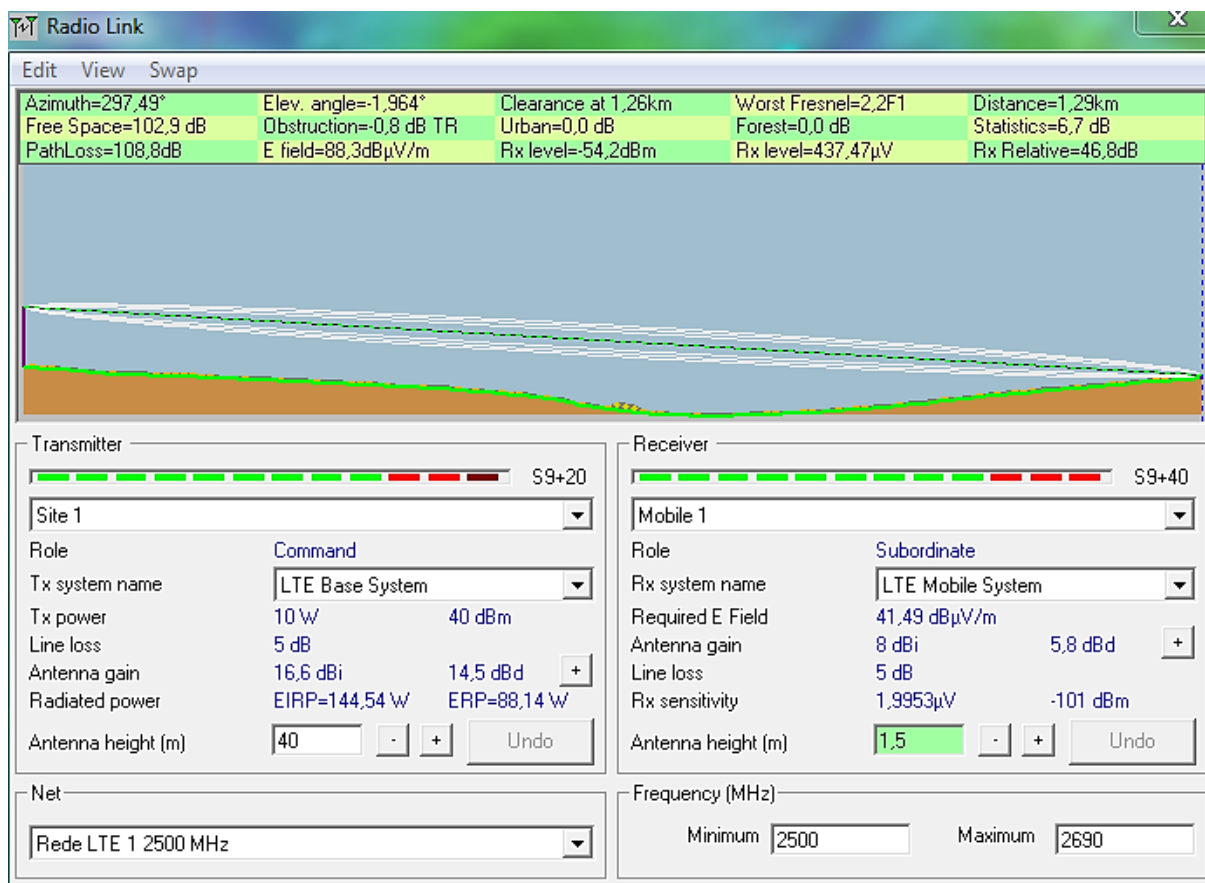


Figura 46: Link estabelecido dentro das conformidades entre *site 1* e *mobile 1*.

Todos os *sites* apresentam aptos a operarem dentro das características já apresentadas anteriormente. Para caracterizar o sistema com as 7 estações a cobertura deve ser simulada, porém antes deve-se ser escolhida qual antena o sistema usará, ou seja, uma antena setorial, parabólica, omnidirecional, etc. Para a simulação da cobertura do estudo de caso, optou-se por uma omnidirecional com diagrama de radiação mostrado na Figura 47 e Figura 48.

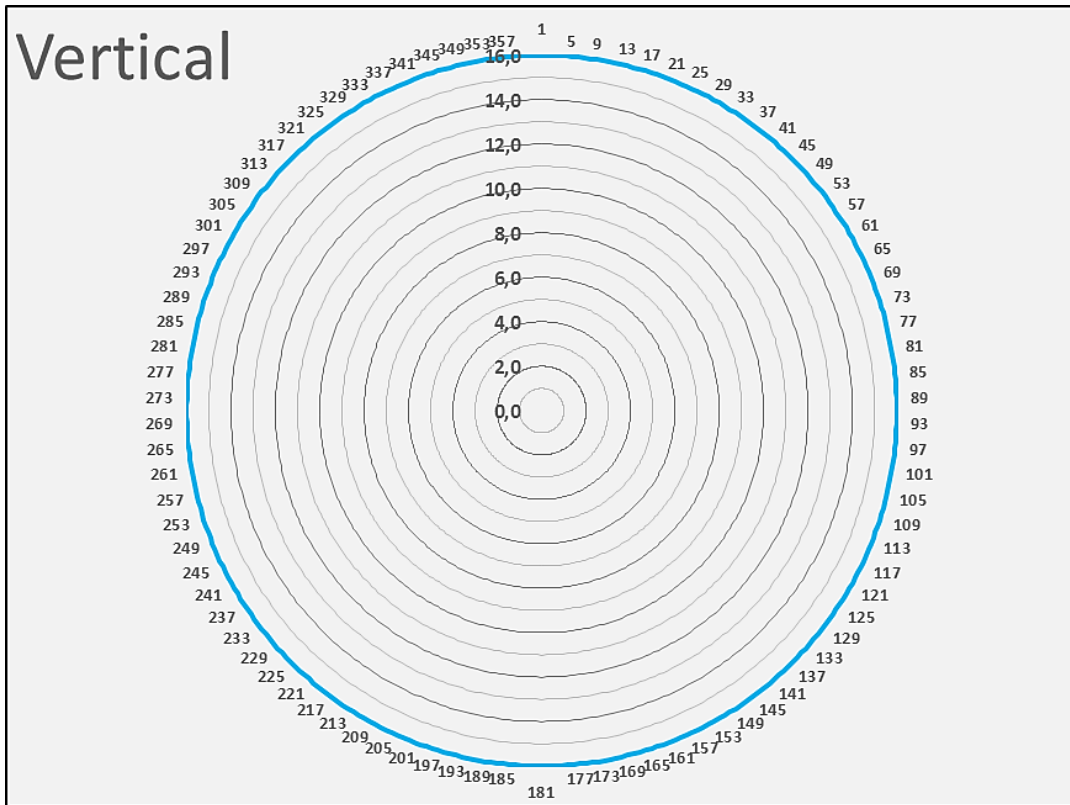


Figura 47: Diagrama de irradiação vertical da antena omnidirecional.

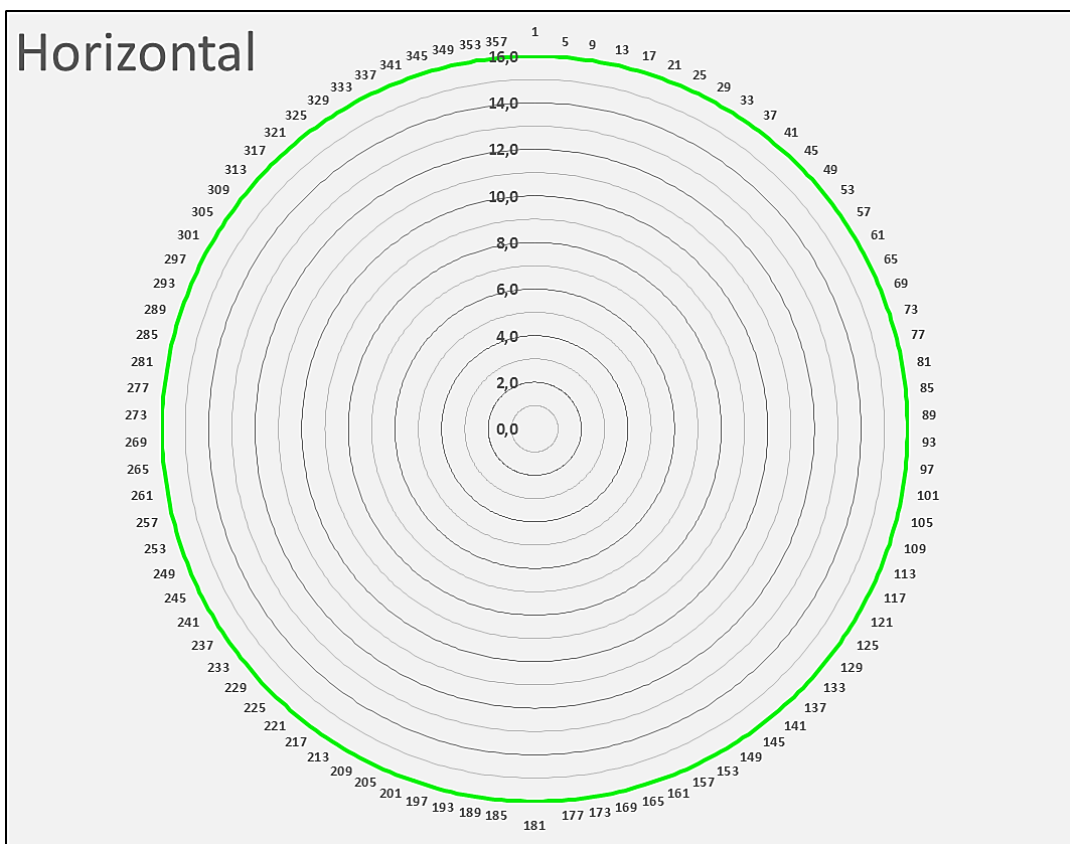


Figura 48: Diagrama de irradiação horizontal da antena omnidirecional.

