

Análise de Desempenho  
Experimental de Redes LTE-  
Advanced Baseadas em MIMO e  
Agregação de Portadoras

Tércio Naves Rodvalho

Dezembro/2017



**Análise de Desempenho Experimental de Redes  
LTE-Advanced Baseadas em MIMO e Agregação de  
Portadoras**

Tércio Naves Rodvalho

Dissertação apresentada ao Instituto Nacional de Telecomunicações, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Telecomunicações.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Arismar Cerqueira Sodré Junior

Santa Rita do Sapucaí  
2017

Rodvalho, Tércio Naves

R695a

Análise de Desempenho Experimental de Redes LTE-Advanced Baseadas em MIMO e Agregação de Portadoras. / Tércio Naves Rodvalho. – Santa Rita do Sapucaí, 2017.

130 p.

Orientador: Prof. Dr. Arismar Cerqueira Sodré Júnior.

Dissertação de Mestrado em Telecomunicações – Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL.

Inclui bibliografia.

1. Agregação de Portadoras 2. LTE-A 3. MIMO e redes celulares  
I. Júnior, Arismar Cerqueira Sodré. II. Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL. III. Título.

CDU 621.39

## FOLHA DE APROVAÇÃO

Dissertação defendida e aprovada em \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_ , pela comissão julgadora:

---

Prof. Dr. Arismar Cerqueira Sodré Júnior  
Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel)

---

Prof. Dr. Carlos Nazareth Motta Marins  
Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel)

---

Prof. Dr. Ugo Silva Dias  
Universidade de Brasília (UnB)

---

Coordenador do Curso de Mestrado  
Prof. Dr. José Marcos Câmara Brito

A Deus, mamãe e papai pelo Homem que criaram.  
Aos Mestres, a gratidão pelo profissional que formaram.

# Agradecimentos

Agradeço a Deus, Mamãe e Papai por me ensinarem o valor da vida. Obrigado por ensinar a humildade, a solidariedade, a preservar e cultivar sempre as mais estimáveis relações de amizade e respeito pelo próximo. O amor que depositaram em mim não há como devolver. Esse carinho carregarei por toda minha vida.

A todos os professores que contribuíram na minha formação, por dedicarem-se ao caminho do Saber, a magia da Ciência e formação humana. Na pirâmide da vida, vocês serão os melhores arquitetos no desenvolvimento pessoal e profissional de cada aluno. Extensão de nossos pais, sempre estarão em nossas memórias. Nem mesmo o oceano do tempo irá apagar marcas tão profundas.

Ao meu orientador Prof. Dr. Arismar Cerqueira Sodré Jr., mais que um professor, um amigo! Obrigado pelos conselhos, por vossos ensinamentos e orientações para o desenvolvimento desse projeto. Um sonho, agora real, a cada página escrita com muita dedicação e só possível graças ao vosso apoio.

A minha amável esposa que enfrentou com paciência as minhas horas ausentes para conclusão desse trabalho. Por estar ao meu lado, por me confortar e encorajar para seguirmos em frente.

Enfim, a todos que me ensinaram a seguir o caminho do bem e contribuíram para o meu desenvolvimento intelectual e humano.

# Índice

Lista de Figuras .....	viii
Lista de Tabelas .....	x
Lista de Abreviaturas e Siglas.....	xi
Lista de Publicações.....	xiv
Resumo.....	xv
Abstract.....	xvi
<b>Capítulo 1. Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1. Contextualização e Revisão Bibliográfica.....	1
1.2. Objetivos da Dissertação .....	5
1.3. Estrutura da Dissertação .....	6
<b>Capítulo 2. Fundamentos do LTE-Advanced.....</b>	<b>8</b>
2.1. Técnicas de Múltiplo Acesso.....	12
2.2. O OFDM no Canal de Rádio Móvel.....	18
2.3. A Técnica OFDM .....	12
2.4. O Enlace de Downlink no LTE/LTE-Advanced .....	21
2.5. Modulação e Codificação Adaptativa (AMC).....	28
2.6. Escalonamento de Tráfego no LTE.....	31
<b>Capítulo 3. MIMO, Modos de Transmissão e Agregação de Portadoras.....</b>	<b>33</b>
3.1. Canais MIMO.....	33
3.2. Modos de Transmissão para LTE-A .....	37
3.3. Capacidade e Eficiência Espectral em Redes LTE-A .....	42
3.5. Capacidade de Throughput do LTE-A em DL .....	50
3.6. Agregação de Portadoras no LTE-Advanced.....	60
<b>Capítulo 4. Implementação de Redes LTE-A.....</b>	<b>68</b>
4.1. Equipamentos de Testes e Softwares Utilizados.....	69
4.2. Primeiro Cenário: Modo Canal Emulado.....	70
4.3. Segundo Cenário: Modo Real de Rede LTE-Advanced.....	74
4.3.1. Análise com UE Cat-16 MDM9X50 Qualcomm .....	77
4.3.2. Análise com UE Samsung Galaxy S7 Edge.....	80
<b>Capítulo 5. Conclusões e Trabalhos Futuros.....</b>	<b>98</b>
Referências Bibliográficas .....	105



# Lista de Figuras

<b>Figura 1</b> - <i>Estimativa para crescimento da Rede Móvel (Extraído de [1]).</i> .....	1
<b>Figura 2</b> - <i>As melhorias tecnológicas utilizadas no LTE-Advanced.</i> .....	9
<b>Figura 3</b> - <i>Banda do LTE e LTE-A com Carrier Aggregation 2DL/1UL.</i> .....	10
<b>Figura 4</b> - <i>Formação do Prefixo Cíclico, ou Cyclic Prefix (CP).</i> .....	15
<b>Figura 5</b> - <i>Formação do símbolo OFDM com modulação BPSK, adaptado [36].</i> ...	17
<b>Figura 6</b> - <i>Espectro OFDM de frequências sobrepostas.</i> .....	18
<b>Figura 7</b> - <i>Efeito do desvanecimento seletivo em um sistema MC, adaptado [38].</i> ..	19
<b>Figura 8</b> - <i>Comparação sistema SC e MC.</i> .....	20
<b>Figura 9</b> - <i>Estrutura do Frame de rádio LTE do tipo 1 (FDD), adaptado de [46].</i> .	23
<b>Figura 10</b> - <i>Grade de Recursos da camada física do LTE para downlink.</i> .....	25
<b>Figura 11</b> - <i>Camada física do downlink, FDD, banda de 20MHz (100RBs), [48].</i> ..	26
<b>Figura 12</b> - <i>Exemplo de alocação de recursos pelo scheduling do eNB.</i> .....	32
<b>Figura 13</b> - <i>Sistema de arranjo de antenas MIMO <math>M \times N</math>.</i> .....	33
<b>Figura 14</b> - <i>Configuração de arranjo para sistemas MIMO.</i> .....	35
<b>Figura 15</b> - <i>Cenários SU-MIMO e UM-MIMO.</i> .....	36
<b>Figura 16</b> - <i>A nova configuração MIMO ou Enhanced-MIMO no LTE-A.</i> .....	38
<b>Figura 17</b> - <i>Feedback do CSI fornecidas pelo UE, adaptado de [48].</i> .....	41
<b>Figura 18</b> - <i>Capacidade Ergódica para diferentes canais MIMO.</i> .....	44
<b>Figura 19</b> - <i>Capacidade Ergódica em função do número de antenas <math>[n]</math>.</i> .....	46
<b>Figura 20</b> - <i>Capacidade do MCS, Limite de Shannon e a sua fórmula modificada.</i> ..	48
<b>Figura 21</b> - <i>Throughput entre as camadas LTE.</i> .....	52
<b>Figura 22</b> - <i>Throughput DL em função da SNR para BW=20MHz e MIMO <math>2 \times 2</math>.</i> ...	53
<b>Figura 23</b> - <i>Mapeamento CW nos modos de transmissão TxD e SM.</i> .....	54
<b>Figura 24</b> - <i>Processo de transferência de dados para um UE operando em CA.</i> .....	55
<b>Figura 25</b> - <i>Throughput teórico em função da banda de operação para DL, [4].</i> ...	60
<b>Figura 26</b> - <i>Evolução de CA na categoria dos UEs, adaptado de [79].</i> .....	61
<b>Figura 27</b> - <i>Seleção de PCC e SCC para diferentes UEs, [27].</i> .....	62
<b>Figura 28</b> - <i>Implantação de CA em diferentes eNBs e bandas de operação.</i> .....	63
<b>Figura 29</b> - <i>Classificação CA nas bandas de operação.</i> .....	64
<b>Figura 30</b> - <i>Alocação espectral entre duas CCs contíguas.</i> .....	64

<b>Figura 31</b> - Principais característica dos padrões 3GPP, [86][87].....	66
<b>Figura 32</b> - Analisador Rhode&Schwarz CMW500 e UE Qualcomm MDM9X50. ..	71
<b>Figura 33</b> - Throughput experimental para o cenário de canal emulado. ....	72
<b>Figura 34</b> - Topologia experimental usada no laboratório.....	74
<b>Figura 35</b> - Principais parâmetros na programação do eNB piloto. ....	75
<b>Figura 36</b> - Equipamentos utilizados na coleta dos dados. ....	76
<b>Figura 37</b> - Throughput camada física na rede LTE-A, $BW_{agg} = 60\text{MHz}$ .....	78
<b>Figura 38</b> - Throughput, Utilização MIMO e taxa de BLER para cada CC.....	79
<b>Figura 39</b> - Throughput camada física para os modos SIMO e MIMO.....	81
<b>Figura 40</b> - PDSCH Throughput para o UE Samsung Galaxy S7. ....	82
<b>Figura 41</b> - Layout da cobertura indoor no cenário com mobilidade. ....	84
<b>Figura 42</b> - CDF das medidas de RSRP em DL para as três CCs. ....	85
<b>Figura 43</b> - CDF das medidas de SNR em DL para as três CCs. ....	86
<b>Figura 44</b> - Operação da AMC e amostras de throughput para PCell-700MHz.....	87
<b>Figura 45</b> - Operação da AMC e amostras de throughput para SCell1-1800MHz. .	88
<b>Figura 46</b> - Operação da AMC e amostras de throughput para SCell2-2600MHz. .	88
<b>Figura 47</b> - Amostas SNR-CQI da PCell (700MHz). ....	89
<b>Figura 48</b> - Amostras SNR-CQI da SCell1 (1800MHz). ....	90
<b>Figura 49</b> - Amostras SNR-CQI da SCell2 (2600MHz). ....	90
<b>Figura 50</b> - Amostras de throughput em função do CQI.....	91
<b>Figura 51</b> - Amostras de Throughput da camada física por CC.....	93
<b>Figura 52</b> - Amostras de throughput em função do RSRP. ....	95
<b>Figura 53</b> - Throughput da SCell2 nos modos SIMO $1\times 2$ e MIMO $2\times 2$ .....	96
<b>Figura 53</b> - Evolução dos UEs e proposta de configurações futuras.....	103

## Lista de Tabelas

<b>Tabela 1</b> - <i>Bandas de Operação – Inte-Band CA (3DL/1UL), [24].</i> .....	6
<b>Tabela 2</b> - <i>Comparação taxas teóricas de redes LTE e LTE-A [27].</i> .....	10
<b>Tabela 3</b> - <i>Novas Categorias dos Terminais LTE-Advanced, [28].</i> .....	11
<b>Tabela 4</b> - <i>Perfis de atraso para modelos de canais LTE, [33].</i> .....	15
<b>Tabela 5</b> - <i>Combinação entre perfis de atraso e efeito Doppler, adaptado de [33].</i> 15	
<b>Tabela 6</b> - <i>Picos teóricos de dados para LTE-Advanced, [4].</i> .....	22
<b>Tabela 7</b> - <i>Parâmetros do quadro de rádio da camada física do LTE/LTE-A, [46].</i> 27	
<b>Tabela 8</b> - <i>Mapeamento CQI, MCS e SNR, [50][52].</i> .....	30
<b>Tabela 9</b> - <i>Modos de Transmissão suportados pelo PDSCH, [50].</i> .....	39
<b>Tabela 10</b> - <i>Eficiência Espectral LTE-Advanced, [4].</i> .....	42
<b>Tabela 11</b> - <i>Eficiência da Largura de Banda no DL com MIMO, adaptado [78].</i> ... 49	
<b>Tabela 12</b> - <i>Mapeamento MCS / <math>I_{TBS}</math>, adaptado de [50].</i> .....	56
<b>Tabela 13</b> - <i>Mapeamento <math>I_{TBS}</math> / PRBs para 1 camada espacial, adaptado de [50].</i> . 57	
<b>Tabela 14</b> - <i>Resultados teóricos das máximas taxas no DL, com HOM e MIMO.</i> ... 59	
<b>Tabela 15</b> - <i>Inter-Band com Tri-CA no DL e 60MHz de banda total agregada.</i> ..... 71	
<b>Tabela 16</b> - <i>Dados simulados no CMW500 na configuração Inter-Band.</i> .....	72
<b>Tabela 17</b> - <i>Parâmetros de capacidades do UE Cat-16 MDM9X50 Qualcomm.</i> ..... 73	
<b>Tabela 18</b> - <i>Classificação dos ambientes.</i> .....	84

# Lista de Abreviaturas e Siglas

3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
AMC	<i>Adaptive Modulation and Coding</i>
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
BLER	<i>Block Error Rate</i>
BW	<i>Bandwidth</i>
CA	<i>Carrier Aggregation</i>
CC	<i>Component Carrier</i>
CDD	<i>Cyclic Delay Diversity</i>
CoMP	<i>Coordinated Multipoint Processing</i>
CP	<i>Cyclic Prefix</i>
CQI	<i>Channel Quality Indicator</i>
CSI	<i>Channel State Information</i>
CW	<i>Codeword</i>
DL	<i>Downlink</i>
EDGE	<i>Enhanced Data Rates for GSM Evolution</i>
eNB	<i>evolved-NodeB</i>
EPA Channel	<i>Extended Pedestrian A Channel</i>
ETU Channel	<i>Extended Typical Urban Channel</i>
E-UTRAN	<i>Evolved Universal Access Network</i>
EVA Channel	<i>Extended Vehicular A Channel</i>
FDD	<i>Frequency Division Duplex</i>
FDM	<i>Frequency Division Multiplexing</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
HOM	<i>High Order Modulation</i>
HSDPA	<i>High-Speed Downlink Packet Access</i>
HSPA	<i>High Speed Packet Access</i>
ICI	<i>Interchannel Interference</i>

IFFT	<i>Inverse Fast Fourier Transform</i>
IMT-A	<i>International Mobile Telecommunications Advanced</i>
ISI	<i>Inter-Symbol Interference</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
ITU-R	<i>International Telecommunication Union Radiocommunication</i>
LAA	<i>Licensed Assisted Access</i>
LoS	<i>Line-of-Sight</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
LTE-Advanced	<i>Long Term Evolution Advanced (LTE-A)</i>
LTE-U	<i>LTE-Unlicensed</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>
MC	<i>Multi-Carrier</i>
MCS	<i>Modulation and Coding Scheme</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
MISO	<i>Multiple-Input, Single-Output</i>
N-LoS	<i>Non Line of Sight</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
PAPR	<i>Peak to Average Power Ratio</i>
PBCH	<i>Physical Broadcast Channel</i>
PCC	<i>Primary Carrier Component</i>
PCell	<i>Primary Serving Cell</i>
PDCCH	<i>Physical Downlink Control Channel</i>
PDCP	<i>Packet Data Convergence Protocol</i>
PDSCH	<i>Physical Downlink Shared Channel</i>
PHY	<i>Physical Layer</i>
PMI	<i>Precoder Matrix Indicator</i>
PRB	<i>Physical Resource Block</i>
PSS	<i>Primary Synchronization Signal</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RB	<i>Resource Block</i>
RE	<i>Resource Element</i>

RI	<i>Rank Indicator</i>
RLC	<i>Radio Link control</i>
RS	<i>Reference Signal</i>
RSRP	<i>Reference Signal Received Power</i>
SB	<i>Scheduling Block</i>
SC	<i>Single-Carrier</i>
SCC	<i>Secondary Component Carrier</i>
SCell	<i>Secondary Serving Cell</i>
SC-FDMA	<i>Single Carrier - Frequency-Division Multiple Access</i>
SIMO	<i>Single-Input, Multiple-Output</i>
SISO	<i>Single-Input, Single-Output</i>
SM	<i>Spatial Multiplexing</i>
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>
SSS	<i>Secondary Synchronization Signal</i>
SU-MIMO	<i>SU-MIMO</i>
TBS	<i>Transport Block Size</i>
TDD	<i>Time Division Duplex</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
TM	<i>Transmission Mode</i>
TR	<i>Technical Report</i>
Thr	<i>Throughput</i>
TS	<i>Technical Specification</i>
TTI	<i>Transmission Time Interval</i>
TxD	<i>Transmit Diversity</i>
UE	<i>User Equipment</i>
UL	<i>Uplink</i>
MU-MIMO	<i>Multi User MIMO</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunication System</i>

# Lista de Publicações

- I. T. N. Rodovalho, R. A. Santos, Arismar Cerqueira S. Jr., "Implementation of High Capacity Mobile Networks Based on a Reconfigurable Antenna, Carrier Aggregation and MIMO". In: Workshop de Micro-ondas do Labmax, 2017, Suzano. Anais do IV WMO, 2017.
- II. T. N. Rodovalho, R. A. Santos, Arismar Cerqueira S. Jr., "Implementation of High Capacity Mobile Networks Based on a Reconfigurable Antenna, Carrier Aggregation and MIMO". In: Revista Exatas Online, Dec. 2017. Available: <http://www2.uesb.br/exatasonline/>
- III. R. A. Santos, A. L. M. Muniz, M. S. C. Borsato, T. H. Brandão, T. N. Rodovalho, Arismar Cerqueira S. Jr., "Multi-Technology Wireless Coverage Based on a Leaky-Wave Reconfigurable Antenna", In: 11th European Conference on Antennas and Propagation, 2017, Paris. Proceedings of EUCAP 2017, 2017.
- IV. A. L. M. Muniz, D. F. Noque, R. M. Borges, T. N. Rodovalho, SILVA, R. N., R. A. Santos, Arismar Cerqueira S. Jr., "Rede Opto-Wireless Amplificada baseada em Tecnologia Fotônica", In: Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais, 2016, Santarém. Proceedings do SBrT 2016, 2016.
- V. R. M. Borges, T. N. Rodovalho, Arismar Cerqueira S. Jr., "Reconfigurable multi-band radio-frequency transceiver based on photonics technology for future optical wireless communications", IET Optoelectronics (Print), v. 1, p. 1-6, 2015.

# Resumo

O objetivo desse trabalho é apresentar uma análise de desempenho experimental da camada física (PHY) de redes móveis de Quarta Geração (4G) do tipo LTE-Advanced (LTE-A) baseadas em Agregação de Portadoras (*Carrier Aggregation, CA*) e MIMO. A Agregação de Portadoras permite a combinação de frações de largura de banda oriundas de diferentes faixas espectrais, com a finalidade de aumentar a banda total do sinal e, conseqüentemente, maximizar o throughput do sistema.

A implementação baseou-se no uso de três CCs (component carriers) de 20MHz, nas bandas de 2600MHz, 1800MHz e 700MHz, e uma configuração de antenas MIMO 2×2. Além disso, utilizou-se dois dispositivos móveis Categoria 16 (256QAM) e Categoria 9 (64QAM) com taxas nominais de 600 e 450Mbps respectivamente. Comparar as taxas teóricas propostas pelas especificações do 3GPP com os resultados experimentais obtidos nesse trabalho permitirá a compreensão, a aplicabilidade e a eficiência das técnicas utilizadas.

A implementação da rede LTE-A foi dividida em cinco fases: apresentação da arquitetura de rede LTE e LTE-A; utilização de arranjos de antenas MIMO para aumentar a eficiência espectral; principais características da agregação de multiportadoras utilizada no LTE-A; análise teórica de redes LTE-A; implementação e configuração dos cenários de testes de redes LTE-A, além de análises de desempenho experimentais em função do throughput, BLER, CQI e RSRP. Resultados experimentais demonstram a transmissão sem fio de 600Mbps utilizando 3CCs e MIMO 2×2.

Palavras-chave: agregação de portadoras, LTE-A, MIMO e redes celulares.



# Abstract

The main goal of this work is presenting an experimental performance analysis of the physical layer (PHY) of the fourth generation (4G) LTE-Advanced mobile networks based on carrier aggregation (CA) and MIMO. The CA technique allows the combination of bandwidth fractions from different spectral bands, with the purpose of increasing the signal bandwidth and, consequently, maximizing the system throughput.

The implementation has been based on the use of three 20MHz component carriers (CCs), in the 2600MHz, 1800MHz and 700MHz frequency bands, and a 2×2 MIMO antenna configuration. Furthermore, two Category 16 (256QAM) and Category 9 (64QAM) mobile devices with nominal rates of 600 and 450Mbps, respectively, have been employed. Comparing the theoretical rates proposed by the 3GPP specifications with the experimental data obtained in this work will enable to comprehend the applicability and efficiency of the two applied.

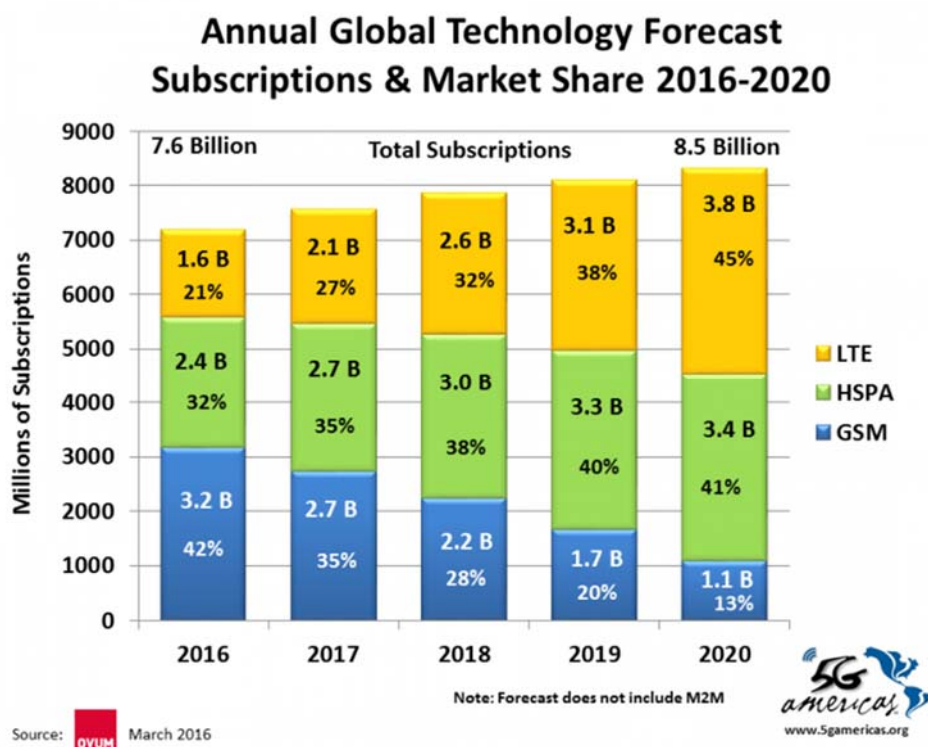
The LTE-A network implementation has been divided into five phases: description of the LTE and LTE-A network architectures; the use of MIMO antenna arrangements to increase the spectral efficiency; the main properties of the multi-carrier aggregation used in LTE-A; theoretical analysis of LTE-A networks; implementation and configuration of different scenarios of LTE-A networks, as well experimental performance investigations as a function of throughput, BLER, CQI and RSRP. Experimental results demonstrate 600Mbps wireless transmission using 3CCs and 2×2 MIMO.

Keywords: 4G, carrier aggregation, LTE-Advanced, MIMO and cellular networks.

# Capítulo 1. Introdução

## 1.1. Contextualização e Revisão Bibliográfica

De acordo com a organização não governamental 5G Américas [1], a rede móvel mundial predominante nos próximos anos será o LTE, conforme documentado na Fig. 1. Contudo, o consumo de dados está revertendo esse quadro e quaisquer apostas futuras sobre as atuais redes móveis, apontam para o crescimento exponencial de dados motivado pelo desenvolvimento de novas aplicações e serviços que exigem demandas de tráfego cada vez maiores.



**Figura 1** - Estimativa para crescimento da Rede Móvel (Extraído de [1]).

A necessidade por redes móveis capazes de suportar o crescente consumo de serviços de dados, conduziu o mercado de telecomunicações ao desenvolvimento do *LTE* (*Long Term Evolution*) ou *E-UTRAN* (*Evolved Universal Access Network*). A primeira rede LTE, Release 8, foi lançada comercialmente em dezembro de 2009 pela

TeliaSonera em Estocolmo, com isso surgiu o padrão global de Quarta Geração das Comunicações Móveis.

A tecnologia 4G-LTE é uma evolução dos sistemas móveis anteriores, 2G-GSM/EDGE e 3G-UMTS/HSPA, baseada em uma arquitetura de rede plana totalmente voltada para o IP (*Internet Protocol*). Esta rede de alta capacidade apresentou larguras de banda flexíveis, elevada eficiência espectral, baixa latência e altas taxas de conexões, preparada para lidar com níveis de desempenho rigorosos, levando a uma infinidade de serviços móveis, tais como: acesso multimídia para distribuição de conteúdo, comunicações em tempo real, redes sociais, etc. [2].

Para aprimorar ainda mais o LTE e ampliar a capacidade da rede de acesso, o *LTE-Advanced* ou *LTE-A* introduzido no Release 10 do 3GPP em dezembro de 2010, está em acelerada implantação nas atuais redes móveis aqui no Brasil desde o segundo semestre de 2016. As vantagens para os usuários serão ainda maiores, podendo atingir débitos superiores a 1Gbps em DL (*downlink*), representando uma melhoria na eficiência espectral de 1,4 vezes quando comparada ao LTE Release 8 [2]. Como resultado, o rendimento teórico do LTE-A torna-se 10 vezes maior do que o seu antecessor. Essa taxa de transferência, quando empregado em uma largura de banda de 100MHz, assegura baixar um arquivo de filme HD de 4GB em apenas 32s! Totalmente compatível com as versões anteriores e futuras do LTE, o LTE-A permitirá um uso mais amplo, flexível e eficiente da banda espectral explorada pelas operadoras móveis.

Embora com as melhorias propostas para elevar a eficiência espectral, infelizmente ainda não seria possível entregar as taxas definidas pelos requisitos do LTE-A [3], sem, contudo, não aumentar a largura de banda de transmissão utilizada. No entanto, as operadoras de redes móveis não dispõem de um segmento contínuo de largura de banda (por exemplo, 100MHz) devido a ocupação fragmentada do espectro eletromagnético. Para disponibilizar uma maior largura de banda, contínua ou não, o 3GPP introduziu no Release 10 a técnica de Agregação de Portadoras ou *Carrier Aggregation (CA)*, posteriormente aprimorada nos Releases 11, 12 e 13, com a capacidade de suportar transmissão em várias CCs.

Devido à flexibilidade de largura de banda, já prevista no LTE Release 8, o LTE-A pode suportar larguras de banda de 1,4 a 20MHz. Sendo a largura de banda de transmissão máxima total de 100MHz, proveniente da agregação de 5CCs de 20MHz [3] e correspondentemente, taxas de dados superiores a 1Gbps em DL [4]. A compatibilidade de redes está assegurada uma vez que cada CC está em conformidade com o Release-8 [4]. Consequentemente, a Agregação de Portadoras possibilitará ao usuário atingir altas taxas de dados com uma utilização flexível e eficiente do espectro.

Atualmente, quase 200 redes LTE-Advanced em 96 países estão em serviço, compatíveis com móveis e dispositivos de Categoria 6 (150~300Mbps de DL), [5]. O espectro mais amplamente empregado nas implantações da rede LTE continua a ser de 1800MHz (Banda-3 do 3GPP), utilizado em 47% das redes mundiais [5]. A segunda banda mais utilizada para os sistemas LTE é a de 2,6GHz (Banda-7 do 3GPP). No Brasil as primeiras redes LTE foram lançadas em 2012 na Banda-7 (faixas de frequência de 2.500 a 2.690MHz) e como as operadoras já possuíam licença da Banda-3 para operar com GSM, optaram pela reutilização do espectro (*refarming*) como solução para introdução das redes LTE-A. Como exemplo, já no segundo trimestre de 2016, a operadora TIM conseguiu liberar 5 dos 20MHz que dispõe na Banda-3 e agregar com as faixas adquiridas no leilão da Banda-7. Com a liberação da faixa de 700MHz mais uma possibilidade de agregação será permitida na Banda-28.

A Agregação de Portadoras tem recebido atenção significativa, desde que foi introduzida no 3GPP Release 10 no LTE-Advanced em 2011. Existem vários documentos na literatura [6]-[22] que abordam o tema CA sob diferentes métodos de análise de desempenho, opções de implantação e desafios da camada física. Os métodos analíticos [6]-[12] são válidos para avaliar os picos de *throughput* ou as máximas taxas de eficiência espectral de uma dada tecnologia. Uma análise de desempenho mais profunda requer o uso de simulações. Entretanto, a análise computacional, assume condições de canais pré-definidos ou ideais, o que resulta em uma estimativa muito otimista da capacidade de suas operações [13]-[23].

No contexto de implementação de rede LTE-A em ambientes *indoor*, foram relatados resultados baseados em testes para 2 e 3CCs de 20MHz, MIMO 2×2, móveis Categoria 6 (300Mbps) e 9 (450Mbps) em DL com notáveis ganhos de 295Mbps e

441Mbps respectivamente na taxa de transferência de dados [6][7]. Ambos estudos foram realizados em ambiente de ensaio controlado com baixa carga da rede e reduzida potência de transmissão. Já em [8], um *drive\_test* realizado em uma rede comercial operando com duas CCs (uma de 20MHz na faixa de 2600MHz em e outra de 10MHz na faixa de 800MHz) permitiu atingir taxas de pico de 203Mbps e média de 76Mbps ao longo da rota percorrida. Adicionalmente, diversos cenários para simulação da CA com diferentes tamanhos de CCs na mesma banda, adjacentes ou não e em diferentes bandas de frequências foram explorados [9]. Comprovou-se que quando a agregação ocorre na mesma banda, o cenário de CCs não adjacente atinge melhores taxas de pico que o cenário de CCs adjacentes. Além disso, para o cenário de agregação em diferentes bandas, a combinação de CCs em frequências mais baixas produz débitos binários mais elevados.

Em [10], outros resultados de testes reais de campo são apresentados em termos de taxa de transferência e parâmetros relacionados ao desempenho como as estatísticas de erro por estimativa, propagação por efeito Doppler e uma comparação entre os cenários *Inter-Band* e *Intra-Band* CA. Tais resultados, não evidenciam nenhuma vantagem adicional sobre qual modelo de agregação utilizar.

Nenhum dos trabalhos mencionados avaliaram um esquema de modulação de alta ordem (*HOM, High Order Modulation*) como por exemplo, 256QAM previsto no Rel. 12. Os primeiros dispositivos comerciais Categoria 16 capazes de agregar até 5CCs de 20MHz e a maioria das redes capazes de ofertar tais larguras de banda ainda estão em estágios iniciais de desenvolvimento. Móveis como o Sony Xperia XZ Premium e Samsung Galaxy S8+, lançados agora no segundo semestre de 2017, além de possuírem essa capacidade de processamento, incluem também um arranjo de antenas MIMO 4×4 (4TX-4RX) proporcionando diversidade de transmissão e multiplexação espacial para aumentar a diversidade, a taxa de dados ou ambos.

Nessa dissertação, a opção por métodos analíticos tem por objetivo explorar o desempenho da CA em termos das máximas taxas de transferência da camada física, para um ambiente *indoor* piloto utilizando HOM com um arranjo de antenas MIMO 2×2, com foco especial em implantações e dispositivos comercialmente disponíveis. Adicionalmente, será reportada uma análise das taxas máximas de *throughput*

avaliadas para um móvel comercial Categoria 9, utilizando uma largura de banda agregada de 60MHz em faixas segmentadas do espectro de frequências.

A principal contribuição desta dissertação é fornecer uma compreensão clara da técnica de CA em uma rede LTE-Advanced. Para tal, implementou-se uma rede com 3CCs, HOM e multiplexação espacial, avaliando as máximas taxas de *throughput* da camada física e de aplicação. Uma fundamentação teórica com base nas especificações do 3GPP será apresentada e o conceito de multiplexação espacial para fins da análise de desempenho. A capacidade em termos da velocidade de DL do LTE-A utilizando a função CA associada será calculada, incluindo os efeitos da largura de banda adicional por mais CCs no sistema e *overheads* da camada física. Por fim, uma comparação proposital entre os modos MIMO e SIMO utilizados nos projetos de arranjos de antenas será estudada. Avaliar os principais indicadores de desempenho com a variação das características do canal, permitirá uma melhor compreensão dos efeitos de propagação causado pelo múltiplo percurso no sistema em questão.

## 1.2. Objetivos da Dissertação

O objetivo desse trabalho é caracterizar as principais métricas de desempenho relacionadas à técnica de Agregação de Portadoras, da rede LTE-A no modo de operação *FDD (Frequency Division Duplex)* em ambiente *indoor*. O conceito de multiplexação espacial será aplicado e a capacidade no enlace de DL do LTE-A associada será calculada, incluindo os efeitos da largura de banda constituída por 3CCs nas bandas B3 (1800MHz), B7 (2600MHz) e B28 (700MHz). O cenário de teste foi elaborado dentro do ecossistema móvel ativo de uma operadora celular. Por se tratar de uma cobertura *indoor* com potência de transmissão de 30dBm e ambiente fechado, não ocorreu nenhuma interferência com a rede externa permitindo assim aproximar ainda mais os resultados práticos aos modelos teóricos encontrados nas recomendações do 3GPP.

Além dos dados experimentais, esse manuscrito detalha os resultados teóricos de forma analítica possibilitando ao leitor uma compreensão dinâmica das técnicas

usadas para o cálculo da máxima taxa de transferência de dados possível em uma rede móvel de Quarta Geração. A proposição central é encontrar a máxima transferência de dados em DL ou *throughput* que a arquitetura de rede LTE-Advanced é capaz de fornecer com a maioria dos requisitos inclusos nas normas do 3GPP [3], incluindo a utilização do arranjo de antenas na configuração MIMO 2×2 em canais com alto desempenho. Para caracterizar as métricas de desempenho relacionados com a qualidade do canal de rádio em redes LTE-A e corroborar às especificações normativas do 3GPP [3], outros parâmetros de desempenho serão investigados, tais como: SNR (*Signal to Noise Ratio*), CQI (*Channel Quality Indicator*), RSRP (*Reference Signal Received Power*) e BLER (*Block Error Rate*).

Do ponto de vista da configuração, foram consideradas as bandas de agregação de acordo com a recomendação do 3GPP TR 36.853-13 [24], alocadas em portadoras componentes de 20MHz nas bandas 3, 7 e 28 não-contíguas (*inter-band*) conforme mostrado na Tab. 1:

**Tabela 1 - Bandas de Operação – Inte-Band CA (3DL/1UL), [24].**

E-UTRA CA Banda	E-UTRA Banda	Uplink (UL)	Canal BW (MHz)	Downlink (DL)	Máxima Banda Agregada (MHz)	Modo Duplexação
		FUL_low – FUL_high (MHz)		FDL_low – FDL_high (MHz)		
CA B3_B7_B28	3	1710 – 1785	5, 10, 15, 20	1805 – 1880	60	FDD
	7	2500 – 2570	5, 10, 15, 20	2620 – 2690		FDD
	28	703 – 748	5, 10, 15, 20	758 – 803		FDD

### 1.3. Estrutura da Dissertação

Para atingir os objetivos, esta dissertação foi estruturada em cinco Capítulos, resumidamente apresentados:

- Capítulo 1 (Introdução): Contextualiza o mercado mundial de telefonia móvel e os importantes progressos da tecnologia LTE do 3GPP, além dos objetivos gerais da dissertação motivados pela literatura científica relativa ao tema abordado;

- Capítulo 2 (Fundamentos do LTE-Advanced): Apresenta a estrutura da interface de rádio do LTE-A. Em particular, o estudo concentra-se na análise do canal de DL, destacando-se ainda a técnica OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), a camada física do LTE-FDD e uma análise dos mecanismos de informações de estado do canal relacionados ao indicador de qualidade, utilizado na operação AMC (*Adaptive Modulation and Coding*) para garantir a qualidade dinâmica às transmissões de rádio;
- Capítulo 3 (MIMO, Modos de Transmissão e Agregação de Portadoras): Entre outras características, esse Capítulo aborda as técnicas de múltiplas antenas MIMO como melhorias na eficiência de recursos de rádio. Além disso, há uma descrição analítica de resultados teóricos para encontrar as taxas de dados utilizando as normas e tabelas do 3GPP para redes LTE-A. Por fim, apresenta-se a Agregação de Portadoras (CA), uma técnica introduzida no Release 10 do 3GPP e evoluções posteriores, que permite à utilização simultânea de várias portadoras componentes (CC) discretas na camada física.
- Capítulo 4 (Implementação de Redes LTE-A): Este Capítulo descreve com detalhes as atividades de medições de campo realizadas com base na implementação do cenário de teste emulado e programado. Apresenta-se os principais resultados obtidos em relação à qualidade do ambiente de rádio para a rede piloto LTE-A proposta, operando com três bandas agregadas em diferentes condições de mobilidade, explorando seus principais parâmetros físicos de desempenho, tais como: SNR, CQI, RSRP e *throughput*;
- Capítulo 5 (Conclusão e Trabalhos Futuros): Finalmente, o Capítulo 5 resume as principais conclusões do trabalho realizado, além de sugestões para trabalhos futuros.



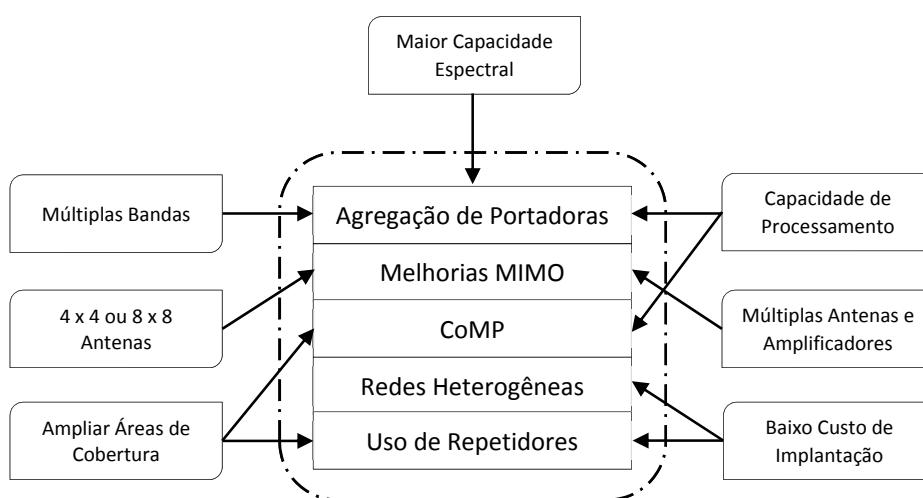
## Capítulo 2. Fundamentos do LTE-Advanced

Em março de 2008 o 3GPP iniciou o estudo sobre LTE-Advanced ou LTE-A, com a finalidade de definir os requisitos e investigar os componentes da evolução do padrão LTE. Para atender a todos os aumentos esperados nas taxas de transmissão de dados, o ITU (*International Telecommunication Union*) publicou a especificação ITU-R 57 para sistemas celulares Quarta Geração conhecida como *International Mobile Telecommunications Advanced (IMT-Advanced, IMT-A)*. A ITU-R apresenta todos os fundamentos essenciais para o desenvolvimento de uma nova interface de rádio capaz de suprir e até mesmo superar as expectativas da demanda por elevadas taxas de dados das redes móveis. Os principais requisitos impostos pela ITU-R incluem taxas de transmissão de 100Mbps para dispositivos em alta mobilidade e 1Gbps para deslocamentos lentos, como uma pessoa caminhando, por exemplo [25].

Como uma evolução do padrão anterior, um dos requisitos do 3GPP estabelecidos na TR 36.913 [3] é a compatibilidade espectral, ou seja, o LTE-A deve comportar as bandas ocupadas pelo LTE. Essa compatibilidade de espectro é de fundamental importância para uma transição suave e de baixo custo das redes LTE-A. A Fig. 2 mostra uma série de novas melhorias técnicas que foram introduzidas em relação ao padrão anterior, incluindo [4]:

- Elevado grau de funcionalidade em todo o mundo, mantendo a flexibilidade para suportar ampla gama de serviços e aplicações de uma forma economicamente eficiente.
- Uso de redes heterogêneas mediante o uso de *smallcells* ou *femtocells* células de baixa potência de transmissão para suprir o déficit de cobertura e pontos de acesso *Wi-Fi (hotspots)* com garantia de interoperabilidade entre as redes.
- Flexibilidade para maiores larguras de banda por meio da agregação de portadoras, podendo atingir até 100MHz de banda total, aumentando assim as taxas de transmissão.
- Expansão do uso de múltiplas antenas, sistema MIMO com até 8 camadas espaciais em DL e 4 níveis em UL.

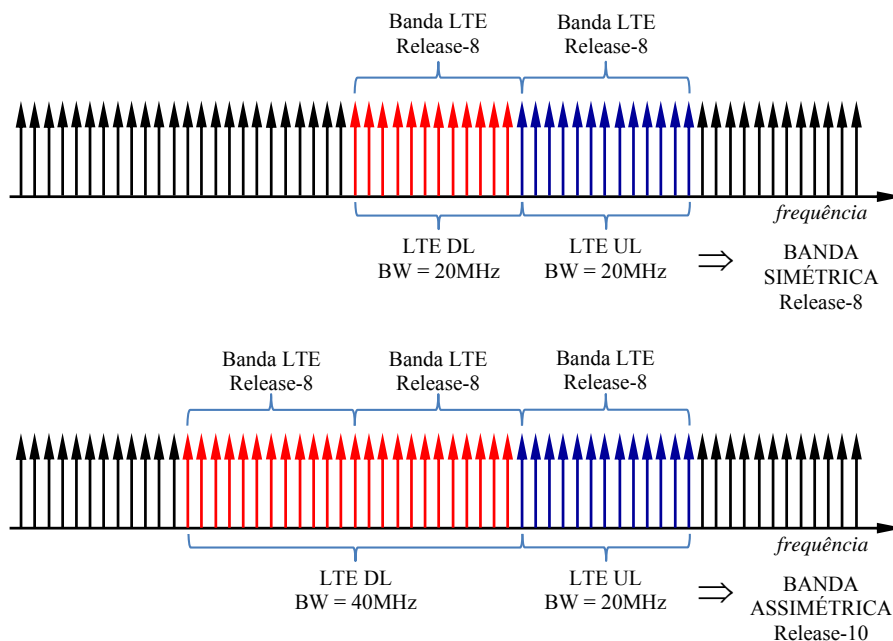
- Uso de coordenação multiponto na transmissão e recepção (*CoMP*, *Coordinated Multipoint Processing*) para alcançar alta eficiência espectral para resolver o problema de interferência na área de borda das células com a cooperação de recursos das células vizinhas.
- O uso de repetidores dentro da moderna rede móvel para melhorar e até mesmo aumentar a capacidade de cobertura e reduzir os custos de implantação.