A cobertura da área de interesse pode ser simulada no *radio mobile*, ou seja, para cada site o raio da célula é de aproximadamente 1,3 km e então cada qual terá uma cobertura conforme mostrada em Figura 49.

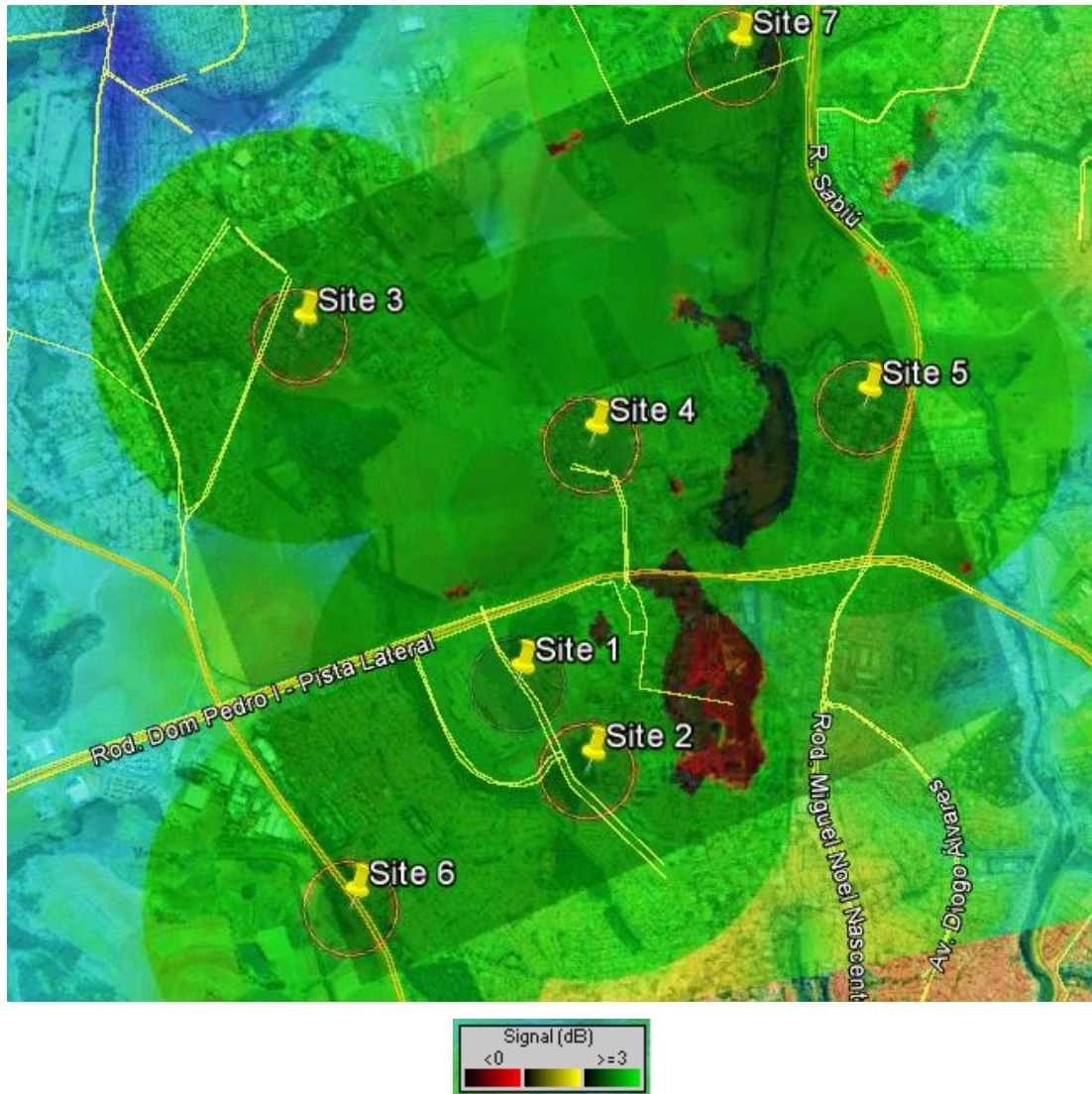


Figura 49: Cobertura da região de interesse com 7 estações rádio bases.

A cobertura conjunta dos 7 sites permite com que toda a área de interesse seja coberta e assim comprovando que o número mínimo de estações dentro dos parâmetros adotados para a faixa de 2,5 GHz estão corretos. Algumas regiões de sombra podem ser observadas, estas áreas para serem cobertas deve-se levar em consideração à altura das torres ou outros parâmetros do sistema. Um remanejamento na posição das 7 estações também pode

Para melhorar a relação co-canal o sistema pode utilizar setorização. A cobertura com setorização se torna ainda mais interessante quando há pontos de interesse, ou seja, quando só

algumas áreas dentro da região macro de interesse terá cobertura. Na Figura 50 é possível ver o mesmo sistema sendo coberto com setorização, porém uma antena mais diretiva foi utilizada e seu diagrama de irradiação pode ser observado na Figura 51 e Figura 52.