**Figura 2** - As melhorias tecnológicas utilizadas no LTE-Advanced.

O LTE já no seu lançamento, o Release-8, foi comercialmente adotado como a tecnologia móvel de Quarta Geração, embora não atendesse aos requisitos do IMT-Advanced. O LTE, na verdade, não pode ser considerada uma tecnologia 4G e sim antecessora, muitas vezes denominada de 3.9G [26]. Já o LTE-A, devido ao seu desempenho torna-o uma verdadeira tecnologia 4G de acordo com as definições dadas pela ITU-R 57.

O LTE-A suporta fluxos e bandas assimétricas de tráfego na transmissão de seus dados, assim como ilustrado na Fig. 3. A funcionalidade *Carrier Aggregation* permite compor uma banda total em DL, de até 100MHz com frações da porção do espectro de frequências adjacentes ou não [1]. Na literatura o termo para agregação 3DL/1UL designa 3 portadoras ou *Carriers* agregadas em DL sem agregação em UL.



**Figura 3 - Banda do LTE e LTE-A com Carrier Aggregation 2DL/1UL.**

A Tab. 2 resume uma comparação da evolução dos requisitos de capacidade dos sistemas LTE (Rel. 8) e LTE-A (Rel. 10) em termos das suas taxas de transmissão [27].

**Tabela 2 - Comparação taxas teóricas de redes LTE e LTE-A [27].**

Parâmetro		LTE (Rel. 8)	LTE-A (Rel. 10)
Bandas Escaláveis		1,4; 3; 5; 10; 15; 20MHz	20-100MHz (com CA)
Máx. Banda de Transmissão	Downlink (DL)	20MHz	100MHz
	Uplink (UL)	20MHz	40MHz
Taxa de Pico	Downlink (DL)	300Mbps	1Gbps
	Uplink (UL)	75Mbps	500Mbps
Eficiência Espectral	Downlink (DL)	15bps/Hz	30bps/Hz
	Uplink (UL)	3,75bps/Hz	15bps/Hz

Ao incorporar os requisitos técnicos do IMT-Advanced as redes LTE garantiram o seu caminho evolutivo comercialmente, agregando novas bandas, avançadas técnicas MIMO que suportam multiplexação espacial (*Spatial Multiplexing*, *SM*) de até 8 camadas para DL e 4 camadas para UL com elevada eficiência. Desta maneira, tornam-se viáveis novas redes capazes de suportar alta transmissão de dados às aplicações que exigem uma grande demanda tráfego, principalmente em DL.

Para atingir as taxas de dados suportadas pela nova rede, no LTE-A foram introduzidas diferentes capacidades nos dispositivos de acesso ou UE (*User Equipment*), em termos de taxas de dados, ordem de modulação e uso de múltiplas antenas (MIMO) definidas na TS 36.306 [28]. Como parte da conexão, os parâmetros de acesso podem ser especificados separadamente, limitando o número de combinações em um conjunto de capacidades de camada física para formar a categoria do UE. As novas categorias introduzidas pelo 3GPP para os futuros lançamentos do LTE estão resumidas e apresentadas na Tab. 3.

**Tabela 3 - Novas Categorias dos Terminais LTE-Advanced, [28].**

Release 3GPP	Categoria UE	Taxa Máxima (Mbps)		Típico #CC Agregadas		Modulação de cada Subportadora		Múltiplas Antenas (MIMO)			
		DL	UL	DL	UL	DL	UP	2x2	4x4	8x8	
10	6	301,504	51,024	2	1	QPSK 16QAM 64QAM	QPSK 16QAM	Sim	Opcional	Não	
	7	301,504	102,048	2	2		64QAM	Não	Não	Sim	
	8	2998,560	1497,760	5	5		64QAM	QPSK 16QAM			
11	9	452,256	51,024	3	1	QPSK 16QAM 64QAM 256QAM	QPSK 16QAM	Sim	Opcional	Não	
	10	452,256	102,048	3	2		64QAM	Não	Não	Sim	
12	11	603,008	51,024	3	1	QPSK 16QAM 64QAM 256QAM	QPSK 16QAM	Sim	Opcional	Não	
	12	603,008	102,048	3	2		64QAM	Não	Não	Sim	
	13	391,632	150,752	2	2		256QAM	64QAM	Sim	Opcional	Não
	14	3916,56	102,048	5	1		64QAM	64QAM			
	15	798,800	150,752	4	1		64QAM	64QAM			
	16	1051,360	1051,400	5	1		64QAM	64QAM			

A partir do Release-10 os terminais possuem a funcionalidade de *Carrier Aggregation*, até mesmo no *uplink*. A nova classificação para os UEs assinala um número máximo de *Component Carriers* e o máximo grau de multiplexação espacial que pode ser realizado com o emprego de múltiplas antenas, aumentando substancialmente as taxas de transferência suportadas pelos dispositivos tanto no enlace descendente (DL) como no ascendente (UL). Embora a literatura mencione taxas inteiras (1Gbps/500Mbps) para DL e UL os valores da Tab. 2 são calculados a partir das especificações do fabricante, abordando um conjunto de parâmetros utilizados pela tecnologia de acordo com a norma TS 36.606 [28].

## 2.1. Técnicas de Múltiplo Acesso

Adotou-se para o LTE-Advanced, um novo plano de acesso múltiplo em sua interface aérea. Em DL, o 3GPP definiu a técnica de multiportadoras OFDM, para formar a sua técnica de múltiplo acesso denominada *OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)*. Uma técnica que distribui subportadoras sobrepostas e ortogonais para os usuários, permitindo a transmissão dos tráfegos individuais simultaneamente resultando em um ganho de largura do espectro em até 50%. Essa técnica traz robustez contra a interferência múltiplos percursos e pode ser utilizada de forma muito eficiente com um sistema de antenas MIMO [4].

No UL, o esquema de múltiplo acesso, com modulação de portadora única *SC-FDM*, empregado é o *SC-FDMA (Single Carrier - Frequency-Division Multiple Access)*. Tal tecnologia consiste em transmitir uma única onda subportadora modulada de cada vez por um determinado instante de tempo, ao invés de transmitir diversos conjuntos de sinais ao mesmo tempo como no OFDMA. Isto reduz os picos de potência média (PAPR, *Peak to Average Power Ratio*) nos amplificadores na transmissão dos dados no sentido do UE para a rádio base com uma implementação mais simples e mais barata [4]. O SC-FDMA combina o baixo PAPR, assim como o GSM e o UMTS, com a resiliência aos multipercursos.

## 2.2. O OFDM no Canal de Rádio Móvel

Como visto anteriormente, a principal vantagem da técnica OFDM em relação à modulação por portadora única é a ortogonalidade entre as subportadoras. A chave para manter a ortogonalidade sem causar interferência é elevar ao máximo a sobreposição espectral escolhendo o menor valor possível do espaçamento entre subportadoras ( $\Delta f$ ) o que torna o período de símbolo útil ( $T_u$ ) mais longo e, portanto, elevando a capacidade de cada símbolo transportar muito mais bits, em contrapartida a sistemas de portadora única que transmitem poucos bits em um tempo de transmissão mais curto, mas com a mesma taxa de transmissão [29].

A largura de banda (BW) disponível é então dividida em “ $N$ ” portadoras de banda estreita, adjacentes e uniformemente espaçadas, sendo que o tempo do símbolo OFDM será “ $N$ ” vezes maior que no caso de uma transmissão de portadora única. O número de subportadoras é escolhido de modo que o tempo de símbolo seja suficiente maior que o atraso máximo provocado pelo canal ( $\tau_{\text{máx}}$ ) ou *delay spread*, evitando interferência intersimbólica ou *ISI (Inter-Symbol Interference)* devido ao múltiplo percurso. Além disso, “ $N$ ” deve ser escolhido na potência 2 ( $N = 2^n$ ) para eficiência das transformadas de Fourier. Por outro lado deve-se também limitar a interferência entre portadoras ou *ICI (Interchannel Interference)* geradas pela perda de ortogonalidade devido ao efeito Doppler, caracterizado como o deslocamento da frequência ( $f_{\text{Dmáx}}$ ) da portadora ou *frequency spread (BW<sub>D</sub>)*, devido ao movimento do receptor em relação à fonte, [30].

As duas condições anteriores são tomadas para caracterizar um canal com dispersão plana em frequências e desvanecimento lento no tempo. No desvanecimento plano a largura de banda do sinal transmitido é muito menor que a largura de banda de coerência do canal ( $BW_s \ll BW_c$ ), ou equivalentemente, ocorre se o período do símbolo for maior que o espalhamento de atraso ( $T_u \gg \tau_{\text{rms}}$ ) do canal. No desvanecimento lento não há distorção do sinal, ocorre apenas degradação da intensidade do sinal recebido com redução na relação sinal-ruído (*SNR*) e, a duração do símbolo transmitido será muito menor que o tempo de coerência do canal ( $T_u \ll T_c$ ), ocasionado principalmente pelo aumento da distância do transmissor em relação ao receptor. Como consequência o canal pode ser assumido estático durante um ou mais períodos de símbolos garantido que na recepção as características espectrais do sinal serão preservadas facilitando o processo de equalização [30].

A banda de coerência do canal ( $BW_c$ ) é um parâmetro estatístico e descreve a natureza dispersiva no tempo do canal. Determina a faixa de frequências em que todas as componentes espectrais do sinal transmitido passam pelo canal com ganho constante e fase linear [29]-[31], em outras palavras, não há desvanecimento seletivo em frequências. Nessa faixa de frequências existe uma forte correlação em amplitude de suas componentes espectrais. Lee [32], classifica essa correlação em 50% e 90% sobre as componentes espectrais na banda de coerência. A banda de coerência

classifica um canal como plano ou seletivo em frequências de acordo com o espalhamento temporal efetivo do sinal transmitido ( $\tau_{rms}$ ).

O espalhamento Doppler ou espalhamento em frequência fornece informações sobre a alteração na frequência do sinal quando o receptor estiver em movimento em relação à fonte. Esse efeito permite conhecer a taxa de variação do canal rádio móvel a cada instante de tempo [31]. O tempo de coerência ( $T_c$ ) é inversamente proporcional ao espalhamento espectral causado pelo Efeito Doppler e traduz o quanto o canal se mantém invariante no tempo, representando um desvanecimento rápido ou lento do sinal transmitido.

A formulação paramétrica do desvanecimento para canais variantes na frequência e no tempo pode ser descrita pelos seguintes parâmetros [31] e [32]:

$$\begin{array}{l}
 \text{Parâmetros do sinal} \left\{ \begin{array}{l}
 \bullet \text{ largura de Banda: } BW_s \\
 \bullet \text{ frequência da portadora: } f_p \\
 \bullet \text{ período de símbolo útil: } T_s = T_u
 \end{array} \right. \\
 \\
 \text{Parâmetros do canal} \left\{ \begin{array}{l}
 \bullet \text{ espalhamento de atraso efetivo: } \tau_{rms} \\
 \bullet \text{ banda de coerência: } BW_c \\
 \bullet \text{ espalhamento Doppler: } BW_D = f_{Dmáx} \\
 \bullet \text{ tempo de coerência: } T_c
 \end{array} \right. \\
 \\
 \text{Parâmetros de deslocamento} \left\{ \begin{array}{l}
 \bullet \text{ velocidade da luz: } c = 3 \cdot 10^8 \text{ m / s} \\
 \bullet \text{ velocidade relativa do receptor: } v, \text{ m / s}
 \end{array} \right.
 \end{array}$$

Para ilustrar os conceitos anteriormente apresentados, a norma 3GPP TS 36.101 [33], define os perfis de canais em termos do espalhamento temporal do canal ou *delay spread*. Os modelos de propagação com desvanecimento devido ao múltiplo percurso foram definidos para representar ambientes com baixo, médio e alto espalhamento temporal (*delay spread*). A Tab. 4 apresenta esses cenários definidos como: modelo pedestre (EPA, *Extended Pedestrian A model*), modelo veicular (EVA, *Extended Vehicular A model*) e modelo típico urbano (ETU, *Extended Typical Urban model*) [33] e a Tab. 5 indica a combinação do perfil de atraso com efeito Doppler.

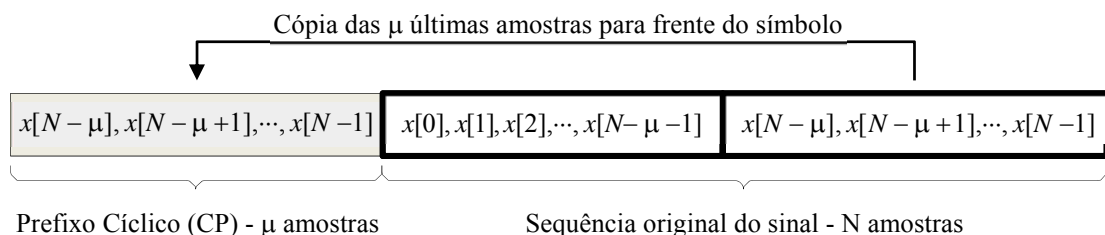
**Tabela 4 - Perfis de atraso para modelos de canais LTE, [33].**

Modelo	Número de Caminhos	Valor eficaz do espalhamento de retardo do canal ( $\tau_{rms}$ )	Máximo espalhamento de retardo do canal ( $\tau_{máx}$ )
Extended Pedestrian A (EPA)	7	45 ns	410 ns
Extended Vehicular A (EVA)	9	357 ns	2510 ns
Extended Typical Urban (ETU)	9	991 ns	5000 ns

**Tabela 5 - Combinação entre perfis de atraso e efeito Doppler, adaptado de [33].**

Modelo	$f_{Dmáx}$	$\tau_{rms}$	$\tau_{máx}$	Deslocamento Doppler	Velocidade
EPA 5Hz	5 Hz	45 ns	410 ns	5 Hz (Baixo)	2.7 km/h em 2 GHz
EVA 5Hz	5 Hz	357 ns	2510 ns		6.4 km/h em 850MHz
EVA 70Hz	70 Hz		991 ns	2510 ns	70 Hz (Médio)
ETU 70Hz	70 Hz	5000 ns		88.9 km/h em 850MHz	
ETU 300Hz	300 Hz	5000 ns	5000 ns	300 Hz (Alto)	162 km/h em 2 GHz
					381.2 km/h em 850MHz

O conceito de Prefixo Cíclico ou *Cyclic Prefix* (CP), definido na Fig. 4, refere-se a indexar um símbolo com uma repetição das suas amostras finais com a finalidade de prevenir os atrasos temporais devido ao múltiplo percurso que causam as interferências intersimbólicas (uma vez que atua como intervalo de guarda) e entre subportadoras (uma vez que mantém a ortogonalidade). Por exemplo, para cenários com baixa degradação o padrão LTE definiu um Prefixo Cíclico Curto ou Normal de  $T_{N-CP} = 144 \cdot T_S = 144 \cdot 32,55ns = 4,7\mu s$  (cerca de 7,05% do período de símbolo útil,  $T_u = 66,67\mu s$ ) e para cenários com severa degradação utiliza-se o Prefixo Cíclico Longo ou Estendido de  $T_{N-CP} = 512 \cdot T_S = 512 \cdot 32,55ns = 16,67\mu s$  (cerca de 25% do período de símbolo útil). Da Tab. 4 para o perfil ETU observa-se um espalhamento de retardo máximo de  $5\mu s$ . Como o tempo de símbolo do LTE é igual a  $T_u = 66,7\mu s$  satisfaz a condição  $T_u \geq \tau_{máx}$ .



**Figura 4 - Formação do Prefixo Cíclico, ou Cyclic Prefix (CP).**



Na Tab. 5, embora a máxima frequência Doppler varie com a banda LTE utilizada, a conclusão de uma máxima frequência Doppler para um cenário urbano típico (ETU) de 300Hz representará apenas 2% (300Hz/15kHz) do espaçamento entre as subportadoras definidos para o LTE ( $\Delta f = 15\text{kHz}$ ). Deslocamentos de frequência de até 2% são desprezíveis e mesmo deslocamentos de 5 a 10% podem ser tolerados em muitas situações [34]. A frequência recebida por efeito Doppler, por exemplo, para passageiro viajando de trem em direção a estação rádio base, a uma velocidade máxima de 350km/h, o padrão LTE prevê esse tipo de mobilidade [33], utilizando o canal 2570MHz da Banda 7 do LTE (faixa de *downlink* = 2620MHz-2690MHz e de *uplink* = 2500MHz-2570MHz) será dada por:

$$f_r = f_c + \frac{v}{c} \cdot f_c \Rightarrow f_r = 2570 + \frac{(350\text{km/h} \div 3,6)}{3 \cdot 10^8 \text{m/s}} \cdot 2570 = 2570,000833\text{MHz},$$

ou seja, a máxima frequência por efeito Doppler será de apenas  $f_{D\text{máx}} = 833\text{Hz}$  ou 5,5% de  $\Delta f$  implicando em um tempo de coerência igual a  $T_c \approx 1,2\text{ms}$  atendendo à condição  $T_u = 66,67\mu\text{s} \ll T_c$ .

Esses resultados levam a conclusão que se a duração do símbolo útil ( $T_u$ ) for menor que o máximo atraso temporal ( $\tau_{\text{máx}}$ ) o sistema é altamente vulnerável a interferência entre símbolos. Caso contrário, se  $T_u$  for maior que o tempo de coerência do canal (dimensionado pela máxima frequência Doppler) o espaçamento entre subportadoras será menor que 15kHz tornando o sistema susceptível à interferência entre portadoras (*ICI, Inter Carrier Interference*).

Respeitando as condições do canal de comunicações, a transmissão OFDM apresenta-se como uma técnica promissora de elevada eficiência espectral e muito eficiente para mitigar os efeitos do desvanecimento em múltiplos percursos para comunicações sem fio de alta velocidade. Contudo, o problema de se ter “ $N$ ” osciladores de frequência para que ocorra a divisão da banda total do sinal em várias subportadoras estreitas e ortogonais tornou-se o principal desafio para sua implementação.

Os modernos sistemas OFDM superaram esse desafio usando avançadas técnicas de processamento computacional incorporando a IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*) na modulação para gerar o sinal no domínio do tempo e uma FFT (*Fast Fourier Transform*) na demodulação para transportar de volta o sinal para o domínio da frequência sem nenhuma perda de informação original [38].

Um bom exemplo para ilustrar a formação dos símbolos de um sistema de dados OFDM foi proposto por Langton [35]. A adaptação didática da Fig. 5 foi utilizada por Rochol [36], utilizando, nesse caso, todas portadoras moduladas em BPSK (1bit por símbolo, constelação = [1 -1]). Entretanto, é possível empregar um esquema de modulação diferenciado para cada subportadora transportar seus dados.

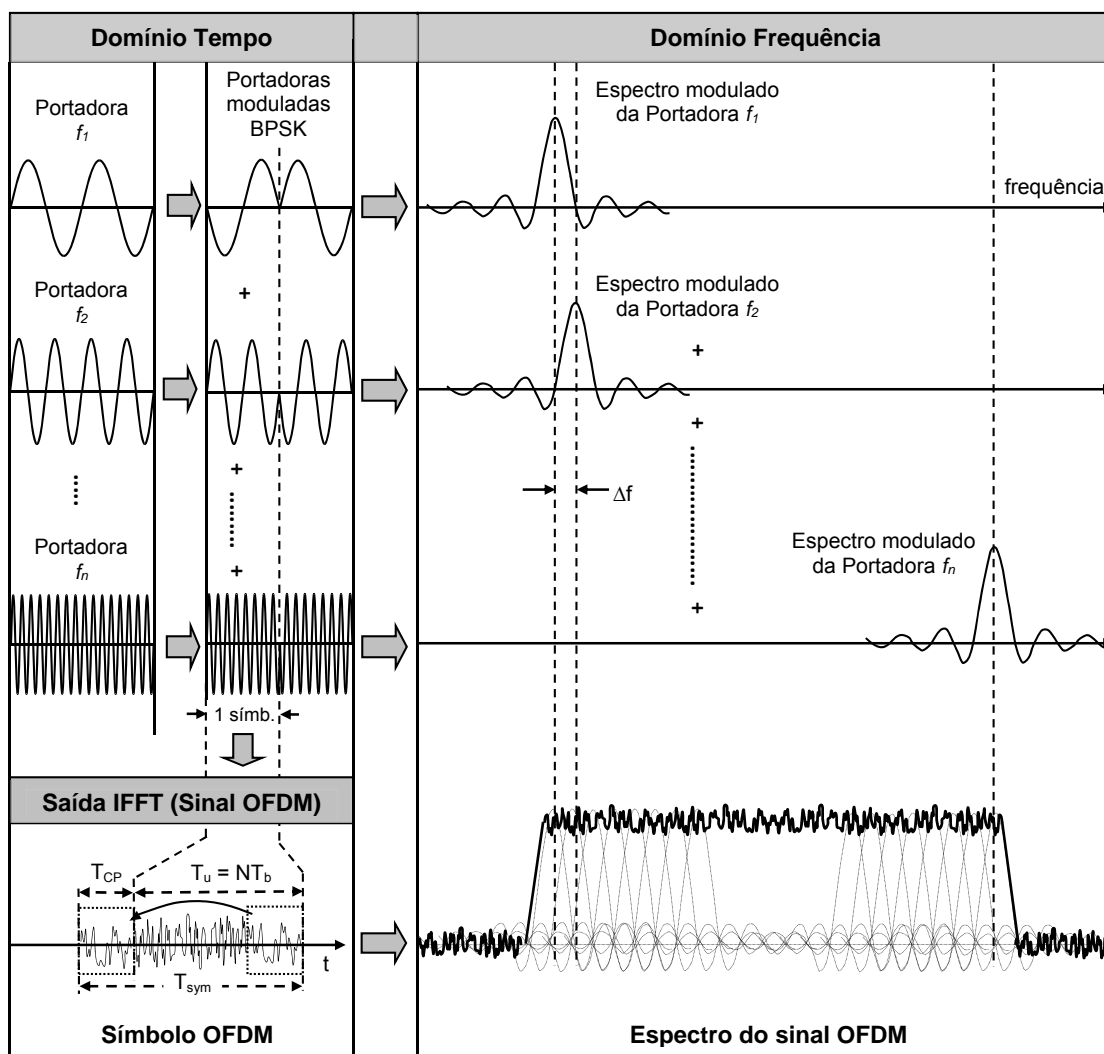


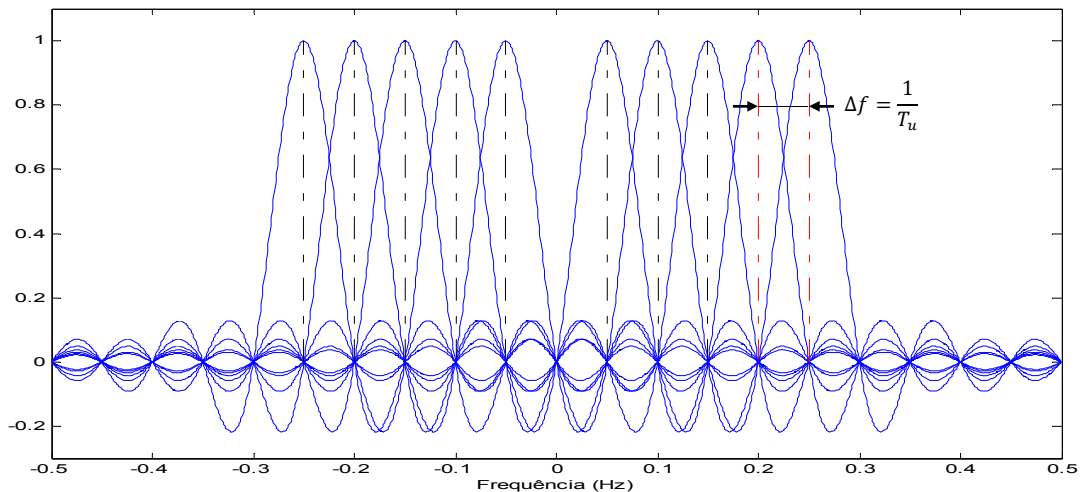
Figura 5 - Formação do símbolo OFDM com modulação BPSK, adaptado [36].

Matematicamente duas subportadoras serão consideradas ortogonais se a integral do seu produto ao longo de um período ( $0 \leq t \leq T_u$ ) é nula. As funções  $\Psi_k(t) = e^{j2\pi k\Delta f t}$  e  $\Psi_l(t) = e^{j2\pi l\Delta f t}$  são assim consideradas ortogonais se atenderem à relação [37]:

$$\int_0^{T_u=N \cdot T_b} \psi_k(t) \cdot \psi_l^*(t) \cdot dt = \int_0^{T_u} e^{j2\pi k\Delta f t} \cdot e^{-j2\pi l\Delta f t} \cdot dt = \int_0^{T_u} e^{j2\pi\Delta f (k-l)t} \cdot dt = \begin{cases} \neq 0, & k = l \\ = 0, & k \neq l \end{cases} \quad (1)$$

Portanto, as portadoras  $\Psi_k(t) = e^{j2\pi k\Delta f t}$  e  $\Psi_l(t) = e^{j2\pi l\Delta f t}$  serão ortogonais para  $k \neq l$ , pois o produto interno da equação (1) será igual à zero.

A Fig. 6 ilustra o espectro de frequências para 10 subportadoras ortogonais entre si com frequência de amostragem igual a 0,05Hz (a componente DC, frequência central, não é transmitida). O instante ideal de amostragem no receptor será o ponto onde uma subportadora em particular terá amplitude máxima e as outras passando pelo ponto de nulo espectral.



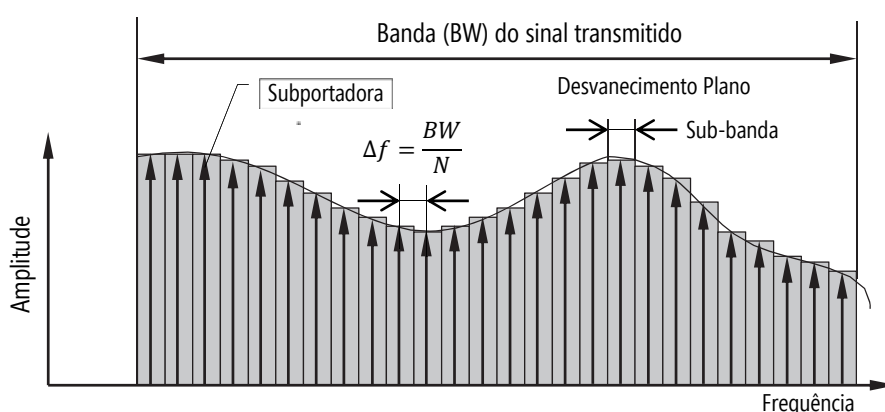
**Figura 6 - Espectro OFDM de frequências sobrepostas.**

### 2.3. A Técnica OFDM

A técnica OFDM no *downlink* além de apresentar alta eficiência espectral, devido à eliminação dos intervalos de guarda entre portadoras, possui como principal

vantagem a sua adaptabilidade contra as distorções ocasionadas pela seletividade em frequência do canal e interferências ao longo do caminho até o receptor. A ideia básica do OFDM é dividir a largura de banda total disponível (BW) em várias sub-bandas paralelas e ortogonais entre si, [38]. Com um número “ $N$ ” elevado de subportadoras, a banda ocupada por cada uma será menor que a banda de coerência do canal, logo, cada subportadoras sofrerá um desvanecimento plano ao invés de um desvanecimento seletivo em frequência ao longo de toda faixa [38].

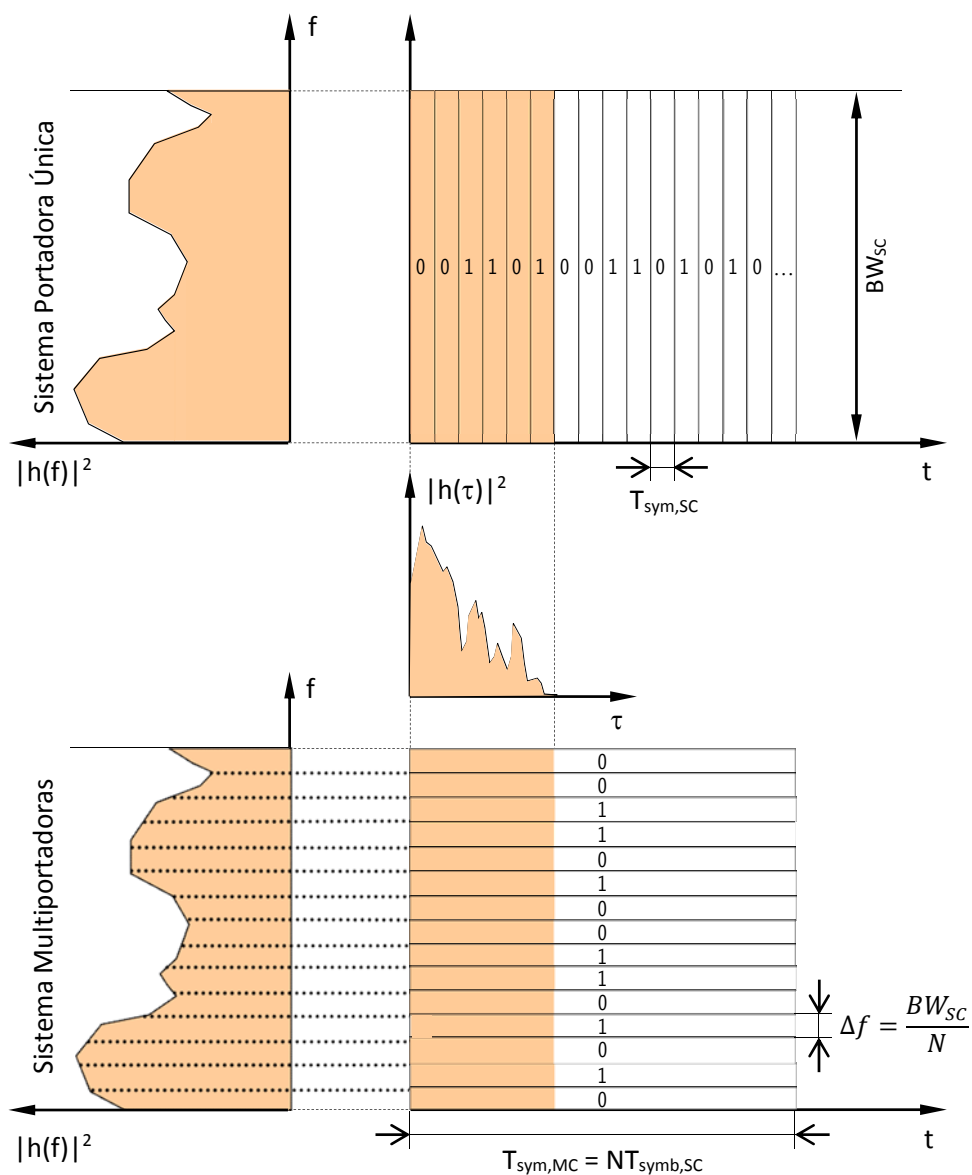
Devido à ortogonalidade, mesmo com a sobreposição, é possível recuperar os sinais individualmente sem a necessidade de utilizar filtros separados para cada portadora [39]. A ideia de usar subportadoras ortogonais foi sugerida a mais de 50 anos [40], [41] e [42], mas, na prática, não foi utilizada por um longo tempo principalmente devido à sua alta complexidade (sincronização dos osciladores, controle preciso da frequência das subportadoras e dificuldade de recuperação da subportadora sem interferência com o uso de filtros analógicos). Conforme ilustrado na Fig. 7, todas as subportadoras serão afetadas por um desvanecimento plano, mas a distorção introduzida não causará perda de informação na recepção, uma vez que a taxa de sinalização por subportadoras foi reduzida às frações da faixa total, o tempo de sinalização será muito maior que a duração do desvanecimento, proporcionando maior robustez ao sistema frente ao múltiplo percurso no canal.



**Figura 7 - Efeito do desvanecimento seletivo em um sistema MC, adaptado [38].**

A Fig. 8 apresenta a comparação entre um sistema portadora única (SC, *Single Carrier*) e um sistema de múltiplas portadoras (MC, *Multi-Carrier*). O canal de transmissão introduz retardos temporais ( $\tau$ ) devido ao múltiplo percurso. O

espalhamento desses retardos caracteriza o desvanecimento com alteração de amplitude e desvios de fase do sinal transmitido em suas diversas componentes de frequência. Caso essa alteração nas componentes frequenciais não seja constante, haverá distorção do sinal e o desvanecimento é dito como seletivo em frequência. Se ocorrer com uniformidade o desvanecimento é classificado como plano [31].



**Figura 8 - Comparação sistema SC e MC.**

No caso de uma transmissão por portadora única, em geral, a taxa serial de bits entregue ao canal de transmissão é elevada para assegurar a qualidade do serviço oferecido. Em consequência, o intervalo de símbolo é pequeno. Na presença de um

desvanecimento seletivo, além da redução da potência de recepção, todos os símbolos transmitidos serão afetados ocorrendo a sobreposição no tempo dos símbolos próximos, ocasionando erros em rajada na recepção. Uma solução para combater esses erros é a utilização de equalizadores no receptor. Mas ao se falar em altas ordens de Mbps o custo com equalizadores compactos e mais complexos torna-se um obstáculo para esse tipo de transmissão.

Mantendo-se a ortogonalidade entre as subportadoras e com a sobreposição de faixas por uma apropriada distância em frequências ( $\Delta f$ ), a economia espectral chega a ser 50% maior frente aos tradicionais sistemas FDM [38].

## 2.4. O Enlace de Downlink no LTE/LTE-Advanced

A tecnologia chave para o LTE fornecer taxas de picos de dados superiores a 300Mbps no Release 8 e 1Gbps no Release-10 (LTE-Advanced) no enlace de *downlink* está na adoção da técnica de múltiplo acesso OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), uma extensão do OFDM, que apresenta maior eficiência, menor latência e maior capacidade em relação a outros esquemas de multiplexação orientadas a pacote como o caso do padrão CSMA (*Carrier Sense Multiple Access*) do padrão IEEE 802.11a [43]. O OFDMA é uma extensão do OFDM utilizada em conjunto com o TDMA (*Time Division Multiple Access*) para aumentar a flexibilidade do sistema [44]. Isso significa que os usuários além de estarem distribuídos em subportadoras no domínio da frequência, vão estar também divididos no tempo, formando assim um quadro bidimensional frequência-tempo que pode ser utilizado para alocar dinamicamente qualquer usuário. Os usuários recebem um número específico de subportadoras por um período de tempo predeterminado. Além disso, a escolha da técnica OFDM para o *downlink*, como visto anteriormente, é devido ao seu alto grau de robustez ao desvanecimento seletivo em frequência.

O uso do OFDM com arranjos MIMO de até 8 antenas para transmissão e recepção elevam a eficiência espectral e a capacidade do sistema. Em conjunto com a operação Agregação de Portadoras é possível atingir picos de dados teóricos superiores a 4Gbps no LTE-Advanced conforme apresentado na Tab. 6 [4].

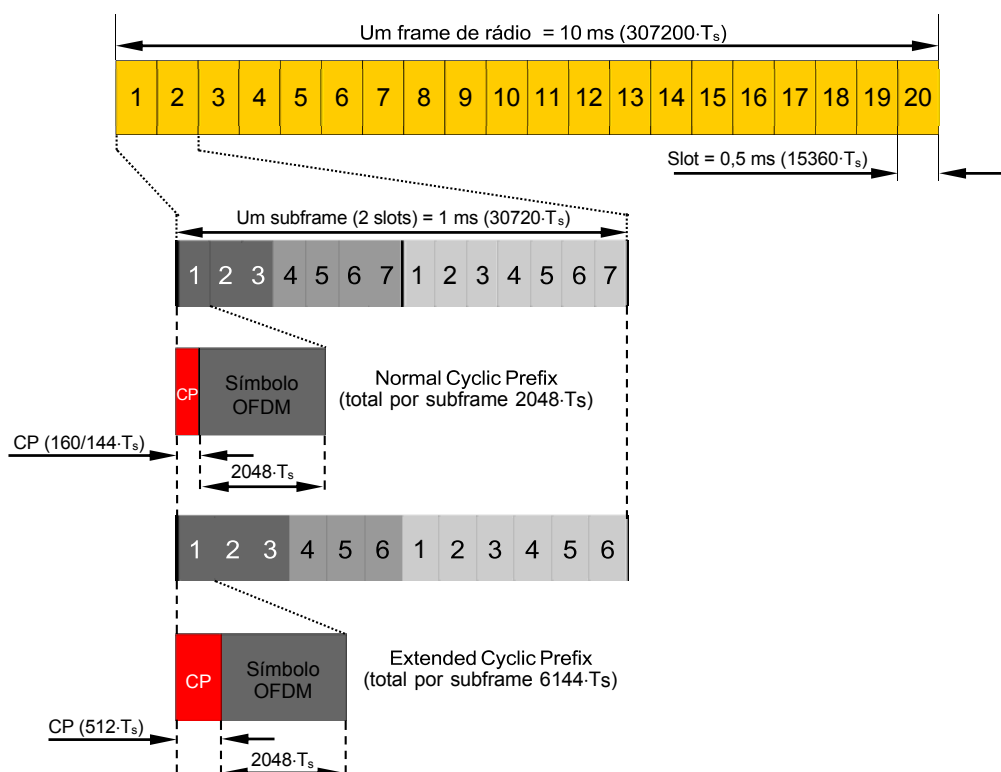
**Tabela 6 - Picos teóricos de dados para LTE-Advanced, [4].**

Taxas de pico em Mbps (sem considerar as perdas introduzidas pelos <i>overheads</i> da operação)				
Configuração	10 MHz	20 MHz	40 MHz	100 MHz
MIMO 2×2	100,8	201,6	403,2	1008
MIMO 4×4	201,6	403,2	806,4	2016
MIMO 8×8	403,2	806,4	1612,8	4032

Os valores teóricos da Tab. 6 são possíveis para condições muito específicas do canal, dependendo do número de antenas e de uma ampla largura de banda de transmissão. Na realidade, os valores reais dependem de uma série de fatores limitantes, tais como: as taxas de ruído e interferência na rede, o compartilhamento para único usuário presente na célula e a decorrelação entre as múltiplas antenas. A decorrelação entre os sinais refere-se à transmissão de canais independentes e ortogonais entre si que experimentam diferentes situações de multipercursos e desvanecimento, afetados de maneiras distintas pelo meio em que estão se propagando [45]. Por exemplo, um usuário na linha de visada da estação Rádio Base não poderá beneficiar da transmissão MIMO múltiplas camadas e, conseqüentemente, melhorar as suas taxas de dados, devido à quase inexistente de decorrelação entre os múltiplos caminhos de transmissão [45]. Já em ambientes altamente dispersivos, como centros urbanos, o sinal passa por diversos fenômenos de propagação (difusão, refração, difração e reflexão) tornando mais viável e usual a implementação de sistemas MIMO com canais decorrelacionados.

As transmissões em *downlink* e *uplink* no LTE estão organizadas segundo um quadro de rádio de 10ms de comprimento, o qual pode ser do tipo 1 utilizado pelo modo FDD (*Frequency Division Duplex*) e do tipo 2 aplicável ao modo TDD (*Time Division Duplex*) [46]. Essa Dissertação utilizará o tipo 1 como base para determinação das taxas de pico de dados máximas e demais parâmetros de desempenho encontrados no LTE-Advanced com interesse na ligação de *downlink*.

A estrutura de rádio no LTE apresentada na Fig. 9 é aplicável no modo FDD para ambas as transmissões de *downlink* e *uplink*, uma vez que estão separadas no domínio da frequência, embora podendo ocorrer simultaneamente no domínio do tempo.



**Figura 9** - Estrutura do Frame de rádio LTE do tipo 1 (FDD), adaptado de [46].

O quadro ou *frame* LTE tem uma duração de 10ms ou  $307200 \cdot T_s$ . O parâmetro  $T_s$  é conhecido como unidade de tempo básica que corresponde ao intervalo de amostragem em um sistema de Transformada Rápida de Fourier com 2048 baseado em um canal de 20MHz com espaçamento entre subportadoras de 15kHz ( $T_s = 1/(15\text{kHz} \cdot 2048) \approx 32,6\text{ns}$ ). Portanto, a duração do *frame*, *subframe*, *slot* e Prefixo Cíclico entre muitos outros parâmetros são definidos como múltiplos de  $T_s$ .

O *frame* LTE é então composto por 20 *slots* em que cada um tem a duração de 0,5ms ( $15360 \cdot T_s$ ), consistindo cada *slot* de um conjunto de 6 ou 7 símbolos OFDM dependendo da extensão do Prefixo Cíclico ou CP (*Cyclic Prefix*) utilizado [46][47]. A escolha por 6 ou 7 símbolos OFDM que corresponde, respectivamente, ao uso de um Prefixo Cíclico Estendido ou Normal, depende da área de cobertura e das condições do canal [46]. Além disso, o comprimento do Prefixo Cíclico aplicado em um símbolo dentro de um *slot* varia também dependendo do tipo de Prefixo em uso. Um *subframe* ou TTI (*Transmission Time Interval*) caracteriza-se por ser um conjunto de dois *slots* consecutivos com a duração de 1ms correspondendo ao mínimo intervalo



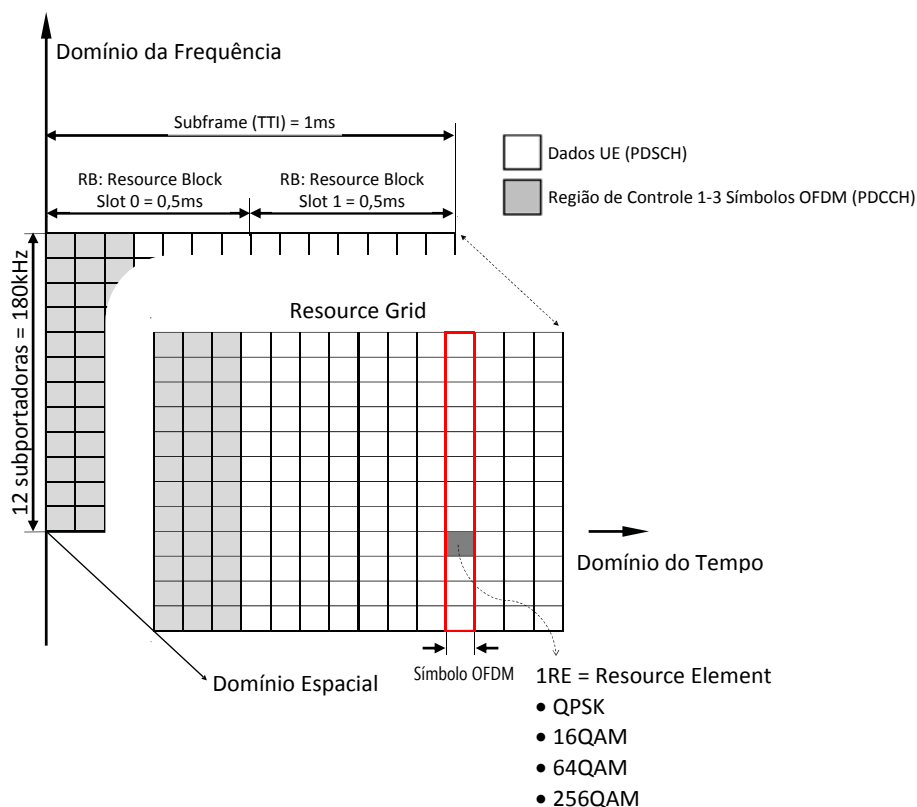
de agendamento dos recursos de rádio, 1ms menor em comparação com sistemas HSPA que utilizam intervalos de transmissão de 2ms [46].