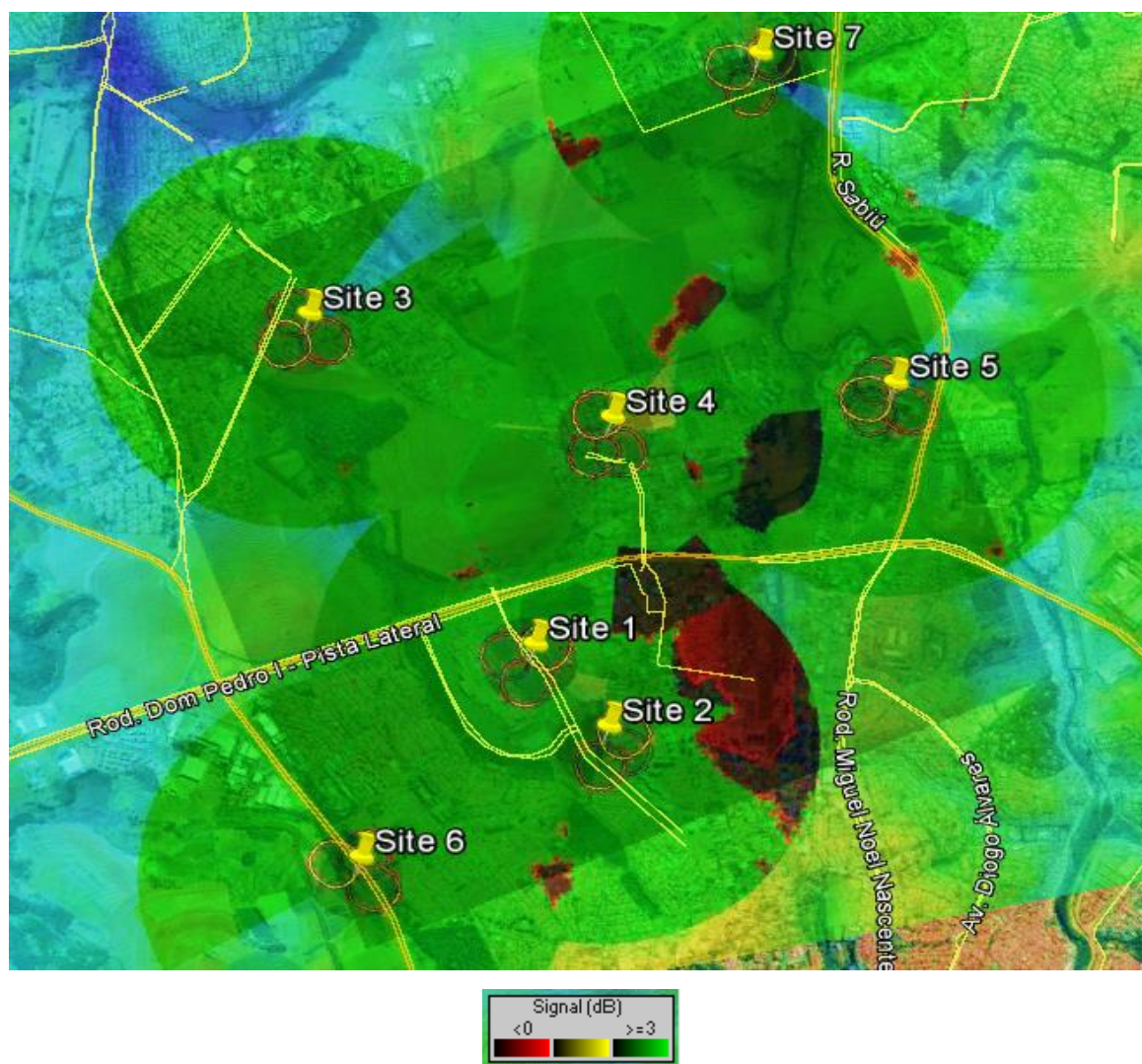


Figura 50: Cobertura na faixa de 2,5 GHz com setorialização.

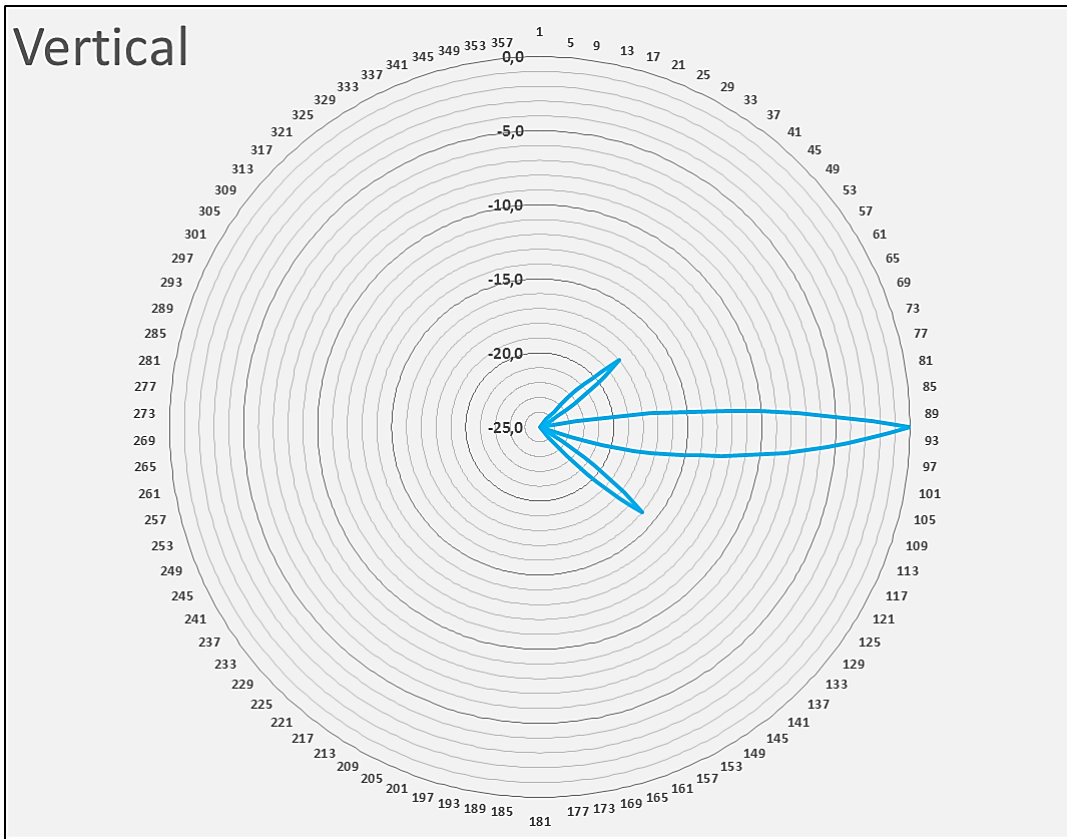


Figura 51: Diagrama de irradiação vertical da antena setorial.

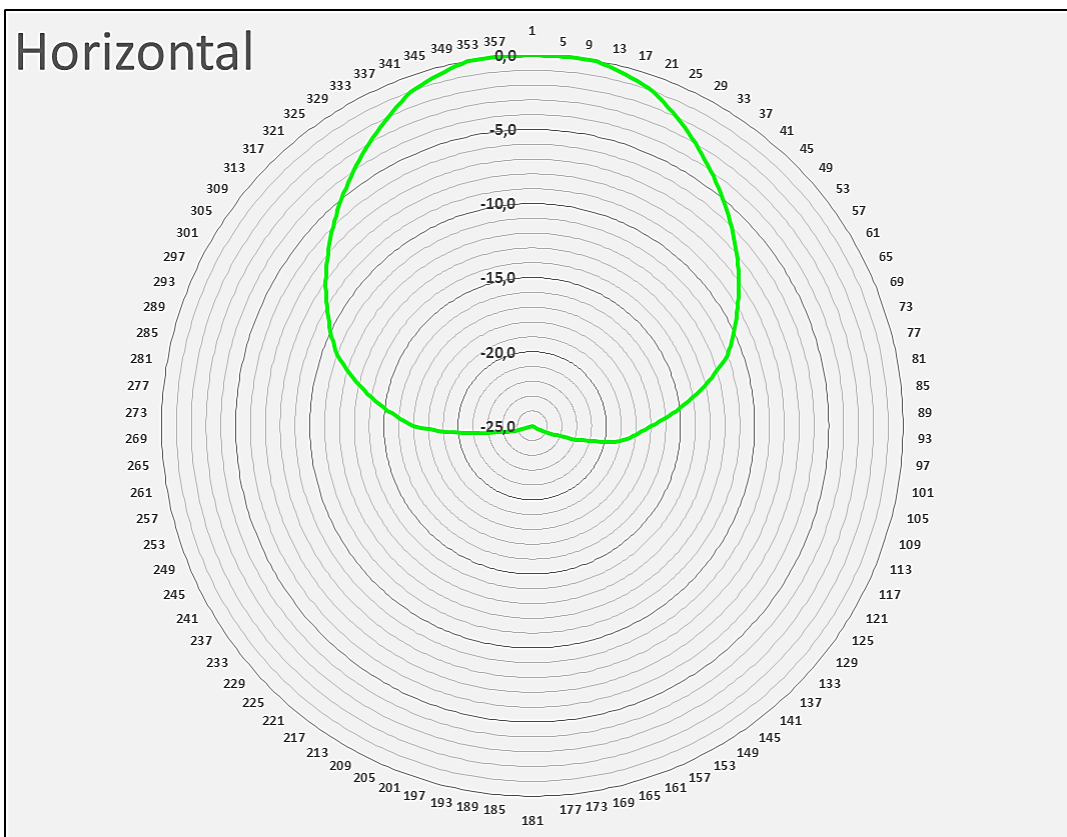


Figura 52: Diagrama de irradiação horizontal da antena setorial.

5.1.2 SISTEMA EM 700 MHz

Para a faixa de frequência de 700 MHz as características de sistema são as mostradas na Figura 53.