Em condições normais de transmissão utiliza-se o *Normal-CP* onde o símbolo 0 em cada *slot* tem um CP igual a  $160 \cdot T_s = 5,2\mu s$ , enquanto os símbolos restantes no slot têm CPs ligeiramente mais curtos de apenas  $144 \cdot T_s = 4,7\mu s$ . Em células com grande radio de cobertura (de até 5km) poderá eventualmente ocorrer uma elevação na quantidade de interferência intersimbólica dada por uma maior dispersão temporal máxima do canal. Neste caso, é preferível a utilização do *Extended-CP* como prevenção da ISI (*Intersymbol Interference*), prefixando todos os símbolos OFDM com um CP de  $512 \cdot T_s = 6,7\mu s$ .

O OFDMA permite que diversos usuários não só compartilhem a largura de banda disponível no domínio da frequência, mas também ao longo do tempo. Essa técnica é bastante flexível, permitindo configurações escalares para diferentes alocações de banda, taxa de codificação e esquemas de modulação por usuário, bem como por recurso de rádio. O benefício de se utilizar múltiplas portadoras, além dos já mencionados anteriormente, como a robustez aos múltiplos percursos do canal de transmissão, a redução da complexidade de estimação e equalização do canal, está na possibilidade de organizar os recursos de rádio em uma grade de tempo e frequência, conforme a Fig. 10, provendo maior flexibilidade aos algoritmos de controle do enlace e de alocação de recursos.

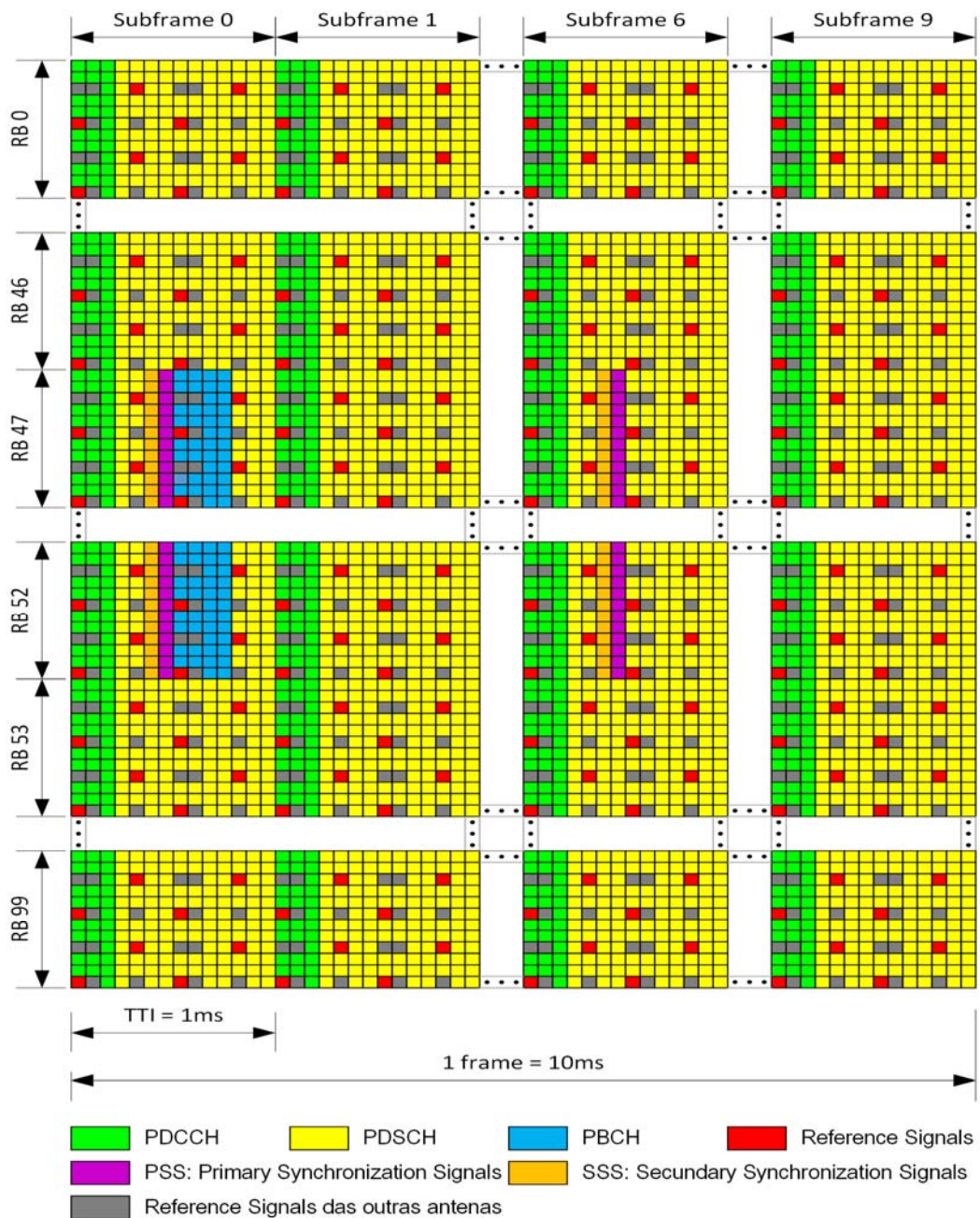
Para cada usuário a eNB atribui um recurso específico no tempo e na frequência referido como bloco de recursos (*Resource Blocks, RBs*) constituído de 12 subportadoras no domínio da frequência separadas de 15kHz em um slot de tempo de 0,5ms com 7 ou 6 símbolos OFDM dependendo do tipo de CP utilizado, Normal ou Estendido, respectivamente. No sistema LTE os RBs são alocados sempre aos pares formando assim o bloco de escalonamento ou *Scheduling Block (SB)*, transmitidos no período mínimo de alocação de capacidade possível, ou seja, em um TTI de 1 ms. Além disso, a soma de todos os RBs em um único período de slot é conhecida como grade de recurso ou *Resource Grid*.

A Fig. 10 ilustra o quadro bidimensional em DL do LTE para uma configuração Normal-CP (7 símbolos OFDM por slot de 0,5ms) para um modo de transmissão MIMO 2x2.



**Figura 10** - Grade de Recursos da camada física do LTE para downlink.

A unidade de alocação de capacidade teórica mínima é o elemento de recurso (*Resource Element, RE*), que consiste de uma subportadora e símbolo OFDM. Dentro de cada *Resource Grid* nem todos os REs são utilizados para transmitir dados de usuários. Os REs que irão transportar sinais de referência (*Reference Signal, RS*), presentes em toda a largura de banda no DL, responsáveis pela detecção das subportadoras pelos dispositivos móveis, diferenciação das estações bases e estimação da qualidade do canal, são atribuídos em primeiro lugar. Os demais elementos restantes são então dispostos para transmitir os dados dos usuários (canais *PDSCH, Physical Downlink Shared Channel*), sinalização de controle para a demodulação do canal de dados compartilhado de downlink (*PDCCH, Physical Downlink Control Channel*), canais de *broadcast (PBCH, Physical Broadcast Channel)* e canais de sincronismo (*PSS e SSS*) utilizados pela célula para procura e sincronização do UE na rede, Fig. 11.



**Figura 11** - Camada física do downlink, FDD, banda de 20MHz (100RBs), [48].

Em termos de transferência de dados, um RE é equivalente a um símbolo de modulação em uma subportadora. Portanto, se a modulação QPSK for empregada, um elemento de recurso será igual a 2 bits, com 16QAM=4 bits, 64QAM=6 bits e 256QAM=8 bits de dados transferidos. Se a técnica do uso de múltiplas antenas for utilizada na ligação de *downlink*, serão criadas grades de recursos paralelas mapeadas para cada fluxo de dados transmitidos. Quanto maior o número de RBs um usuário

obtem, e quanto maior a ordem de modulação usada nos elementos de recurso, maior será a taxa de bits transmitida ao UE.

A quantidade de RBs para as diferentes larguras de banda no LTE e demais características da camada física estão representados na Tab. 7. A diferença entre a banda total e a banda ocupada é preenchida pelas bandas de guarda com a finalidade de reduzir interferências com as bandas adjacentes. O tamanho do k-ésimo Prefixo Cíclico é variável segundo os modos de operação Normal ou Estendido.

**Tabela 7 - Parâmetros do quadro de rádio da camada física do LTE/LTE-A, [46].**

Banda total (MHz)	1,4	3	5	10	15	20
Banda efetiva (MHz)	1,08	2,7	4,5	9	13,5	18
Banda de guarda (MHz)	2×0,16	2×0,15	2×0,25	2×0,5	2×0,75	2×1,00
Eficiência espectral (%)	77%	90%	90%	90%	90%	90%
Tempo frame	10ms					
Tempo subframe	1ms					
Tempo slot	0,5ms					
Separação entre subportadoras ( $\Delta f$ )	15kHz					
Frequência de amostragem (MHz)	1,92	3,84	7,68	15,36	23,04	30,72
Qtde. pontos da FFT e IFFT	128	256	512	1024	1536	2048
Período do símbolo OFDM	66,67 $\mu$ s [1/ $\Delta f$ ] + CP					
Número de <i>Resources Blocks</i>	6	15	25	50	75	100
Típico número de subportadoras	72+1	180+1	300+1	600+1	900+1	1200+1
$T_s$ : unidade básica de tempo	32,6ns					
Símbolos OFDM por slot	CP Normal	7				
	CP Estendido	6				
Quantidade de amostras CP, onde A representa a posição no slot	CP Normal	160 $T_s$ [k=0] + 144 $T_s$ [k=1-6]				
	CP Estendido	512 $T_s$ [k=0-5]				
Duração do CP, onde A representa a posição no slot	CP Normal	5,21 $\mu$ s [k=0] + 4,69 $\mu$ s [k=1-6]				
	CP Estendido	16,67 $\mu$ s [k=0-5]				

Atualmente, o LTE emprega um espaçamento fixo entre as subportadoras de 15 kHz. Contudo, existe também uma opção de separação de 7,5 kHz. O número de pontos da FFT/IFFT é dado por  $N = \{128,256,512,1024,1024,2048\}$  para as respectivas larguras de banda. É importante observar que a escolha desses valores reflete diretamente na frequência de amostragem dada por  $f_s = N \cdot \Delta f = \{1,92; 3,84; 7,68; 15,36; 23,04; 30,72\}$  MHz com a preocupação de manter as questões de compatibilidade com os atuais sistemas UMTS onde a frequência de amostragem é de

3,84Mchips/s facilitando a implementação nos terminais que suportam múltiplas bandas de frequências com um único oscilador [46]. Por último, para fornecer definições de sincronização consistentes e exatas, diferentes intervalos de tempo dentro da especificação de acesso de rádio LTE podem ser expressos como múltiplos de uma unidade de tempo básica ( $T_s = 32,6\text{ns}$ ).

## 2.5. Modulação e Codificação Adaptativa (AMC)

Além da distribuição dinâmica de recursos entre os usuários com base na qualidade do canal e gestão de tráfego de acordo com a qualidade de serviço (*Quality of Service, QoS*) requerida, o LTE/LTE-A faz uso ainda de técnicas agressivas para melhorar a eficiência no tempo e na frequência da sua interface de rádio. A técnica de Modulação e Codificação Adaptativa (*Adaptive Modulation and Coding, AMC*) adapta o esquema de Modulação e Codificação (*Modulation and Coding Scheme, MCS*) de acordo com as características do canal percebidas pelo UE. A AMC foi amplamente adotada por muitos sistemas ou padrões de comunicação sem fio, como o LTE, IEEE 802.16 e IEEE 802.11n [2][3].

Os dois principais fatores de degradação das comunicações sem fio são o desvanecimento seletivo de frequências e a variação temporal devido a transmissão por multipercursos, os quais implicam em valores instáveis da BER no receptor. A estabilização da BER é conseguida por meio da modificação das formas de onda do sinal transmitido, em termos de ajustar um particular MCS que resista às possíveis deteriorações instantâneas do canal experimentadas por cada usuário atribuídos em suas respectivas frequências e tempos agendados [49].

Para mitigar esses efeitos, o uso da AMC permite selecionar uma combinação de esquemas de modulação e codificação adequados para transmissão com base na qualidade do canal e nas condições de rádio para fornecer ao usuário as melhores taxas de dados. Dessa forma, elevadas taxas serão fornecidas apenas para altos valores de SNR, alcançadas com constelações de alta ordem (16, 64 ou 256QAM). Em contrapartida, menores taxas serão obtidas para baixos valores de SNR, onde são empregadas constelações pequenas, como por exemplo QPSK, mais robustas e podem tolerar altos níveis de interferência. Esse recurso de adaptação das taxas de transmissão

proporciona uma utilização máxima do canal, garantindo simultaneamente eficiência e confiabilidade na transmissão.

No que diz respeito à taxa de codificação, para uma determinada modulação, essa pode ser escolhida dependendo das condições do canal, sendo de se esperar que uma elevada SNR traduz-se em uma taxa de codificação mais próxima de 1. Por exemplo, 256QAM com taxa de codificação 0,5 significa que esta modulação tem 50% de eficiência, isto é, pode transportar 4 bits de informação e o resto dos 4 bits para redundância contra possíveis erros de transmissão. No enlace de *downlink* a rádio base (*eNodeB*, *eNB*) seleciona o esquema de modulação e a taxa de codificação suportados pelo dispositivo móvel (*User Equipment*, *UE*) dependendo de uma previsão das condições do canal. No sentido reverso, para realizar a operação AMC, a condição do canal é alimentada pelos UE e ajustado pela rede usando indicadores de qualidade do canal ou CQI (*Channel Quality Indicator*) transmitido pelo canal de *uplink*.

O UE reporta ao eNB o valor CQI correspondente ao MCS que garanta uma taxa de erro por bloco de bits transportados (*Block Error Rate*, *BLER*) de até 10% com base na qualidade do sinal recebido e as características de hardware do receptor [50]. Em resposta ao *feedback* do CQI, a eNB pode selecionar entre os esquemas QPSK, 16QAM, 64QAM ou 256QAM com uma ampla faixa de taxas de códigos na atribuição de RBs que serão fornecidos ao UE. O valor do MCS determina a eficiência da transmissão de rádio, em termos do número de bits por símbolo modulado.

O LTE-A suporta várias combinações de MCS representadas pelo CQI. Dentro do limiar permitido pelo BLER, cada valor de CQI corresponde a um índice específico de MCS de acordo com a SNR estimada do subcanal considerado. Na eNB a transmissão de dados para o UE permanece constante até que o BLER alvo (típico 10% de erro sobre os pacotes recebidos) seja atingido. Para isso, durante o processo de alocação de recursos, a eNB pode alterar o MCS constantemente independentemente se a condição do canal for boa ou ruim para cada fluxo agendado, tentando minimizar a perda de pacotes por erros de transmissão e maximizar a taxa de transferência no canal [51]. Finalmente, o CQI informado corresponde ao índice do MCS é selecionado.

A Tab. 8 apresenta a relação entre diferentes valores SNR e CQI e suas respectivas taxas de modulação e codificação suportados pelos padrões 3GPP a partir

do Rel-8, incluindo a nova ordem de modulação 256QAM para *downlink* [50][52]. O UE reportará o índice CQI mais alto entre 1 e 15, ou um índice igual 0 se a taxa BLER exceder 10%. Sem perda de generalidade, os índices de CQI representam um valor de SNR quantizado fundamental para que o sistema explore a variação do canal no processo da AMC.

**Tabela 8 - Mapeamento CQI, MCS e SNR, [50][52].**

CQI	Releases 8-11				Release-12 em diante			
	MCS		Eficiência [bps/Hz]	SNR [dB]	MCS		Eficiência [bps/Hz]	SNR [dB]
	Modulação	Taxa de Codificação (x1024)			Modulação	Taxa de Codificação (x1024)		
1	QPSK	78	0,1523	-7,000	QPSK	78	0,1523	-1,324
2		120	0,2344	-5,108		193	0,3770	0,568
3		193	0,377	-3,216		449	0,8770	2,460
4		308	0,601	-1,324	16QAM	378	1,4766	4,352
5		449	0,877	0,568		490	1,9141	6,244
6		602	1,1758	2,460		616	2,4063	8,136
7	16QAM	378	1,4766	4,352	64QAM	466	2,7305	10,028
8		490	1,9141	6,244		567	3,3223	11,920
9		616	2,4063	8,136		666	3,9023	13,812
10	64QAM	466	2,7305	10,028		772	4,5234	15,704
11		567	3,3223	11,920		873	5,1152	17,596
12		666	3,9023	13,812		711	5,5547	19,488
13		772	4,5234	15,704	256QAM (HOM)	797	6,2237	21,380
14		873	5,1152	17,596		885	6,9153	23,272
15		948	5,5547	19,488		948	7,4063	25,164

O princípio da tabela proposta em [52] assume o passo aproximado para os valores de SNR igual a 1,892dB aplicado sob 10% da BLER e canal AWGN. Valores elevados de CQI representam pedidos de modulação e taxas de codificação mais elevadas. Uma maior taxa de codificação implica em menos bits de redundância, ou seja, menos sobrecarga para proteção dos dados, portanto, maior eficiência no processo de decodificação. Enquanto que valores baixos de CQI indicam uma baixa qualidade do canal.

A partir do Release-12 do 3GPP são definidas ordens de modulação e codificação mais elevadas. Considerando que a eficiência máxima suportada pela tabela atual de CQIs é 5,5547 para uma modulação 64QAM, a eficiência espectral máxima com 256QAM passa a ser  $5,5547 \times 8/6 = 7,4063$ . Com isso, índices de MCS mais elevados para o *downlink* [52] podem ser escolhidos dependendo das condições

do canal de RF. Da lista de 28 possíveis índices MCS, nas melhores condições do canal, os dados são transmitidos a 256QAM com MCS 27 e na pior, com modulação QPSK indicando um MCS igual a zero.

Existem outros dois parâmetros de *feedback*, além do CQI, enviados pelo dispositivo móvel que constituem o *Channel State Information* (CSI): o *Rank Indicator* (RI) e o *Precoder Matrix Indicator* (PMI), ambos utilizados na operação MIMO informando a multiplexação espacial (número de antenas usadas para transmitir) e qual esquema de codificação espacial suportados pelo UE [53].

## 2.6. Escalonamento de Tráfego no LTE

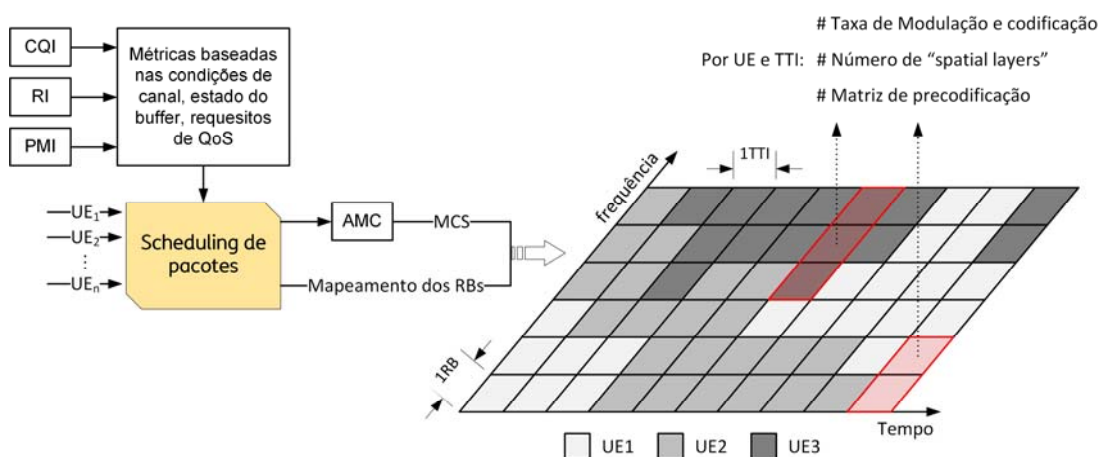
Os algoritmos de agendamento de tráfego (*traffic scheduling*) localizados na camada MAC (*Media Access Control*) da eNB são essenciais à atividade de alocação dinâmica dos recursos de rádio RBs, selecionando adequadamente o índice de MCS para as transmissões de cada UE realizadas a cada intervalo de transmissão (TTI = 1ms). A função principal do *traffic scheduling* é selecionar diferentes usuários no domínio do tempo e atribuir diferentes RBs no domínio da frequência [54].

O 3GPP não especifica o tipo de algoritmo de escalonamento ou a política de gestão dos recursos, deixando a critério dos fabricantes o desenvolvimento de procedimentos inovadores que determinem qual a operação mais eficiente de distribuir a largura de banda entre os usuários. Como diretrizes para um bom algoritmo ou *scheduler* da eNB este deve considerar as condições do canal de rádio, a qualidade de serviço (QoS), a mobilidade, a capacidade do terminal e os requisitos de largura de banda para escolher um adequado usuário, garantindo simultaneidade, estabilidade e certa equidade para os UE em termos de oportunidade de transmissão [55] e [56]. Uma comparação entre os principais tipos de *scheduling* com base nos critérios de complexidade computacional, *throughput*, latência, *jitter* e justiça na distribuição de recursos pode ser encontrada em [56].

Devido às interferências construtiva e destrutiva no múltiplo percurso, a capacidade do canal muda aleatoriamente ao longo do tempo. Consequentemente um eficiente algoritmo de *scheduling* explora as variações de tempo-frequência atribuindo RBs de acordo com as condições de canal referente a cada usuário. Um exemplo de



como a predição do canal informada via relatórios do CSI, com diferentes requisitos de QoS, é usada para gerenciar a alocação de recursos entre os usuários no enlace de *downlink* está apresentado na Fig. 12.



**Figura 12** - Exemplo de alocação de recursos pelo scheduling do eNB.

Na atribuição de recursos da Fig. 12 a cada TTI o *scheduling* aloca os RBs disponível entre os usuários considerando, por exemplo, as condições de canal de cada UE, volume de tráfego, estado do *buffer*, requisitos de QoS dos fluxos, etc. Em certos períodos de tempo, algumas faixas de frequência reportadas pelo CQI definem níveis de SNR melhores para o usuário 1 que para o usuário 2. Logo, a eNB decide atribuir adequadamente os RBs, em função dessas condições, formatados de acordo com o MCS associado que possa garantir uma BLER inferior a 10%. Diferentes MCSs levam diretamente a diferentes taxas de transmissão. Na presença de aplicações em tempo real, os recursos podem ser forçados a um móvel em particular, apesar da qualidade do canal não estar no seu auge [55].

Na prática, tanto a modulação adaptativa quanto a codificação, bem como a frequência de operação do *scheduling*, dependem da informação do estado do canal. A adaptação no enlace de *downlink* é baseada principalmente no *feedback* de CQI dos usuários na célula, enquanto que no enlace de *uplink* a CSI (*Channel State Information*) é estimada com base nos sinais de referência transmitidos pelo UE. Além disso, o RI (*Rank Indicator*) e o PMI (*Precoder Matrix Indicator*) são relevantes para a operação MIMO apresentados a seguir.

# Capítulo 3. MIMO, Modos de Transmissão e Agregação de Portadoras

## 3.1. Canais MIMO

Os sistemas MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), usados inicialmente no Release-7 do HSDPA (*High-Speed Downlink Packet Access*) [57], formam uma parte essencial da rede LTE. O MIMO refere-se ao uso de múltiplas antenas no lado do transmissor (M) e do receptor (N), Fig. 13, que podem ser configuradas de diferentes maneiras para fornecer uma combinação de ganhos em *throughput*, cobertura e eficiência espectral, sem custo adicional de tempo, largura de banda adicional tão pouco com despesas de potência de transmissão [50]. Nesse aspecto, o Massivo MIMO (MaMi) é considerado uma potencial tecnologia candidata a ser aplicada em sistemas móveis de Quinta Geração [58].

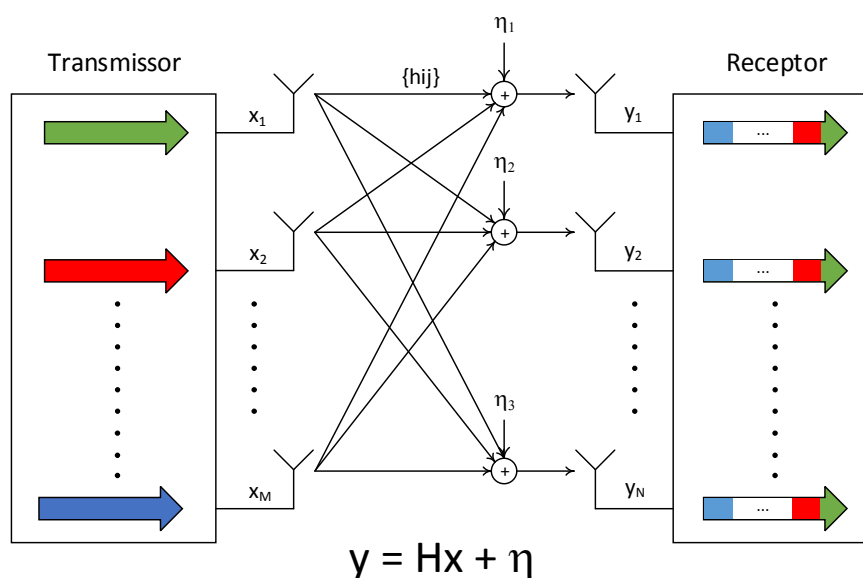


Figura 13 - Sistema de arranjo de antenas MIMO  $M \times N$ .

Na Fig. 13 cada antena receptora pode receber os fluxos de dados de todas as antenas de transmissão. A relação de transmissão é representada pela Matriz de Transmissão do Canal – H. Os coeficientes  $h_{ij} = \alpha + j\beta = |h_{ij}| \cdot e^{-j\phi_{ij}}$ , onde  $\alpha$  e  $\beta$  são

variáveis aleatórias independentes de distribuição normal e  $|h_{ij}|$  corresponde ao módulo do ganho de desvanecimento do canal entre a  $j$ -ésima antena de transmissão e a  $i$ -ésima antena de recepção, descrevendo todos os caminhos possíveis entre os lados do transmissor e do receptor. Portanto, o canal será descrito como uma matriz de ganhos complexos  $H$  de dimensões  $N \times M$  antenas [59] [60]:

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & \dots & h_{1M} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & \dots & h_{2M} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} & \dots & h_{3M} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{N1} & h_{N2} & h_{N3} & \dots & h_{NM} \end{bmatrix}_{N \times M} \quad (31)$$

A relação entre o sinal transmitido e o sinal recebido pode ser escrita como:

$$y = Hx + \eta, \quad (32)$$

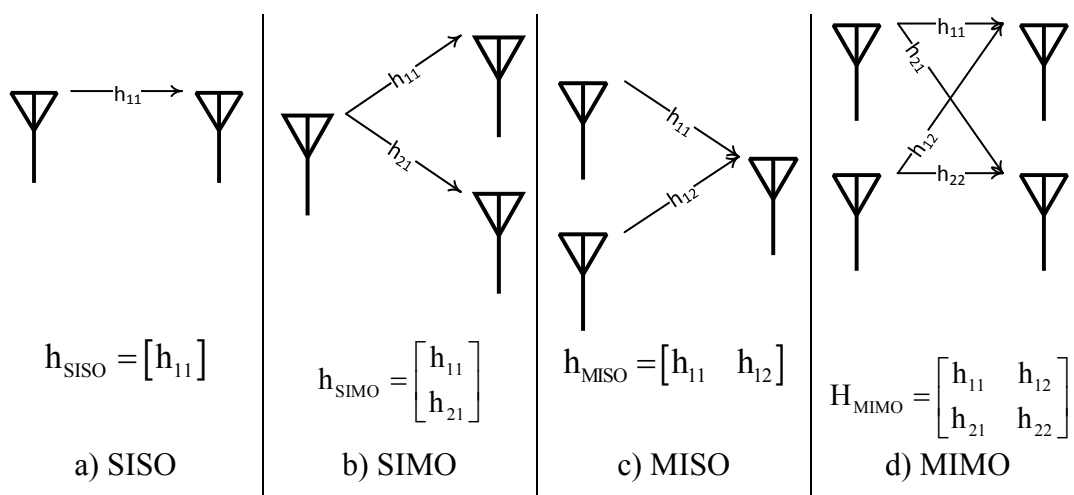
sendo:  $y = [y_1, y_2, \dots, y_N]^t$  o vetor de símbolos recebido,  $x = [x_1, x_2, \dots, x_M]^t$  o vetor de símbolos transmitidos,  $H$  a matriz de ganho do canal de transmissão com dimensão  $N \times M$  e  $\eta = [\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_M]^t$  o respectivo ruído composto de variáveis aleatórias gaussianas independentes, média zero e variância  $\sigma^2$  [59].

Em uma configuração de antena  $M \times N$ , a capacidade de melhoria da eficiência espectral, está sujeita ao número de fluxos paralelos de dados (*streams*) ou camadas espaciais de transmissão (*spatial transmission layers*) que são formadas no canal MIMO. Conceitualmente, uma camada de transmissão corresponde a um canal espacialmente multiplexado. Além disso, o aumento da taxa de transmissão é linearmente proporcional ao número mínimo de antenas de transmissão e recepção, limitada pelo grau (“*rank*”) da matriz  $H$ . O *rank* é a medida do número independente de camadas espaciais de transmissão formadas a partir da estimativa de propagação do canal [61] [62].

As camadas espaciais formam-se no ambiente de múltiplo percurso e a partir da dispersão do sinal entre transmissores e receptores. Por exemplo, na situação MIMO  $4 \times 2$  é possível atingir o dobro da taxa de dados na recepção, pois  $\min(4,2) = 2$  e *rank* = 2, uma vez que são formadas duas camadas espaciais. No caso de visada direta, o *rank* da matriz do canal é igual a 1. Portanto, mesmo com 4 antenas não será possível

aumentar a eficiência espectral do canal, [50]. Embora a condição de uso do MIMO seja menos provável nessa situação, a relação SNR é bastante elevada, resultando em altos valores de CQI com elevados índices de MCS.

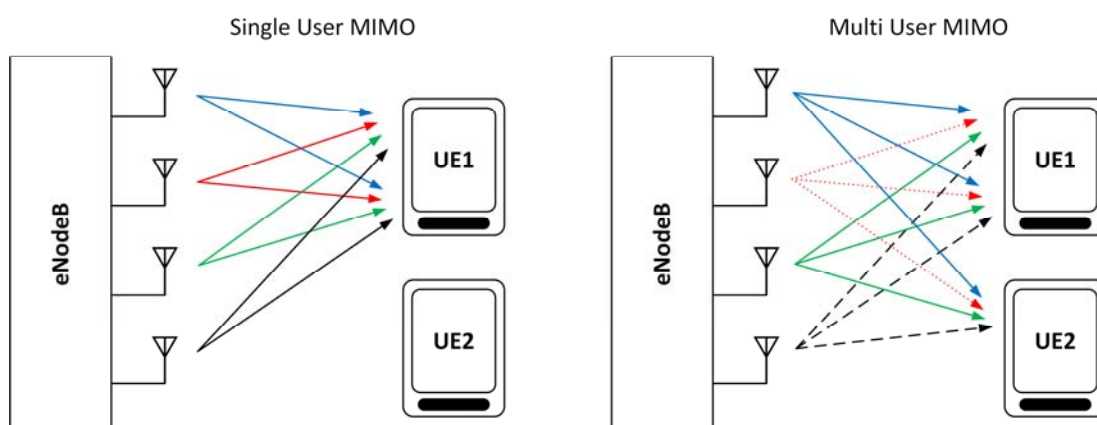
O caso especial em que  $M = N = 1$  é chamado de sistema *SISO* (*Single-Input, Single-Output*) de entrada e saída única. É o modo de acesso ao canal móvel mais básica, onde há apenas uma antena transmissora e uma antena receptora. Um segundo caso especial é aquele em que  $M = 1$  e  $N \geq 2$  é chamado de sistema, *SIMO* (*Single-Input, Multiple-Output*) de entrada única e saída múltipla. Utiliza uma antena na transmissão e duas ou mais na recepção. Esse modo de acesso é referido muitas vezes como diversidade de recepção, particularmente bem adaptado para canais com baixo SNR (borda da célula). Oferece uma melhor relação SNR, mas nenhuma alteração na taxa de dados, pois apenas um fluxo de dados é transmitido [63]. Finalmente, um terceiro caso especial é aquele em que  $N_T \geq 2$  e  $N_R = 1$ . Conhecido como sistema *MISO* (*Multiple-Input, Single-Output*) de entrada múltipla e saída única. O modo *MISO* é frequentemente referido como diversidade de transmissão. Esse modo de acesso aumenta a robustez do sinal contra o desvanecimento e pode aumentar o desempenho em condições de baixa relação SNR. Não há aumento das taxas de dados, mas o *MISO* oferta as mesmas taxas de dados usando menos potência de transmissão. Alguns exemplos de configuração desses arranjos estão ilustrados na Fig. 14.



**Figura 14 - Configuração de arranjo para sistemas MIMO.**

Em geral, com o aumento do número das antenas, a SNR necessária aumenta, assim como a complexidade entre o emissor e o receptor e a sobrecarga por *Reference Signals* que reduz ainda mais a eficiência da largura de banda. Contudo, a partir da perspectiva da camada física, o uso de antenas extras provê ganhos em diversidade e multiplexação trazendo melhorias significativas em *throughput* e eficiência energética irradiada, uma vez que é necessária uma menor potência de transmissão para fornecer maiores taxas de dados.

As técnicas MIMO são também classificadas em *Single User MIMO (SU-MIMO)* e *Multi User MIMO (MU-MIMO)*, Fig. 15. No SU-MIMO múltiplas fluxos de dados podem ser enviados para um único dispositivo por vez, empregando todos os elementos de antena disponíveis. No caso de MU-MIMO vários usuários são atendidos em paralelo no recurso de frequência. Enquanto o SU-MIMO aumenta a taxa de dados e a confiabilidade do enlace para um único UE, o MU-MIMO generaliza esses ganhos de multiplexação para vários usuários permitindo um aumento da capacidade total do sistema [64]. Embora a abordagem MU-MIMO ofereça maior flexibilidade de domínio espacial, permitindo que diferentes usuários sejam agendados em diferentes fluxos espaciais sobre o mesmo bloco de recursos (RB), nessa dissertação os resultados concentram-se no modo SU-MIMO 2x2.



**Figura 15** - Cenários SU-MIMO e UM-MIMO.

Entre as técnicas de MIMO disponíveis implementadas na transmissão de downlink estão a diversidade de transmissão, multiplexação espacial e processamento de feixe (beamforming).

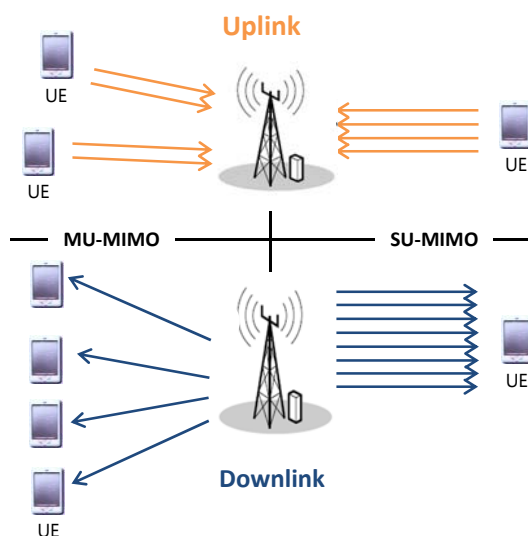
- **Diversidade de Transmissão (*Transmission Diversity, TxD*):** Explora a diversidade espacial proporcionada pelas múltiplas antenas para melhorar a robustez da transmissão contra o desvanecimento do múltiplo percurso, garantindo uma menor probabilidade de erros na recepção [58]. Cada antena de transmissão transmite essencialmente o mesmo fluxo de dados, de modo que o receptor recebe réplicas não correlacionadas do mesmo sinal, no tempo, na frequência ou espaço por diferentes percursos. Por se tratar de um modo de transmissão de camada única, não há aumento na taxa de dados. No entanto, maximiza a vantagem de diversidade em canais com desvanecimento.
- **Multiplexação espacial (*Spatial Multiplexing, SM*):** Permite a transmissão de diferentes fluxos de dados independentes simultaneamente nos mesmos RBs. Em outras palavras, o modo *SM* eleva a capacidade de transmissão, ou seja, um aumento da eficiência espectral, sem recorrer ao aumento da largura de banda ou potência de transmissão [59]. O débito binário máximo atingido por essa técnica é linearmente proporcional ao fator  $\min\{M,N\}$  [59].
- **Formatação de feixe (*beamforming*):** Este tipo de diversidade faz uso de múltiplas antenas na eNB, aumentando a cobertura da célula, para alterar o seu padrão de radiação de forma a concentrar a energia em uma ou mais direções maximizando o seu ganho na direção do UE. Isso também permite que vários usuários localizados em diferentes direções sejam atendidos simultaneamente. O *beamforming* funciona melhor se as antenas estiverem perto umas das outras, com distâncias da ordem do comprimento de onda, e se os sinais forem correlacionados ao contrário da diversidade e multiplexação espacial [56].

### 3.2. Modos de Transmissão para LTE-A

Com base na introdução da técnica MIMO, foram criados diferentes modos de transmissão (*Transmission Modes, TMs*) a serem aplicados entre a eNB e o UE tanto para *downlink* como para *uplink*. Estes esquemas foram concebidos para maximizar o desempenho do enlace de rádio em diferentes condições do canal com diferentes arranjos de antenas, levando em consideração as diferentes capacidades dos UEs e os padrões de mobilidade. O eNB determina o TM específico na ligação e pode

dinamicamente alternar entre diferentes TMs de forma adaptativa baseado na CSI fornecida por cada UE [50].

A configuração base de MIMO no Rel. 8 é  $2 \times 2$  para *downlink* e  $1 \times 2$  para *uplink*. O LTE-A Rel. 10 estende o suporte MIMO para um máximo de 8 camadas no *downlink* e, no *uplink* suportando até quatro fluxos de dados, Fig. 16. Como resultado, o rendimento máximo teórico de LTE-A torna-se 10 vezes maior do que LTE. No entanto, devido à restrição do espectro e do hardware, espera-se que a velocidade nominal no LTE-A atinja a barreira dos 337,5Mbps usando CA combinando 15MHz (B3) + 20MHz (B7) + 10MHz (B28) com MIMO  $2 \times 2$ . Além disso, é introduzido pela primeira vez o TM 9 para uso na configuração espacial SU-MIMO e MU-MIMO. Os esquemas de transmissão SU-MIMO dedicam todas as camadas espaciais a um único usuário, enquanto os esquemas MU-MIMO permite a transmissão para vários usuários simultaneamente no mesmo elemento de recurso [54].



**Figura 16** - A nova configuração MIMO ou Enhanced-MIMO no LTE-A.

São definidos nove modos de transmissão MIMO a serem aplicados entre o eNB e o UE no LTE-A [50]. O LTE-A a partir do Release 11 suporta 10 TMs. Esses modos estão representados resumidamente a seguir na Tab. 9 e aplicados sobre o canal *PDSCH*, responsável pelo transporte de dados dos usuários. O conjunto completo de esquemas de transmissão são detalhados em [50].

**Tabela 9 - Modos de Transmissão suportados pelo PDSCH, [50].**

Rel.	TM	Descrição	#Nº Ant.	SU/MU MIMO	Feedback UL		
					C Q I	R I	P M I
8-13	1	<i>Single Antenna Transmission</i>	1	SU	✓	-	-
8-13	2	<i>Open Loop Transmit Diversity</i>	2,4	SU	✓	-	-
8-13	3	<i>Open Loop Spatial Multiplexing</i>	2,4	SU	✓	✓	-
8-13	4	<i>Closed Loop Spatial Multiplexing</i>	2,4	SU	✓	✓	✓
8-13	5	<i>Multi-User MIMO</i>	2,4	MU	✓	-	✓
8-13	6	<i>Closed Loop Transmit Diversity</i>	2,4	SU	✓	-	✓
8-13	7	<i>Beamforming (Single-antenna)</i>	1,2,4	SU	✓	-	-
9-13	8	<i>Dual Layer Beamforming</i>	2,4	SU/MU	✓	Configurável	
9-13	9	<i>Up to 8 Layer Spatial Multiplexing</i>	2,4,8	SU/MU	✓	Configurável	
9-13	10	<i>Closed Loop SU/UM-MIMO</i>	2,4,8	SU/MU	✓	Configurável	

Apenas os modos SU-MIMO com TM-1 e TM-3 serão apresentados nessa Dissertação para cálculo das taxas de dados no cenário de Agregação de Portadoras do LTE-Advanced pelo fato da sua simplicidade, implantação e recursos disponíveis. O TM-3 é considerado um dos principais modos de MIMO utilizado nas redes LTE\LTE-A. De fato, dos 10 TMs lançados, os quatro primeiros são os mais aplicados nas atuais redes comerciais [65].

O TM-1 [1 *codeword* (CW), 1 camada, 1 antena de Tx] é o modo mais simples que pode ser implantado e representa transmissões SISO, quando apenas uma antena é usada tanto na eNB como no UE. Se o UE implementar várias antenas, o SIMO é usado. Neste caso TM-1 pode utilizar a diversidade no receptor, obtendo um melhor desempenho da BER. Portanto, nesse esquema de transmissão, o móvel pode usar um número arbitrário de antenas para receber o fluxo de dados, mas com uma única antena de Tx na eNB, não sendo possível nenhuma transmissão na condição de multiplexação espacial, ou seja, não há ganhos em *throughput* para esse TM.

O TM-2 [TxD: SU-MIMO, 1 *codeword* (CW), 2-8 camadas, 2-8 antenas, número de camadas igual ao número de antenas] é uma técnica de multiplexação espacial baseada na transmissão da mesma informação em diferentes camadas através de diferentes antenas. Assim, várias camadas podem ser combinadas no receptor para compensar alguns padrões de desvanecimento, obtendo melhores níveis de SNR



reduzindo a probabilidade de erros na recuperação da mensagem. Portanto, o TxD foi projetado para aumentar a robustez em condições de baixa SNR, como na borda celular ou em cenários de severo desvanecimento. Este é o modo padrão em LTE para todos os canais, incluindo os canais de controle e *broadcast* [66].

Os modos TM-3 e TM-4 são classificados sob o ponto de vista do CSI como: OLSM (*Open-Loop Spatial Multiplexing*) e CLSM (*Closed-Loop Spatial Multiplexing*) [50]. Empregam de duas a oito antenas no *downlink*, suportando até 8 *layers* com *rank* igual a 2 ou 8. Do lado do receptor ao menos 2 antenas de recepção são necessárias. Assim, é possível os modos de configuração MIMO 2×2, 4×2, 4×4 ou até mesmo 8×8.