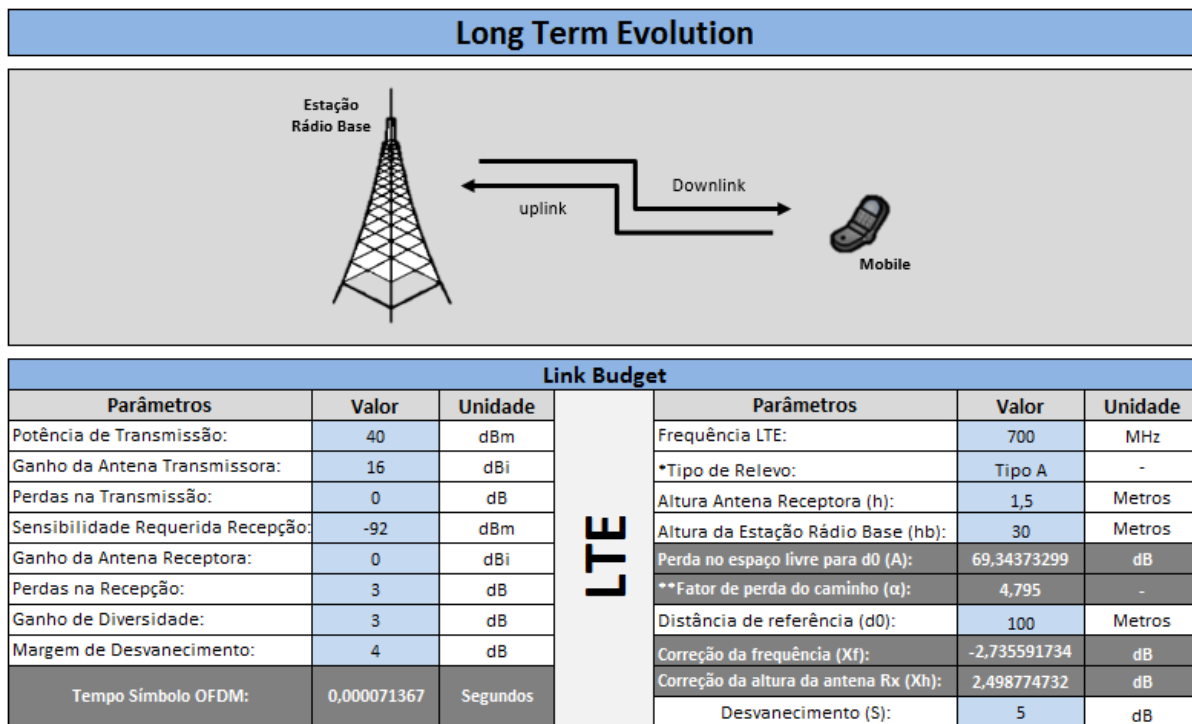


Figura 53: Parâmetros utilizados para frequência de 700 MHz.

Com os resultados obtidos, vede Tabela 19 e Figura 54, optou-se para fins de comparação um sistema operando com as mesmas características utilizadas para o sistema em 2,5 GHz. Com esses parâmetros escolhidos (linha amarela na Tabela 19) o resultado de número de estações rádio bases encontrado para cobrir a região de interesse foi de 2 estações o que mostra que existe uma economia de ao menos 5 estações rádio bases se comparado ao sistema operante na frequência de 2,5 GHz. O resultado pode ser observado na Figura 55.

Tabela 19: Resultados obtidos para frequência de 700 MHz.

Largura de banda (MHz)	Modulação	Subportadoras	Bits/Símb.	Taxa de código	SNR (dB)	Throughput (Mbps)	Perda de propagação (dB)	Distância (m)
5	QPSK	300	2	0,50	-1,0185	4,2036	145,0185	3012,0724
5	QPSK	300	2	0,75	1,4512	6,3054	142,5488	2675,2161
5	QPSK	300	2	1,00	3,4390	8,4072	140,5610	2431,6640
5	16 QAM	300	4	0,50	3,4390	8,4072	140,5610	2431,6640

Largura de banda (MHz)	Modulação	Subportadoras	Bits/Símb.	Taxa de código	SNR (dB)	Throughput (Mbps)	Perda de propagação (dB)	Distância (m)
5	16 QAM	300	4	0,75	6,7619	12,6109	137,2381	2073,0268
5	16 QAM	300	4	1,00	9,6792	16,8145	134,3208	1802,0340
5	64 QAM	300	6	0,50	6,7619	12,6109	137,2381	2073,0268
5	64 QAM	300	6	0,67	9,6849	16,8229	134,3151	1801,5489
5	64 QAM	300	6	0,75	11,0613	18,9163	132,9387	1686,3230
5	64 QAM	300	6	0,83	12,4129	21,0198	131,5871	1580,3476
5	64 QAM	300	6	1,00	15,0514	25,2217	128,9486	1392,2825
10	QPSK	600	2	0,50	-1,0185	8,4072	145,0185	3012,0724
10	QPSK	600	2	0,75	1,4512	12,6109	142,5488	2675,2161
10	QPSK	600	2	1,00	3,4390	16,8145	140,5610	2431,6640
10	16 QAM	600	4	0,50	3,4390	16,8145	140,5610	2431,6640
10	16 QAM	600	4	0,75	6,7619	25,2217	137,2381	2073,0268
10	16 QAM	600	4	1,00	9,6792	33,6290	134,3208	1802,0340
10	64 QAM	600	6	0,50	6,7619	25,2217	137,2381	2073,0268
10	64 QAM	600	6	0,67	9,6849	33,6458	134,3151	1801,5489
10	64 QAM	600	6	0,75	11,0613	37,8326	132,9387	1686,3230
10	64 QAM	600	6	0,83	12,4129	42,0396	131,5871	1580,3476
10	64 QAM	600	6	1,00	15,0514	50,4435	128,9486	1392,2825
15	QPSK	900	2	0,50	-1,0185	12,6109	145,0185	3012,0724
15	QPSK	900	2	0,75	1,4512	18,9163	142,5488	2675,2161
15	QPSK	900	2	1,00	3,4390	25,2217	140,5610	2431,6640
15	16 QAM	900	4	0,50	3,4390	25,2217	140,5610	2431,6640
15	16 QAM	900	4	0,75	6,7619	37,8326	137,2381	2073,0268
15	16 QAM	900	4	1,00	9,6792	50,4435	134,3208	1802,0340
15	64 QAM	900	6	0,50	6,7619	37,8326	137,2381	2073,0268
15	64 QAM	900	6	0,67	9,6849	50,4687	134,3151	1801,5489
15	64 QAM	900	6	0,75	11,0613	56,7489	132,9387	1686,3230
15	64 QAM	900	6	0,83	12,4129	63,0594	131,5871	1580,3476
15	64 QAM	900	6	1,00	15,0514	75,6652	128,9486	1392,2825
20	QPSK	1200	2	0,50	-1,0185	16,8145	145,0185	3012,0724
20	QPSK	1200	2	0,75	1,4512	25,2217	142,5488	2675,2161
20	QPSK	1200	2	1,00	3,4390	33,6290	140,5610	2431,6640
20	16 QAM	1200	4	0,50	3,4390	33,6290	140,5610	2431,6640
20	16 QAM	1200	4	0,75	6,7619	50,4435	137,2381	2073,0268
20	16 QAM	1200	4	1,00	9,6792	67,2580	134,3208	1802,0340
20	64 QAM	1200	6	0,50	6,7619	50,4435	137,2381	2073,0268
20	64 QAM	1200	6	0,67	9,6849	67,2916	134,3151	1801,5489
20	64 QAM	1200	6	0,75	11,0613	75,6652	132,9387	1686,3230
20	64 QAM	1200	6	0,83	12,4129	84,0792	131,5871	1580,3476
20	64 QAM	1200	6	1,00	15,0514	100,8870	128,9486	1392,2825

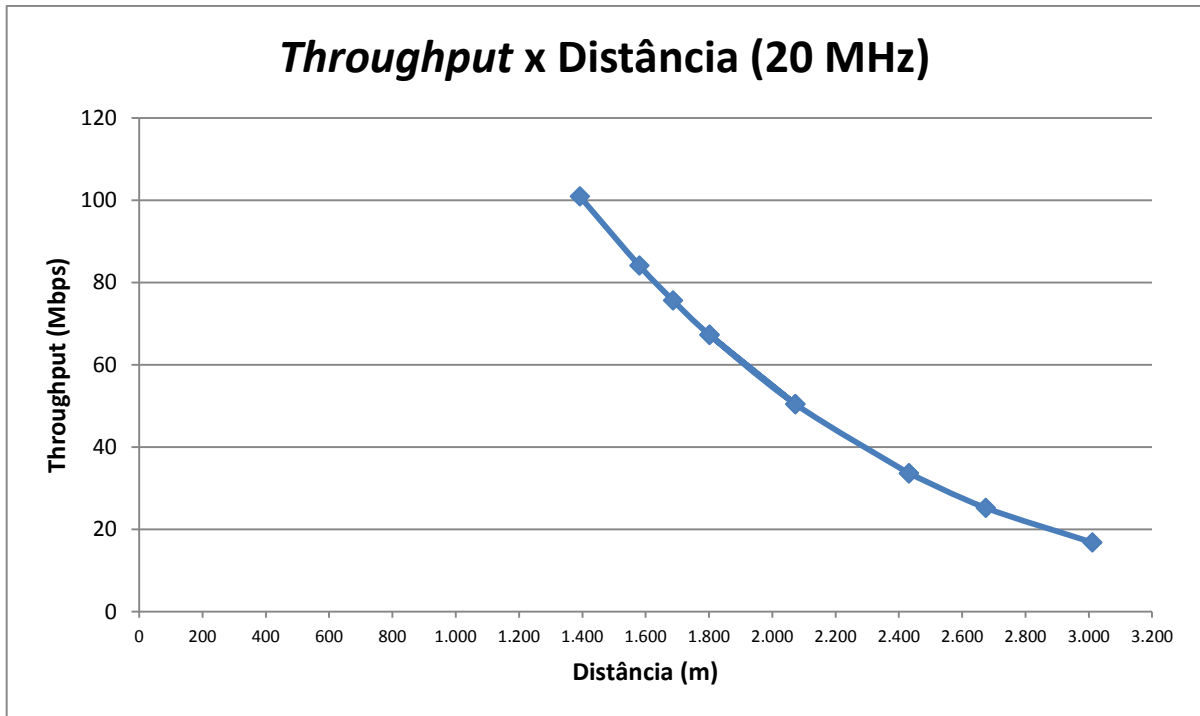


Figura 54: Relação *throughput* X distância para a largura de banda escolhida.