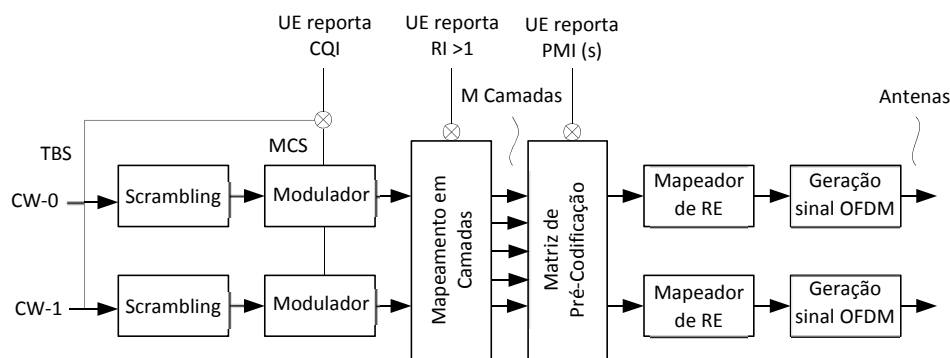
No modo TM-3 [OLSM: SU-MIMO, 2 *codewords* (CWs), 2-8 camadas, 2-8 antenas, número de camadas igual ou inferior ao número de antenas] os símbolos OFDM são transmitidos em sinais codificados independentes e separados, chamados fluxos (*streams*), de cada uma das múltiplas antenas de transmissão. Neste modo, dois *streams* de dados (ou duas CWs) são multiplexadas para duas ou mais antenas (até 8 *layers* no LTE-Advanced). Portanto, a dimensão espacial é multiplexada ou reutilizada [66]. Não há qualquer *feedback* por parte do UE (realimentação por malha aberta, ou *Open-Loop*) à exceção do RI, que indica o número máximo de camadas espaciais de transmissão que o móvel pode receber no modo de multiplexação espacial [48], e do CQI que informam as condições do canal que esta transmissão irá ocorrer. Esse modo permite o aumento da capacidade uma vez que múltiplas *codewords* são transmitidas pelo processo de multiplexação espacial resultando em efeitos aditivos no receptor. Tipicamente utilizado quando a informação do canal está ausente, ou quando o canal muda rapidamente, como para o caso onde os UEs deslocam-se em alta velocidade. O sinal é fornecido a cada antena com um atraso específico denominado de diversidade de atraso cíclico ou CDD (*Cyclic Delay Diversity*), criando artificialmente a diversidade de frequência [66]. Por sua simplicidade de implantação, é considerado um dos principais esquemas MIMO em operação com maior rendimento das taxas de picos comparado à diversidade de transmissão do TM-2 [4].

Os modos de transmissão TM-2 e TM-3 são adequados em cenários em que o *feedback* em tempo oportuno do canal não pode ser disponibilizado ou não é confiável, por exemplo, em cenários de alta mobilidade [67]. Em resumo, esses dois modos

podem ser entendidos da seguinte maneira: enquanto o TxD tende a aumentar a capacidade da célula, pois fornece uma melhor SNR no limite celular, o OLSM tem como objetivo principal aumentar as taxas de transferência para os usuários [4].

O modo TM-4 [CLSM: SU-MIMO, 2 *codewords* (CWs), 2-8 camadas, 2-8 antenas, número de camadas igual ou inferior ao número de antenas] tem como objetivo maximizar a taxa de transferência realizável por um usuário em boas condições de SNR, da mesma forma que o TM-3. Ao contrário do OLSM, o CLSM transmite além das informações de RI e CQI a informação do Indicador de Matriz de Pré-Codificação (PMI, *Precoding Matrix Indicator*) que retorna ao eNB (malha fechada ou *Closed-Loop*) onde é aplicado a matriz de pré-codificação (*pre-coding*) e os sinais transmitidos pelas diferentes antenas são ponderados de acordo com os dados atuais estimados do canal, permitindo otimizar e maximizar a transmissão facilitando a demodulação dos símbolos recebidos.

A Fig. 17 ilustra o processo de geração do sinal de banda base que representa, por exemplo, um canal físico de DL como o PDSCH e descreve como o CSI reportado pelo UE é utilizado pelo eNB. Na ausência da PMI o TM-3 é selecionado e ambos os CWs compartilham os mesmos parâmetros de configuração.



**Figura 17** - Feedback do CSI fornecidas pelo UE, adaptado de [48].

O TM-4 é similar ao TM-3, com duas *codewords* multiplexadas por M antenas de transmissão, mas é capaz de adaptar-se às condições dos canais de rádio de forma mais eficiente, devido à seleção da sua PMI e um preciso CSI no transmissor para conhecimento prévio das condições do canal a transmitir [4].

Os benefícios dos modos TM-3 e TM-4 são principalmente alcançados quando a relação SNR é elevada. De acordo com [68], os benefícios dos esquemas de multiplexação espacial começam em aproximadamente SNR = 15dB ou superior, promovendo, dessa forma, confiabilidade do enlace e maiores capacidades de transmissão. Em uma situação em que o UE está próximo à borda da célula, o *Closed-Loop Rank 1* ou TxD são técnicas mais atraentes para escolher, pois possibilitam uma menor BER com menor perda de pacotes e retransmissões desnecessárias em ambientes com baixa SNR. Em um outro cenário, o TxD pode obter melhores resultados do que os modos OL-SM e CL-SM, por exemplo em ambiente rural, onde a dispersão (reflexão difusa) de sinal é baixa [48].

O desempenho dos sistemas MIMO está condicionado a vários fatores, como a qualidade do sinal, às condições instantâneas do canal de rádio, a velocidade do UE e a correlação dos sinais recebidos nas antenas receptoras. Assim, a preferência de um TM em relação aos outros visa maximizar o desempenho do esquema MIMO adequado para cada cenário. Uma análise comparativa sobre os modos de transmissão MIMO pode ser encontrada nas referências [43][62][66].

### 3.3. Capacidade e Eficiência Espectral em Redes LTE-A

No LTE-Advanced é possível alcançar uma eficiência espectral de 30bps/Hz no *downlink*, assim como mostrado na Tab. 10 [4]. Combinado com a possibilidade do uso de *CA* e *Enhanced-MIMO*, o LTE-A pode atingir e até mesmo superar os débitos binários com elevada eficiência espectral no canal rádio móvel especificado pelo IMT-Advanced.

**Tabela 10 - Eficiência Espectral LTE-Advanced, [4].**

	Banda de Transmissão	Eficiência Espectral UL	Eficiência Espectral DL
IMT Advanced (4G)	Mínimo de 40MHz	6,75 bps/Hz	15 bps/Hz
Release 10 (LTE-Advanced)	Até 100MHz	8,1 bps/Hz (MIMO 2x2) 16,1 bps/Hz (MIMO 4x4)	16 bps/Hz (MIMO 4x4) 30 bps/Hz (MIMO 8x8)
Release 8 (LTE)	Até 20MHz	4,75 bps/Hz (SIMO 1x2)	16 bps/Hz (MIMO 4x4)

Uma consideração muito importante para análise da capacidade de sistemas de transmissão está relacionada à Lei ou Limite de Shannon [69], que prevê a taxa máxima teórica de transferência de informações de um canal, com um determinado nível de ruído. Esse limite corresponde ao máximo de informação transmitida a um receptor na presença de um ruído aditivo branco gaussiano (*AWGN, Additive White Gaussian Noise*). A capacidade de um canal em bits/segundo/Hertz é dada por [48] [68] [69] [70]:

$$\frac{C}{BW} = \log_2 \left( 1 + \frac{P_{tx}}{\sigma^2} \right) = \log_2 (1 + \rho) \quad \text{bits/s/Hertz}, \quad (2)$$

sendo:  $C$  a capacidade do canal (bits/segundo/Hertz de banda ocupada);  $P_{tx}$  a potência de transmissão (Watts);  $\sigma^2$  a potência de um ruído aditivo gaussiano (Watts) e  $BW$  a banda de transmissão em Hertz do canal. A relação  $\frac{P_{tx}}{\sigma^2}$  representa a SNR ( $\rho$ ) em cada ramo de recepção [59], geralmente expressa em dB.

Esse é o valor teórico instantâneo idealizado para a taxa de dados ou capacidade do canal, considerado invariante no tempo, ou seja, o ganho do canal ( $h$ ) é fixo e somente o ruído instantâneo varia de acordo com uma distribuição normal com variância  $\sigma^2$  [51]. Na prática, em comunicações sem fio reais, o canal geralmente é seletivo em frequência e variável no tempo. Isso dá origem a diferentes definições de capacidade dependendo do prévio conhecimento no transmissor sobre o estado atual do canal. Uma medida mais realista da capacidade do canal é adotar a média dos valores máximos da taxa de informação, que pode ser transmitida considerando-se as variações do canal, ou seja, a sua capacidade ergódica [71].

Notáveis ganhos da capacidade ergódica para sistemas os SISO, SIMO, MISO e MIMO formulados por Foschini e Gans em 1998 [72], e Telatar em 1999 [59], estão resumidamente apresentadas a seguir. Considera-se que o transmissor não possui informações do estado do canal, assumindo igual distribuição de potência para todos os canais espaciais formados, Fig. 18.

$$\text{SISO} \quad C_{\text{SISO}} = \log_2 \left( 1 + \frac{|h_{11}|^2 \cdot P_{tx}}{\sigma^2} \right) = \log_2 (1 + \rho |h_{11}|^2) \quad \text{bits/s/Hertz}, \quad (3)$$

$$\text{SIMO} \quad C_{\text{SIMO}} = \log_2 \left( 1 + \rho \cdot \sum_{i=1}^N |h_{i1}|^2 \right) \text{ bits/s/Hz}, \quad (4)$$

$$\text{MISO} \quad C_{\text{MISO}} = \log_2 \left( 1 + \frac{\rho}{N_T} \cdot \sum_{j=1}^M |h_{j1}|^2 \right) \text{ bits/s/Hz}, \quad (5)$$

$$\text{MIMO} \quad C_{\text{MIMO}} = \log_2 \left[ \det \left( \mathbf{I}_N + \frac{\rho}{M} \mathbf{H} \cdot \mathbf{H}^* \right) \right] \text{ bits/s/Hz}, \quad (6)$$

sendo:

N: número de antenas de recepção;

M: número de antenas de transmissão;

$\mathbf{h}_{ij}$ : ganho de cada canal formado entre as antenas de transmissão e recepção;

$\mathbf{I}_N$ : matriz identidade de ordem  $N \times M$ ;

$\mathbf{H}^*$ : conjugado transposto da matriz de resposta do canal MIMO ( $\mathbf{H}$ ) de ordem  $N \times M$ .

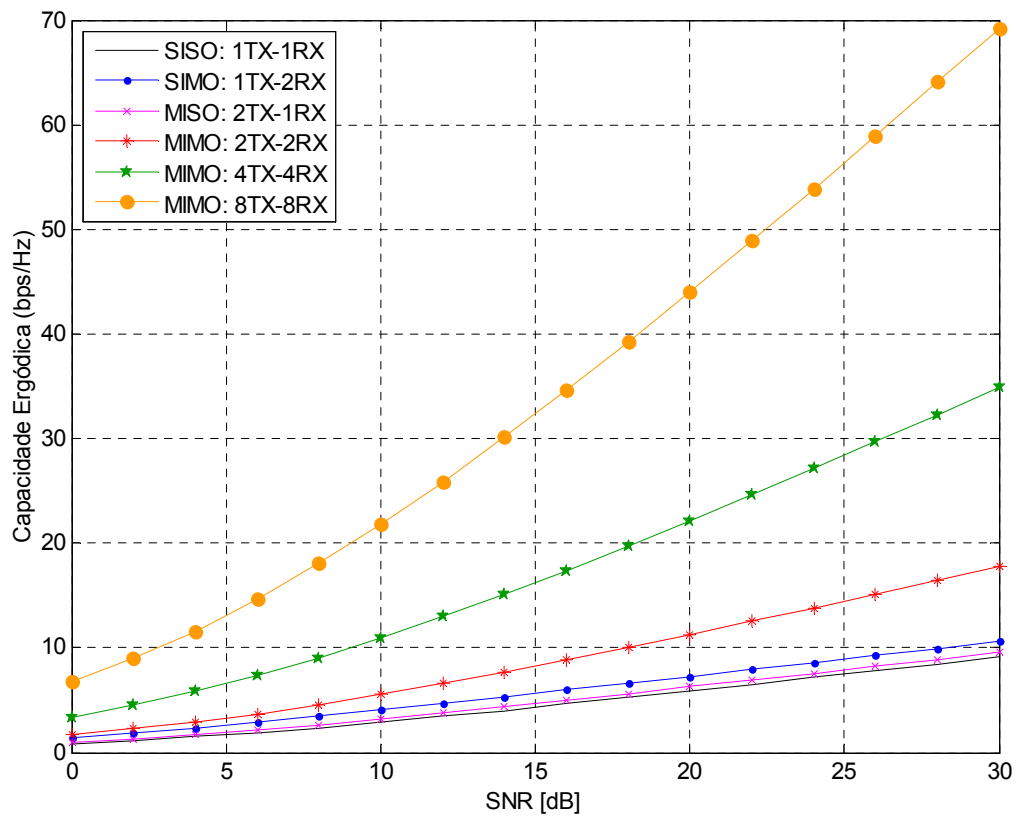


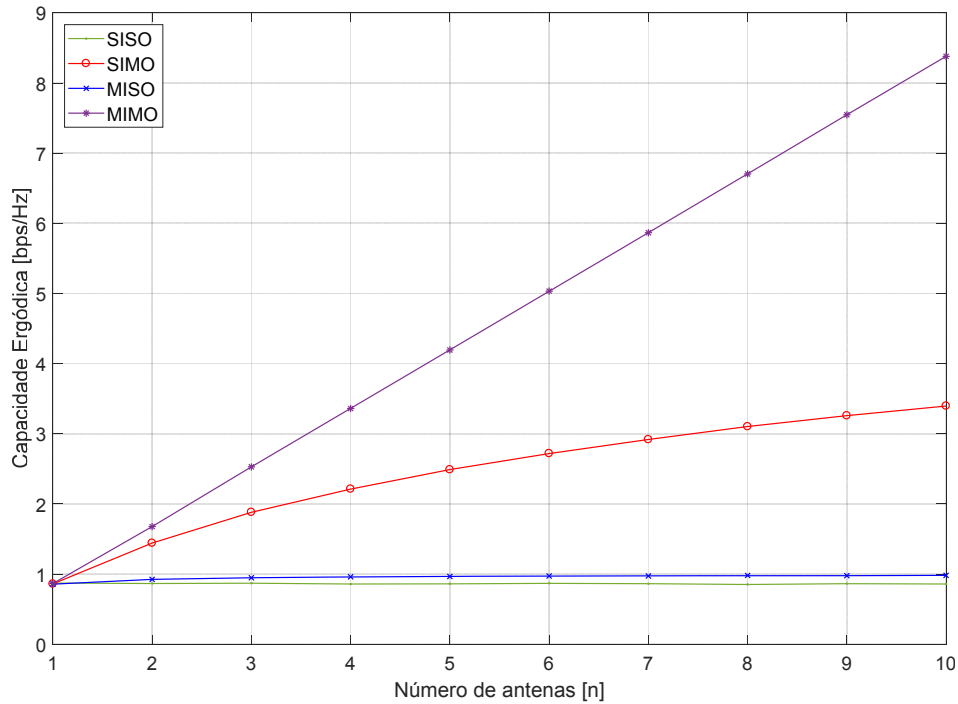
Figura 18 - Capacidade Ergódica para diferentes canais MIMO.

Da Fig. 18, pode-se concluir que o desempenho dos canais MIMO é muito superior em comparação com canais SISO. Para uma mesma relação SNR, por exemplo 10dB, a capacidade atingida com MIMO 4×4 é da ordem de 10,95bps/Hz, enquanto para o canal SISO só 2,9bps/Hz, ou seja, mais que o triplo de capacidade para uma mesma potência de transmissão. Portanto, o MIMO é de fato projetado como componente chave para se atingir as altas taxas de transmissão em comunicações móveis para as próximas gerações. A Fig. 18 reflete uma atualização das simulações apresentadas em [73], porém com um número maior de antenas, apresentando resultados simulados idênticos quando comparados.

As equações (3), (4), (5) e (6) revelam que a capacidade ou eficiência espectral depende em grande parte da modelagem da matriz do canal ( $H$ ). Em geral,  $\log_2(1+x)$  é proporcional à  $x$  para  $x$  pequeno, logo, para baixas relações SNR, a capacidade aumenta proporcionalmente à SNR. No entanto, para um valor de  $x$  grande, tem-se:  $\log_2(1+x) \approx \log_2(x)$ . Como resultado, para maiores relações SNR, a capacidade crescerá em uma função logarítmica mais lentamente com menor desempenho.

Em vista disso, em um sistema SISO a capacidade aumenta logaritmicamente com o aumento da SNR. Por exemplo, para uma SNR = 10dB = 10 a eficiência espectral será de 3,46bps/Hz. Para que essa eficiência seja triplicada (10,38 bps/Hz, ainda longe dos 16bps/Hz da Tab. 10), a potência do sinal transmitido tem que ser aumentada, aproximadamente, de 133 vezes! Portanto, é praticamente impossível conceber dispositivos portáteis restritos ao consumo de bateria, nessa configuração de canal (apenas uma antena) com elevada eficiência espectral.

Para solucionar esse problema, a técnica de múltiplas antenas faz com que o crescimento da eficiência espectral com relação ao número de antenas, passe de logarítmico para linear conforme ilustrado na Fig. 19, simulada para um desvanecimento Rayleigh e SNR = 0dB. Na curva linear (lilás), o número de antenas de transmissão e recepção são iguais (MIMO). Na segunda curva em vermelho apenas o número de antenas na recepção é aumentado (SIMO) enquanto o número de antenas de recepção é mantido igual a 1, levando a um crescimento logarítmico. Na curva azul (MISO) apenas o número de antenas na transmissão foi aumentado, enquanto o número de antenas na recepção foi mantido igual a 1, levando a um crescimento limitado próximo ao caso SISO, linha verde.



**Figura 19** - Capacidade Ergódica em função do número de antenas [n].

Telatar [59] e Foschini [72] também demonstraram que a equação 6, quando o número de antenas M cresce para um valor de N fixo, pode ser reduzida à:

$$C = n \cdot \log_2 [\det(I_N + \rho)] = \min\{M, N\} \cdot \log_2(1 + \rho) \text{ bits/s/Hz}, \quad (7)$$

sendo:  $n = \min\{M, N\}$ .

Intuitivamente o canal MIMO pode ser entendido como uma coleção de subcanais SISO independentes com ganhos iguais comportando-se como um canal aleatório com distribuição gaussiana na recepção. A equação (3) revela que o ganho da capacidade de um canal MIMO crescerá linearmente com o número de antenas de recepção para um grande número de antenas de transmissão [59]. Da Fig. 19, cada vez que o número de antenas dobra, a capacidade é também aproximadamente multiplicada por um fator de dois, isto quer dizer que a capacidade de um sistema MIMO  $\{N \times N\}$  suporta é aproximadamente igual a N vezes a capacidade de um sistema SISO para qualquer valor de SNR, em concordância com o aumento da capacidade quase que linear com a utilização de múltiplas antenas.

### 3.4. Análise da Eficiência Espectral em *Downlink*

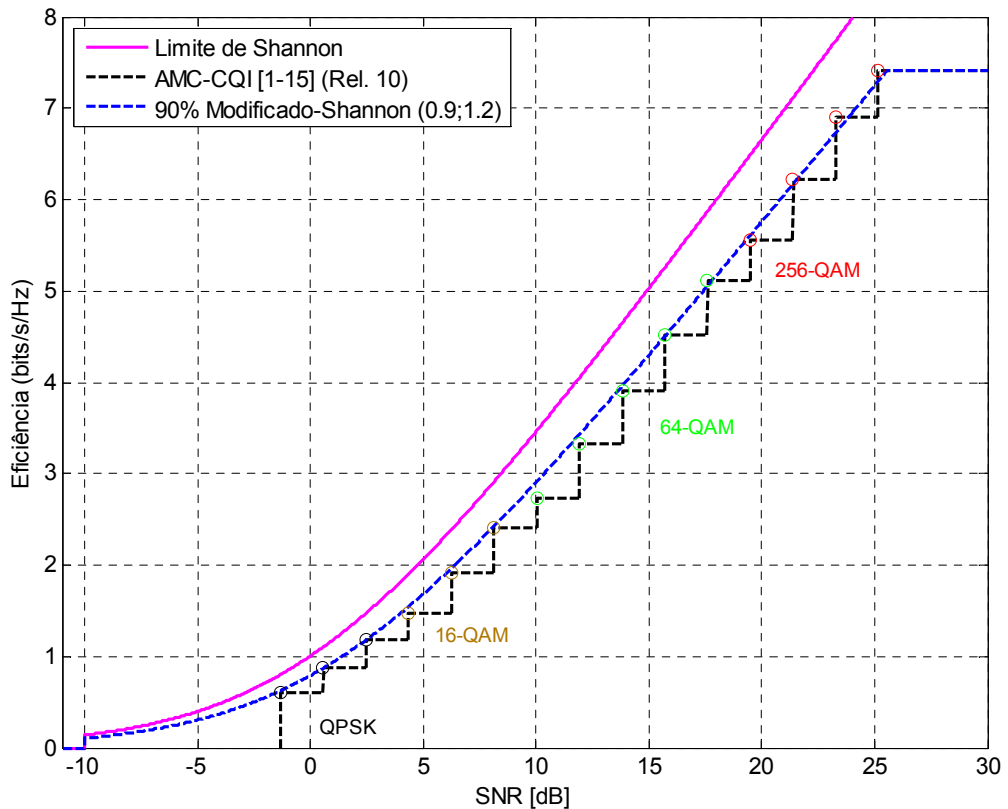
Os resultados apresentados na sessão 3.3 são modelos teóricos para estimar a eficiência espectral em condições muito especiais do canal móvel para um dado valor de SNR resultando em máximas taxas de acesso. Na prática, a taxa de dados é limitada pelos próprios problemas de implementação da rede LTE\LTE-Advanced que introduzem perdas no desempenho, tais como a eficiência da largura de banda, a adição do CP, os sinais da estrutura de controle do *Resource Grid* do LTE, entre outros. Conseqüentemente, uma otimização aplicada à equação (3) visa aproximar a máxima taxa efetiva de transferência de forma mais realista proposta por uma rede LTE-Advanced.