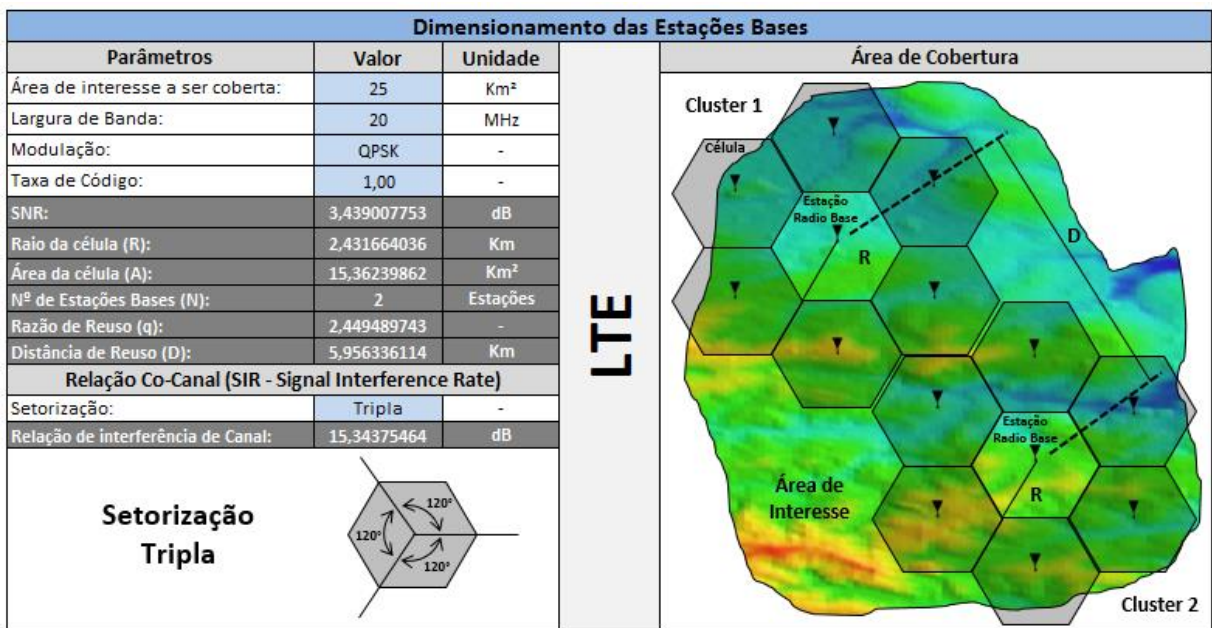


Figura 55: Resultado do número de estações rádio bases no *software* para frequência de 700 MHz.

Com o resultado de apenas 2 estações rádio bases para cobrir a área de interesse, se faz necessário criar duas estações no *radio mobile* ou no caso do estudo de caso, escolher duas das sete estações já existentes no cálculo já existente para a faixa de 2,5 GHz.

Utilizando a tabela de coordenadas dos sites já criados, optou-se para a faixa de 700 MHz a utilização do *site 1* e *site 5* da Tabela 18.

Todos os *sites* apresentam-se aptos a operarem dentro das características já apresentadas anteriormente. Para caracterizar o sistema com as 2 estações a cobertura deve ser simulada. Para a simulação nesta faixa foi utilizada a mesma antena omnidirecional de diagramas apresentados Figura 47 e Figura 48.

A cobertura da área de interesse sendo coberta apenas pelos *site 1* e *site 5* é mostrada na Figura 49 e possui um raio de, aproximadamente, 2,5 km.

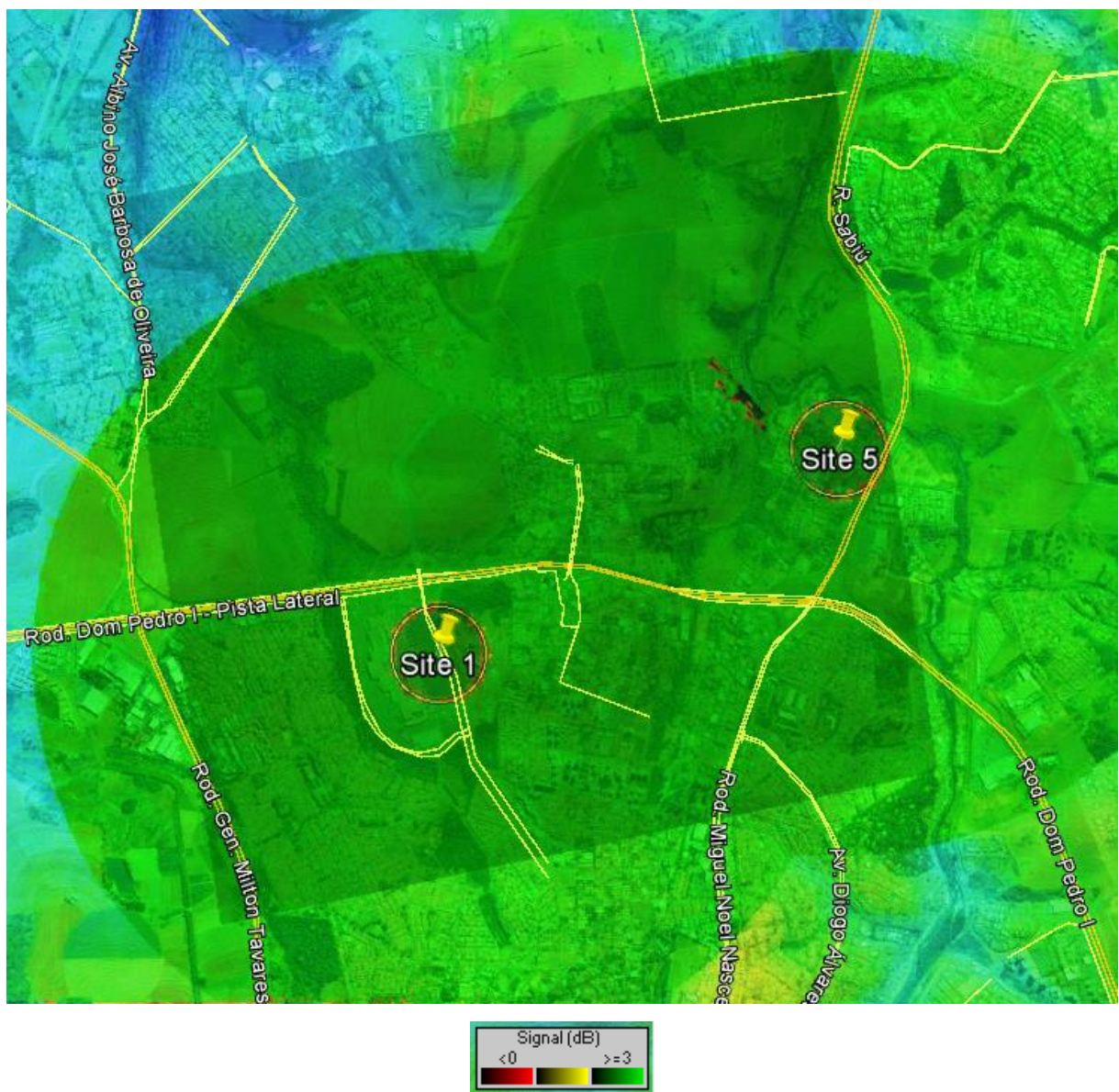


Figura 56: Cobertura da região de interesse com 2 estações rádio bases – *site 1* e *site 5*.

A cobertura conjunta dos 7 sites permite com que toda a área de interesse seja coberta e assim comprovando que o número mínimo de estações dentro dos parâmetros adotados para a faixa de 2,5 GHz estão corretos. Algumas regiões de sombra podem ser observadas, estas áreas para serem cobertas deve-se levar em consideração à altura das torres ou outros parâmetros do sistema. Um remanejamento na posição das 7 estações também pode ser realizado.

Para melhorar a relação co-canal o sistema pode utilizar setorização. Na Figura 57 é possível ver a mesma região sendo coberta com setorização aplicada nas 2 estações de interesse. Uma antena diretiva na faixa de 700 MHz foi utilizada e seu diagrama de irradiação pode ser observado na Figura 58 e Figura 59.

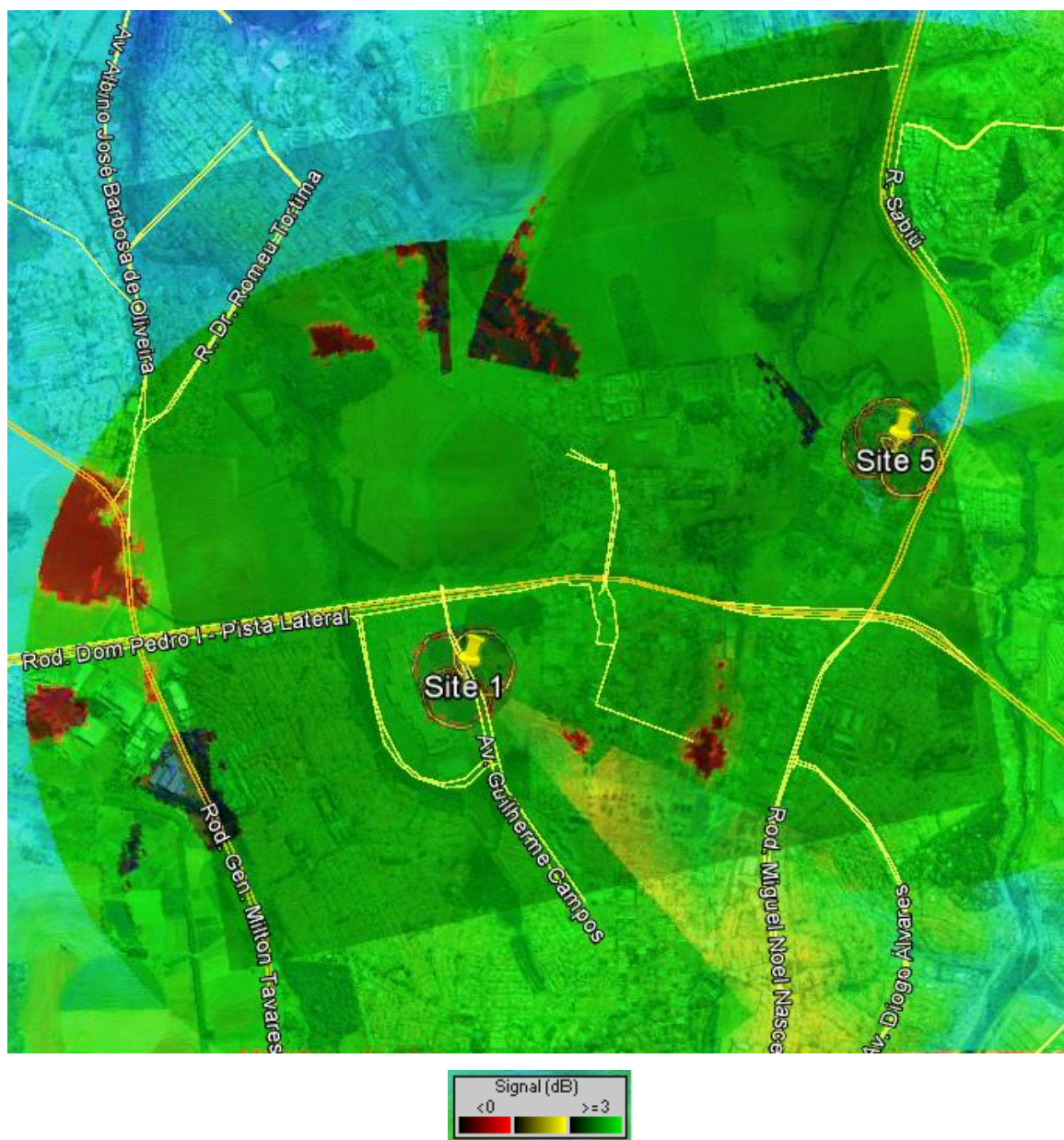


Figura 57: Cobertura na faixa de 2,5 GHz com setorização.

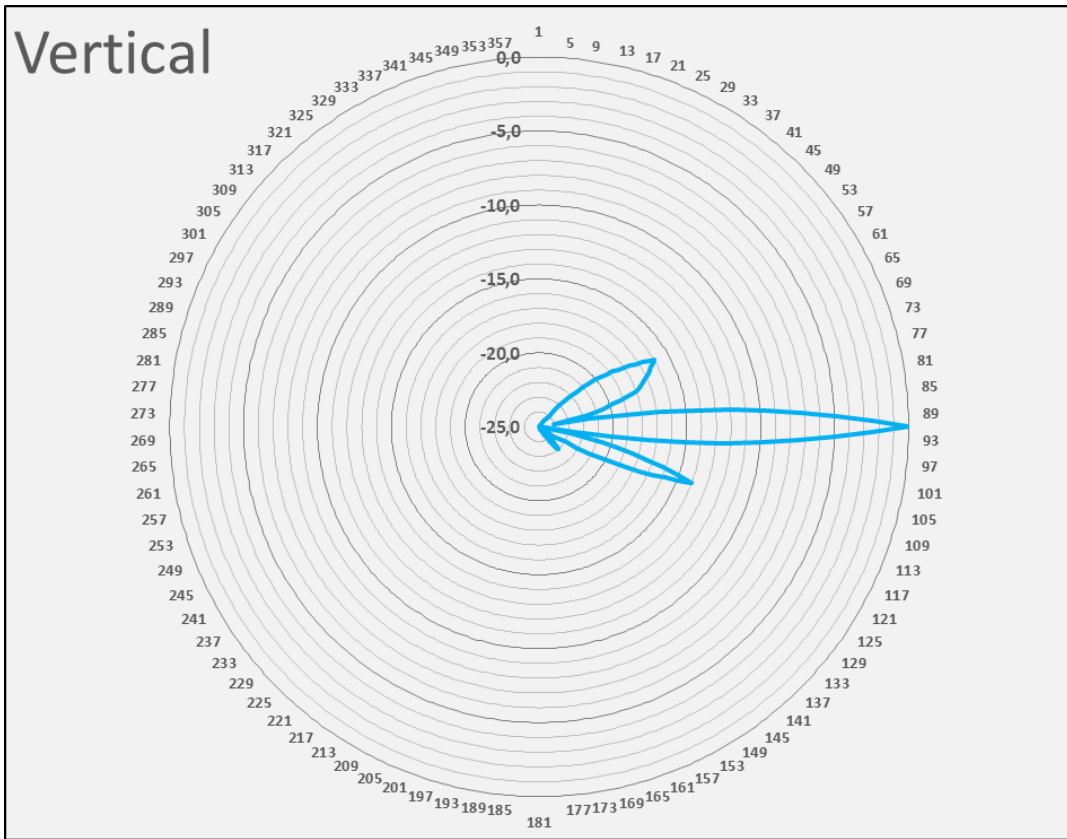


Figura 58: Diagrama de irradiação vertical da antena setorial.

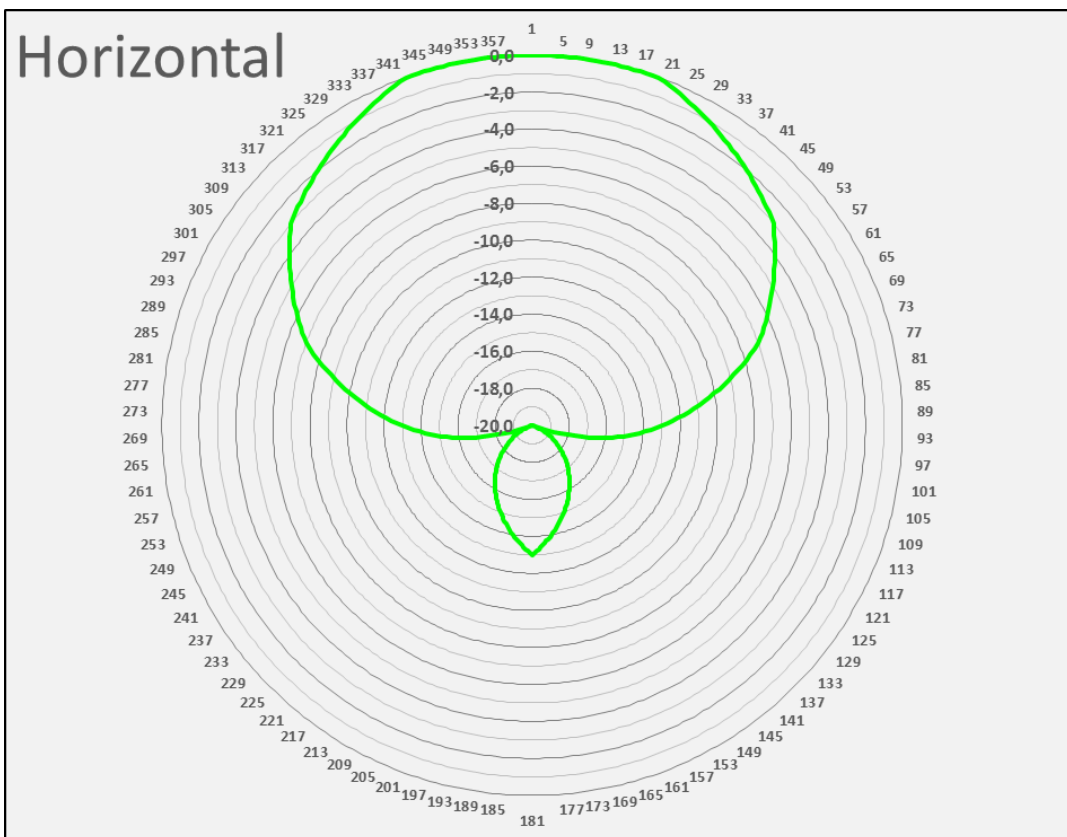


Figura 59: Diagrama de irradiação horizontal da antena setorial.

CONCLUSÃO

As tecnologias de comunicações móveis existentes e empregadas pelas operadoras na atualidade foram desenvolvidas visando operação com o tráfego de voz, o que se tornou um empecilho para o tráfego de dados.

Neste contexto, o LTE surge como uma tecnologia desenvolvida, desde o início, com a concepção de absorver o tráfego de dados e garantir altas taxas de *downlink* e *uplink*.

Para que toda a capacidade e desempenho das redes LTE sejam atendidas, o dimensionamento do projeto da rede deve ser corretamente estabelecido, a começar pela área de atuação de cada estação rádio base, decorrente do raio máximo de atuação de cada célula e sua capacidade de dados.

Este trabalho descreveu uma metodologia para o planejamento de cobertura e capacidade para sistemas operando em frequências do LTE, abordando importantes pontos para o desenvolvimento de um sistema de telecomunicações como o cálculo *link budget*, SNR, modulação, raio de atuação celular, interferência co-canal e capacidade do canal de transmissão.

Utilizando o modelo de propagação SUI aplicado no *software* LB Network desenvolvido e o *software* de prospecção *Radio Mobile*, determinou-se que para a faixa de 2,5 GHz o raio máximo de cobertura de cada célula é de, aproximadamente, 1,3 km sendo que para a faixa de 700 MHz o raio de cobertura é de, aproximadamente, 2,5 km. As características utilizadas para o cálculo nas duas faixas de frequência apresentadas no Capítulo 5 foram escolhidas de modo a abordar condições reais de projeto, porém outras configurações podem ser adotadas e o raio de cobertura pode ter uma razão ainda maior.

Com a razão sendo de 2 à 4 vezes maior, tem-se que avaliar o *throughput*, já que o número de células for muito reduzido o número de usuários não será atendido o que causaria perda de QoS.

A área escolhida para prover o serviço celular na região de Campinas foi de 25 km², chegando ao resultado de que 2 estações rádio bases são suficientes para que a cobertura seja atendida utilizando um sistema de 700 MHz contrapondo as 7 estações rádio bases para o sistema operante em 2,5 MHz. Essa diferença é notória e é uma das razões para realizar a mudança do sistema LTE hoje já implementado no Brasil.

No estudo de caso foi simulado uma rede com fator de reuso unitário com e sem setorização tripla, é sabido que dependendo da área de interesse se torna significativo o uso de setorização além do que a relação co-canal faz com que a SNR seja melhor. Outra conclusão importante foi obtida quando ao escolher o pior caso as bordas das células apresentam uma

SNR suficiente para utilizar, ao menos, a modulação QPSK significando que, toda a célula terá o *throughput* escolhido no projeto.

A variação de *throughput* nas frequências estudadas também é algo a ser levado em consideração, valores entre 4,2 Mbps quando adotado uma largura de banda de 5 MHz e modulação QPSK a 100,9 Mbps para largura de banda de 20 MHz e modulação 64 QAM, esses valores sem considerar um sistema MIMO. A utilização do MIMO melhora ainda mais o sistema deixando-o robusto quando se refere a capacidade de transmissão.

Com a liberação dos canais 52 ao 69 em UHF, o LTE pode ser implantado com custos mais baixos, já que a frequência 700MHz tem um alcance de 2 a 4 vezes maior que a faixa de 2,5 GHz e assim o número de estações bases é reduzido.

Outra vantagem da faixa de 700 MHz é a melhor penetração dentro de ambientes fechados comparados aos sinais emitidos em frequências mais altas, além de atender regiões urbanas densamente povoadas e com características de propagação que exige um investimento muito grande para seu atendimento com a qualidade requerida pelos usuários de banda larga.

A faixa de 2500 MHz não atrapalhará o sistema de televisão brasileira conforme estudos já realizados apresentaram, em contra partida, o custo para implantação é maior, os equipamentos não são compatíveis com os já existentes nos países vizinhos e, ainda fatores políticos e econômicos como o CAPEX, se tornam altos e inviáveis para cobrir um território como o do Brasil.

Impactos econômicos e sociais acontecerão com a implantação e estruturação do LTE no país. A aquisição do espectro por parte das operadoras, compra de novos equipamentos, instalação e infraestrutura, desenvolvimento de tecnologia nacional e a expansão da cobertura em todo território nacional são alguns dos itens que podem ser ressaltados com o estudo apresentado nesta dissertação [5].

Visando trabalhos futuros, estudar novos modelos de propagação para cálculo de *link budget*, interferência co-canal, setorização e reuso de frequência são temas para aprimorar os conceitos adquiridos e o *software* desenvolvido. Espera-se acrescentar no *software* LB Network outros parâmetros que influenciam na interferência de radiofrequência sendo que estas possam ser observadas como manchas em mapas de cobertura, além de implementar as torres de radiodifusão como um elemento interferente nos receptores do LTE, ou seja, o *software* ser capaz de estimar a interferência e suas mitigações para os dois sistemas de modo que um não interfira direta ou indiretamente no outro.

REFERÊNCIAS

- [1] ABINEE, Projeto de Testes de coexistência entre o Sistema Brasileiro de Televisão Digital e o LTE na faixa de 700MHz (Banda 28 3GPP). Janeiro, 2014.
- [2] ABINEE, Projeto de testes para avaliação de interferência e análise de coexistência entre o Sistema Brasileiro de Televisão Digital e o LTE na faixa de 700 MHz (Banda 28 3GPP) – Teste Laboratorial. Abril, 2014.
- [3] ABINEE, Projeto de testes para avaliação de interferência e análise de coexistência entre o Sistema Brasileiro de Televisão Digital e o LTE na faixa de 700 MHz (Banda 28 3GPP) – Teste de Campo. Maio, 2014.
- [4] ALENCAR, M. S. de., "Telefonia Celular Digital".1ª ed. São Paulo. Érica Ltda, 2004.
- [5] ANATEL, MACKENZIE, UNB, INATEL, Relatório do Teste em Campo sobre a Convivência do LTE na faixa de 700 MHz com ISDB-T. Abril,2014.
- [6] ANATEL, Relatório de Teste Laboratorial de Interferência do LTE na faixa de 700 MHz no ISDB-T. Abril, 2014.
- [7] ABDUL, S. B. "*Dimensioning of LTE Network – Description of Models and Tool, Coverage and Capacity Estimation of 3GPP Long Term Evolution radio interface*", February 2009.
- [8] ANRITSU. "*Future technologies and testing for Fixed Mobile Convergence, SAE and LTE in cellular mobile communications*". White Paper, 2008.
- [9] B Zafar, D Schulz, S Gherekhloo, M Haardt. "*Ad Hoc Networking Solutions: Cooperative MIMO Multihop Networks*". IEEE Technology Magazine, March 2011.
- [10] BARTH, U. "*3GPP Long Term Evolution - System Architecture Evolution Overview*".2006.
- [11] Claude, E Shannon. "*Communication in the presence of noise*", Member of the IRE.
- [12] Claude, E Shannon. "*A Mathematical Theory of Communicatio*", Bell Sys. Tech. Journal, Vol. 273, 1948.
- [13] C. Gallard. D21.1 - Analysis on 3GPP E-MBMS/DVB-NGH Physical layer convergence, 2011.
- [14] DVB-T2 Fact Sheet. 2nd Generation Terrestrial: The World 's Most Advanced Digital Terrestrial TV System, 2011.
- [15] D. Aleksandar, M. Juan, C. Joonyoung, J. Hyoungju, Y.Jin, Z. Pingping. "*UE's role in LTE Advanced heterogeneous networks*". IEEE Communications Magazine, February, 2012.
- [16] D'ÁVILA, César Kyn. "*LTE: Long Term Evolution – Arquitetura Básica e acesso Múltiplo*". 2009. Disponível em:
<http://www.cedet.com.br/index.php?/Tutoriais/Telecom/lte-long-term-evolutionarquitectura-basica-e-acesso-multiplo.html>
- [17] DAHLMAN, E. "*3G Long Term Evolution*", 2005.
- [18] DAHLMAN, E. et al. "*3G evolution: HSPA and LTE for Mobile Broadband*". Oxford, UK: Elsevier Ltd, 2007.
- [19] DAHLMAN, E.; FURUSKAR, A.; JADING, Y.; LINDSTROM, M.; PARKVALL, S. "*Key features of the LTE radio interface*", 2008.
- [20] DAHLMAN, E; PARKVALL, S; SKOLD, J. "*4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband*". Academic Press, 2011.
- [21] FERRARI, A. M., "Telecomunicações-Evolução & Renovação", 6ª ed. Érica. 2001.

- [22] Muratore, F. "*Mobile Communications for the Future*". John Wiley & Sons Ltd. 2000.
- [23] G. BRASCHE, B. WALKE. "*Concepts, services, and protocols of the new GSM phase 2+ general packet radio service*", Communications Magazine, IEEE, 1997.
- [24] GOLDSMITH, A. "*Wireless Communications*". Oxford, UK: Cambridge University Press, 2005.
- [25] 3GPP. "*LTE and 2G-3G interworking functions*". 3G Americas, 2010. Disponível em: <http://www.3gpp.org/LTE>.
- [26] 3GPP, Tech. Specif. Group Radio Access Network - Physical Channels and Modulation, 3GPP TS 36.211, Dec. 2009.
- [27] 3GPP, TS 36.201, "LTE physical layer; General description," Rel. 11, December 2012.
- [28] 4G: Frequências e licitações. Disponível em: http://www.teleco.com.br/4g_freq.asp
- [29] H. Charlie, A. Sirikiat, T. Meixia, "*LTE advanced and 4G wireless communications*," IEEE Communications Magazine, February 2012, Vol.50.
- [30] HOLMA, H.; TOSKALA, A. "*W-CDMA for UMTS, Radio Access For Third Generation Mobile Communications*", John Wiley & Sons, Ltd, 2000.
- [31] HOLMA, H.; TOSKALA, A. "*W-CDMA for UMTS – HSPA evolution and LTE*", 4th ed. John Wiley & Sons, 2007.
- [32] Igor P. Kovalyov. "*SDMA for Multipath Wireless Channels: Limiting Characteristics and Stochastic Models*". 1st ed. 2004.
- [33] J. Parikh, A. Basu, "*LTE Advanced: The 4G Mobile Broadband Technology*". International Journal of Computer Applications, Vol.13,2010.
- [34] K. Amit, S. Jyotsna, L. Yun-fei. "*3GPP LTE: The Future of Mobile Broadband*", Wireless Personal Communications, 2012, Vol.62.
- [35] K. Gideon, B. Amit, R. Dan. "*Semiblind Turbo Equalization Scheme for LTE Uplink Receiver*", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Nov. 2012, Vol.61.
- [36] KARLSSON, J.; RIBACK. M. "*Initial Field Performance Measurements of LTE*", 2008.
- [37] LESCUYER, P.; LUCIDARME, T. "*Evolved Packet System (EPS): The LTE and SAE evolution of 3G UMTS*". John Wiley & Sons Ltd, 2008.
- [38] L. Militano, M. Condoluci, G. Araniti, and A. Iera, "Bargaining Solutions for Multicast Subgroup Formation in LTE," IEEE 76th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), pp. 1-5, September 2012.
- [39] L. Militano, M. Condoluci, G. Araniti, and A. Iera, "Multicast Service Delivery Solutions in LTE-Advanced Systems," IEEE International Conference on Communications (ICC), June 2013.
- [40] LICITAÇÃO Nº 004/2012/PVCP/SPV ANATEL - Radiofrequências na subfaixa 2500 MHz a 2690 MHz e/ou na subfaixa de 451 MHz a 458 MHz e de 461 MHz a 468 MHz.
- [41] M, RAHNEMA. "*Overview of the GSM system and protocol architecture*", Communications Magazine, IEEE, 1993.
- [42] *Overview of 3GPP Release 10*. Disponível em: <http://www.3gpp.org/Release-10>.
- [43] *Overview of 3GPP Release 11*. Disponível em: <http://www.3gpp.org/Release-11>.
- [44] *Overview of 3GPP Release 12*. Disponível em: <http://www.3gpp.org/Release-12>.
- [45] *Overview of 3GPP Release 6*. Disponível em: <http://www.3gpp.org/Release-6>.
- [46] *Overview of 3GPP Release 7*. Disponível em: <http://www.3gpp.org/Release-7>.
- [47] *Overview of 3GPP Release 8*. Disponível em: <http://www.3gpp.org/Release-8>.

- [48] *Overview of 3GPP Release 9*. Disponível em: <http://www.3gpp.org/Release-9>.
- [49] *Overview of 3GPP Release 99*. Disponível em: <http://www.3gpp.org/Release-99>.
- [50] PARSONS, J.D. "*The Mobile Radio Propagation Channel*". John Wiley & Sons Ltd, 2000.
- [51] TANENBAUM, A. S., "Redes de Computadores". Editora Campus. 4ª ed.
- [52] Regulamento sobre condições de uso de radiofrequências na faixa de 698 MHz a 806 MHz. Disponível em: <<http://legislacao.anatel.gov.br/resolucoes/2013/644-resolucao-625>>.
- [53] RESOLUÇÃO Nº 625, DE 11 DE NOVEMBRO DE 2013 - Regulamento sobre condições de uso de Radiofrequências na faixa de 698 MHz A 806 MHz.
- [54] RESOLUÇÃO Nº 640, DE 11 DE JULHO DE 2014 – Regulamento sobre condições de convivência entre os serviços de radiodifusão de sons e imagens e de retransmissão de televisão do SBTVD e os serviços de radiocomunicação operando na faixa de 698 MHz a 806 MHz.
- [55] RESOLUÇÃO Nº 640, DE 11 DE JULHO DE 2014 - Procedimento de fiscalização para verificação do cumprimento dos compromissos de abrangência e da área de cobertura do serviço móvel pessoal.
- [56] ROHDE; SCHWARZ. UMTS Long Term Evolution (LTE) Technology Introduction, 2008.
- [57] S., HAYKIN. "*Communication Systems*", 4ª ed., John Wiley & Sons, 2001.
- [58] S. MARTIN. "*Beyond 3G – Bringing Networks, Terminals and the Web Together – LTE, WiMAX, IMS, 4G Devices and the Mobile Web 2.0*". John Wiley & Sons. 2009.
- [59] SESIA, S.; TOUFIK, I.; BAKER, M. "*LTE – The UMTS Long Term Evolution - From Theory to Practice*". John Wiley & Sons Ltd, 2009.
- [61] SKLAR, B. "*Digital Communications: Fundamentals and Applications*", Second Edition, 2001.
- [61] SVERZUT, J. R. "Redes GSM, GPRS, EDGE e UMTS – Uma evolução a caminho da terceira geração (3G)", Ed Érica, 2005.
- [62] T. OJANPERA, R. PRASAD. "*An overview of air interface multiple access for IMT-2000/UMTS*", Communications Magazine, IEEE, 1998.
- [63] *Technical Specification Group Radio Access Network - Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) - Base Station (BS) Radio Transmission and Reception (Release 9)*, 2009. Disponível em: <http://www.3gpp.org/DynaReport/36-series.htm>.
- [64] *Technical Specification Group Radio Access Network - Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) – User Equipment (UE) Radio Transmission and Reception (Release 9)*, 2009. Disponível em: <http://www.3gpp.org/DynaReport/36-series.htm>, acesso em novembro de 2013.
- [65] UMTS Forum White Paper. "*HSPA: High Speed Wireless Broadband - From HSDPA to HSUPA and Beyond*".2005. Disponível em: http://www.umts-forum.org/component/option,com_docman/task,doc_download/gid,1632
- [66] V. Erceg et. Al, "An empirically based path loss model for wireless channels in suburban environments", IEEE, vol 17, pp.1205-1211, julho 1999.
- [67] HARTLEY, V. L. "Transmission of information", Bell Sys. Tech. Journal.
- [68] Y., Bei, C. Joseph. "LTE uplink MIMO receiver with low complexity interference cancellation", Analog Integrated Circuits and Signal Processing, 2012, Vol.73.