Para avaliar a capacidade de canais SISO em sistemas LTE\LTE-A sugere-se empregar uma aproximação da capacidade do canal por meio de uma forma atenuada da equação de Shannon conforme apresentado pela Eq. 8, [23][74]. Nessa situação, ao usar o esquema de AMC estima-se precisões de 75% do limite de Shannon para o LTE Rel. 8 e 90% para o LTE-A Rel. 10.

$$\frac{C(\text{SNR})}{\text{BW}} = \begin{cases} 0, & \text{SNR} < \text{SNR}_{\min} = -10\text{dB} \\ \eta \cdot \text{BW}_{\text{eff}} \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{\text{SNR}}{\text{SNR}_{\text{eff}}} \right), & \text{SNR}_{\min} < \text{SNR} < \text{SNR}_{\max} \\ C_{\max}, & \text{SNR} > \text{SNR}_{\max} \end{cases} \quad (8)$$

O fator de correção  $\eta$  indica os *overheads* na transmissão dos blocos de recursos. O coeficiente  $\text{BW}_{\text{eff}}$  representa a largura efetiva (Tab. 7) descontada as bandas de guarda de proteção para bandas adjacentes. No caso de uma largura de banda total  $\text{BW} = 20\text{MHz}$ ,  $\text{BW}_{\text{eff}} = 0,9$ . O parâmetro  $\text{SNR}_{\text{eff}}$  é um ajuste na SNR para acomodar a curva da capacidade de acordo com a eficiência de implantação (modulação, taxa de codificação, eficiência dos algoritmos de recepção, etc.) medida ou simulada. A Fig. 20 ilustra a eficiência espectral para os diferentes valores de MCS do Rel. 10 comparado com o rendimento máximo teórico representado pelo limite de Shannon e sua fórmula modificada, adotando os parâmetros  $\eta \cdot \text{BW}_{\text{eff}} = 0,9$  e  $\text{SNR}_{\text{eff}} = 1,2$ .





**Figura 20** - Capacidade do MCS, Limite de Shannon e a sua fórmula modificada.

A equação (3) pode ser ainda modificada para obter estimativas mais precisas da capacidade de canais SISO e MIMO [75]:

$$\frac{C}{BW} = \eta \cdot BW_{\text{eff}} \cdot \min\{M,N\} \cdot \log_2 \left[ 1 + \left( \frac{N}{\min\{M,N\}} \right) \cdot \frac{SNR}{SNR_{\text{eff}}} \right], \quad (9)$$

note que para o caso de MIMO 2×2 a capacidade de transmissão é duplicada.

As máximas taxas de dados de *downlink* no LTE/LTE-A podem ser calculadas de duas maneiras considerando a qualidade ótima do sinal recebido. A primeira, de forma teórica a partir da largura de banda do sistema, *overheads*, modulação, taxas de codificação, tipos de esquemas MIMO utilizado e a taxa de erro de bloqueio. A segunda alternativa recorre às tabelas do 3GPP para o cálculo efetivo das taxas de dados previstas para o UE da rede móvel. Além disso, conforme apresentado na Tab. 2, a categoria de equipamentos dos UEs também limita as possíveis taxas de dados de

*downlink*. Ambos os métodos apresentam boas convergências entre a formulação utilizada e os dados prontos relativos às recomendações tabuladas do 3GPP.

Os principais parâmetros que restringem o rendimento  $\eta$  na eficiência da largura de banda total para o enlace de *downlink* no LTE-A são [76][77]: a eficiência na largura de banda ( $BW_{eff}$ ); a eficiência na largura de banda pela adição do Cyclic Prefix ( $\eta_{CP}$ ); a densidade de *Reference Signals* no *Resource Grid* e os canais de controle e sincronismo da arquitetura de rádio do LTE. A Tab. 11 resume os principais fatores de rendimento aplicados à eficiência espectral do LTE no *downlink* para uma largura de banda de 20MHz em função da quantidade de antenas de transmissão e Normal-CP (7 símbolos OFDM por slot de 0,5ms). Cabe lembrar que ao adicionar o *Cyclic Prefix* como um intervalo de guarda entre símbolos OFDM ocorre também uma diminuição na eficiência espectral, pois parte do símbolo transmitido não contém a informação útil, porém seu uso é essencial para que o sistema esteja funcionando corretamente.

**Tabela 11** - Eficiência da Largura de Banda no DL com MIMO, adaptado [78].

Fatores de rendimento da Largura de Banda	Número de Antenas de Transmissão [n]			
	1	2	3	4
Eficiência da largura de banda: $BW_{eff}$	0,9			
Eficiência do Cyclic Prefix: $\eta_{CP}$	0,93			
Eficiência dos Reference Signals: $\eta_{RS_n}$	0,95	0,90	0,89	0,86
Eficiência dos canais de sincronismo: $\eta_{sync}$	0,99			
Eficiência do canal de <i>Broadcast</i> : $\eta_{PBCH}$	0,99			
Eficiência do canal de controle: $\eta_{PDCCH}$	0,93 (1 símbolo OFDM)			
$\eta_{DL\_BW\_enlace} = BW_{eff} \times \eta_{CP} \times \eta_{RS_n}$	0,8	0,76	0,75	0,72
$\eta_{DL\_BW\_sistema} = \eta_{DL\_BW\_enlace} \times \eta_{sync} \times \eta_{PBCH} \times \eta_{PDCCH}$	0,73	0,69	0,68	0,66

A leitura da Tab. 11 leva a uma conclusão que na configuração de antenas SISO a eficiência da espectral é em torno de 73% e, para configurações MIMO cai para cerca de 70%. Como visto na seção (3.3) no modo multiplexação espacial (SM) a eficiência espectral eleva a taxa de bits por um fator igual a  $n = \min\{M,N\}$  antenas. No entanto, a sobrecarga causada pelos sinais de controle inseridos na moldura do quadro OFDM

reduz o *throughput* máximo. Ao que parece, na melhor das hipóteses, a partir da capacidade do canal da equação (8), mais de 25% podem ser perdidos apenas na camada física, e isso até mesmo supondo que todos os mecanismos da gerência da camada de rádio, como *feedback*, pré-codificação e AMC funcionem perfeitamente. No caminho para a camada de aplicação, mais sobrecarga é acumulada em camadas mais altas da pilha de protocolos reduzindo ainda mais os débitos binários. As taxas de pico avaliadas nessa dissertação são registradas e comparadas a partir da camada física e da camada MAC limitada a uma taxa de bloqueio BLER de 10%.

### 3.5. Capacidade de Throughput do LTE-A em DL

Nessa seção será apresentado o cálculo da taxa de pico para a camada física do LTE-A. A equação (9) será adaptada para condições ótimas do canal de RF, em termos dos parâmetros da alocação de RBs e do quadro de rádio do LTE, descontado os canais de controle e sinalização apresentados anteriormente, multiplexação espacial (SU-MIMO), ordem e taxa de modulação. Consequentemente, o rendimento máximo teórico de pico de *downlink* LTE-A será:

$$R_b = \eta \cdot \frac{N_{RB} \cdot N_{sp}^{RB} \cdot N_{sym}^{sbf} \cdot b \cdot r \cdot N_{SS}}{t_{TTI}}, \quad (10)$$

sendo:

- #  $\eta$  = coeficiente de rendimento do quadro OFDM (Tabela 11);
- #  $N_{RB}$  = número de Resources Blocks (depende da largura de banda utilizada);
- #  $N_{sp}^{RB}$  = número de subportadoras por RB (12 subportadoras espaçadas de 15kHz);
- #  $N_{sym}^{sbf}$  = número de símbolos OFDM por subframe (14 para N-CP e 12 para e-CP);
- #  $b$  = número de bits modulados por subportadora (em função da AMC);
- #  $r$  = taxa de codificação (em função do MCS aplicado);
- #  $N_{SS}$  = número de *spatial streams* formados no canal MIMO;
- #  $t_{TTI}$  = intervalo de duração de 1 TTI (1ms para sistemas LTE/LTE-A).

Por exemplo, para calcular a taxa de pico em *downlink*  $R_b$  baseado no *Resource Grid* do OFDM, assumindo 20MHz ( $N_{RB} = 100$ ) de largura de banda, Normal-CP ( $N_{sym}^{sbf} = 14$  símbolos OFDM/subframe), modulação 64QAM (6 bits/símbolo/portadora), taxa de codificação  $r = 1$  e um canal SISO ( $N_{SS} = 1$ ), tem-se:

$$R_b = \frac{N_{RB} \cdot N_{sp} \cdot N_{sym}^{frame} \cdot b \cdot r \cdot N_{SS}}{t_{TTI}} \Rightarrow R_b = \frac{100 \cdot 12 \cdot 14 \cdot 6 \cdot 1 \cdot 1}{1ms} = 100,8Mbps$$

ou seja, uma taxa de pico no *downlink*  $R_b \approx 100Mbps$  em conformidade aos requisitos do 3GPP para uma rede LTE. Já na condição de Carrier Aggregation (5 CC  $\times$  20MHz) e com um arranjo MIMO 2 $\times$ 2 resultará em:

$$R_b = \frac{N_{RB} \cdot N_{sp} \cdot N_{sym}^{frame} \cdot b \cdot r \cdot N_{SS}}{t_{TTI}} \Rightarrow R_b = \frac{5 \cdot (100) \cdot 12 \cdot 14 \cdot 6 \cdot 1 \cdot 2}{1ms} = 1000,8Mbps$$

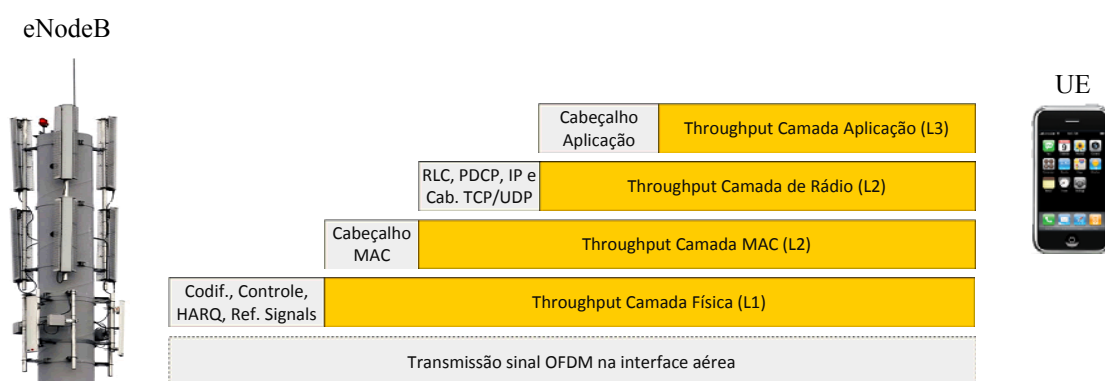
A taxa de pico no *downlink* sob essas condições é de  $R_b \approx 1Gbps$  ! Resultado teórico para uma rede LTE-Advanced segundo as recomendações do IMT-Advanced.

A inclusão do fator de rendimento ( $0,7 \leq \eta \leq 0,75$ ), de acordo com a Tab. 11, na análise permite aproximações mais realistas do *throughput* da camada física, além de ter uma melhor noção das taxas reais experimentada pelos usuários finais, na camada de aplicação, resultando dessa forma, em taxas próximas a 700Mbps. A taxa na camada de aplicação será ainda menor dependendo de possíveis retransmissões e *overheads* adicionais introduzidos, por exemplo, nas pilhas de protocolos (HARQ, RLC, PDCP, IP, TCP/UDP) e pela combinação do MCS e número de RBs permitidos na largura de banda de disponível na célula. Uma estimativa semi-empírica baseada em dados de rede reais é uma perda total de aproximadamente 34,5% obtida na camada de aplicação relativa à sobrecarga de todos protocolos e sinalizações de transporte [51]. A equação (11) relaciona o *throughput* da camada de aplicação ( $R_b^{App}$ ) com a camada física ( $R_b$ ) por:

$$R_b^{App} = (1 - \eta_{overhead}^{App/Phy}) \cdot R_b, \quad (11)$$

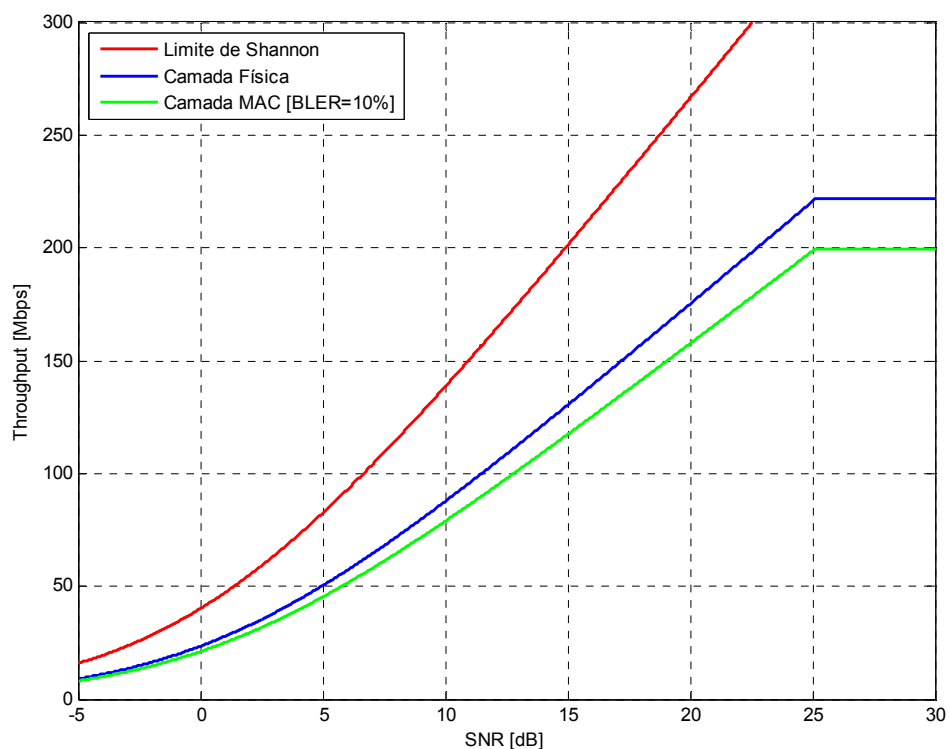
sendo:  $\eta_{overhead}^{App/Phy}$  é a soma de todos os cabeçalhos até a camada de aplicação do usuário.

A Fig. 21, ilustra um fluxo de dados resumido encontrado em um acesso à Internet em LTE no cenário de *downlink*, da camada 3 (L3) para a camada física (L1), com os cabeçalhos de cada protocolo de transporte. O impacto do desempenho de rádio sobre o desempenho do serviço pode ser avaliado a partir de uma abordagem em camadas e, os gastos gerais com a adição de cabeçalhos reduzem as taxas líquidas de dados disponíveis para a aplicação. As principais sobrecargas adicionadas necessárias ao sistema LTE-A são: os sinais de controle da camada física (*RS*, *CP*, canais de controle, etc.); a sobrecarga de múltiplas camadas de protocolo; bandas de guarda e, finalmente, sobrecarga dos sinais de sincronização [14].



**Figura 21 - Throughput entre as camadas LTE.**

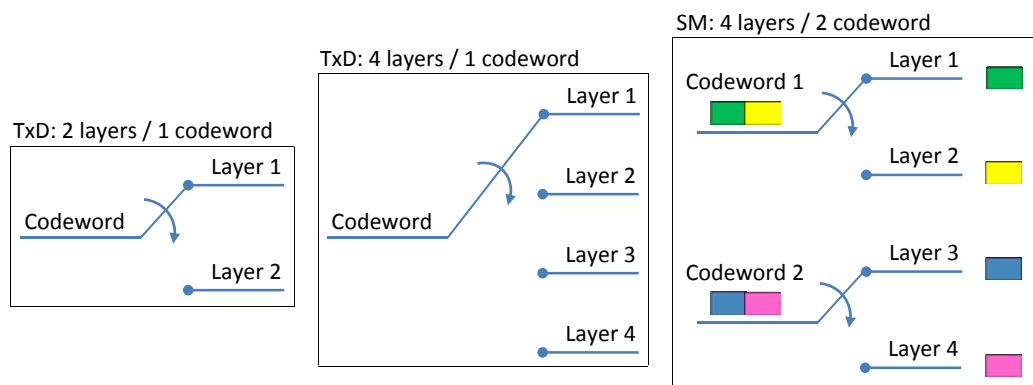
Apresentado os dados de eficiência da camada física, o gráfico da Fig. 22 representa a equação (9) para uma largura de banda do sistema de 20 MHz, calculado para uma sobrecarga de 31% ( $\eta \cdot BW_{eff} = 0,69$ ) que é teoricamente mais precisa para as transmissões MIMO 2x2 em LTE na camada física como mostrado na linha azul. O fator de correção da relação sinal-ruído foi considerado igual a  $SNR_{eff} = 1,25$  segundo a referência [23]. A linha verde na Fig. 24 corresponde às máximas despesas na camada MAC com retransmissões adicionais adotando uma taxa de bloqueio BLER igual a 10%. Esses limites serão usados nesta dissertação mais adiante para comparação com resultados das medições práticas. A saturação da taxa de transferência a partir do ponto  $SNR=25,164$ dB (Tab. 7), é devido ao limite da AMC indicando o valor máximo do índice do MCS igual a 28, modulação 256QAM sobre um canal AWGN [52].



**Figura 22** - Throughput DL em função da SNR para BW=20MHz e MIMO 2x2.

Outra opção para cálculos mais precisos das taxas de transferência em *downlink* resume-se ao uso das tabelas prontas da referência [50] do padrão 3GPP. A aplicação didática das tabelas especifica, a partir de uma dada relação SNR, o *Transport Block Size (TBS)* ou quantos bits provenientes da camada MAC para camada física por TTI (1ms) podem ser alocados nos blocos de recursos a um determinado UE. O tamanho do bloco de transporte ou TBS é ajustado pela célula por meio do MCS, com base nos relatórios de CQI provenientes do UE. Nesse método, toda sobrecarga dos símbolos de referência e sinalização de controle já são descontados. Além disso, considera-se a informação do RI para especificar o número mais benéfico de camadas espaciais MIMO na transmissão em DL por bloco de transporte a serem transmitidas pela eNB.

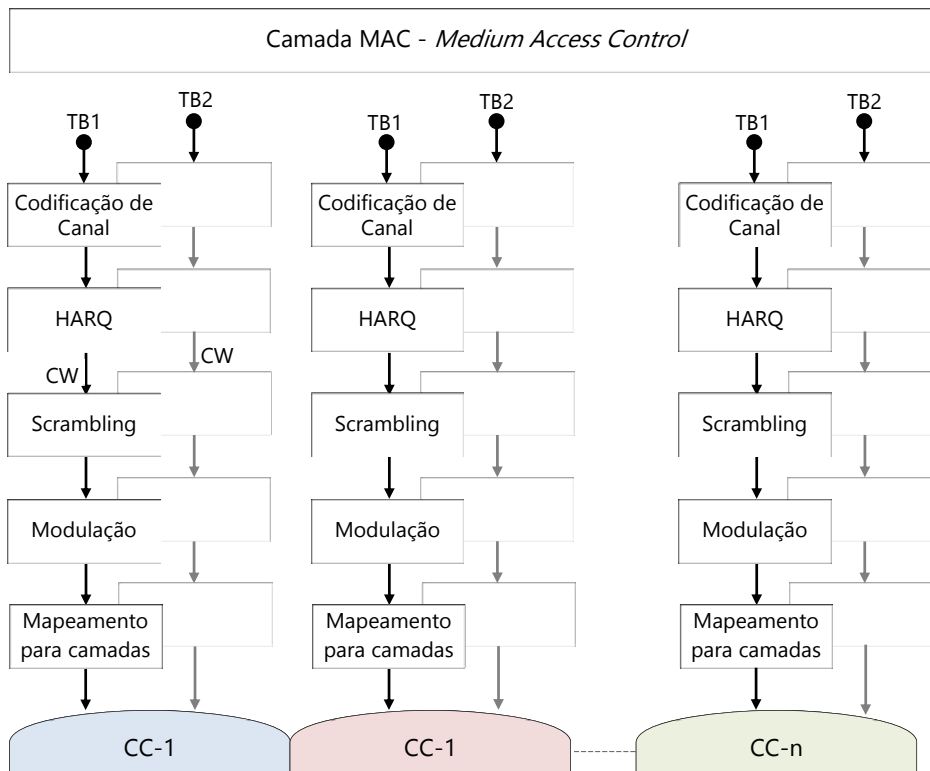
Caso o UE reporte  $RI = 1$ , o modo de transmissão configurado será TxD para obter uma maior resiliência; se  $RI > 1$ , o eNB seleciona o modo SM para atingir um melhor desempenho, transmitindo duas *codewords* distintas em um único intervalo de transmissão de 1ms [50]. A Fig. 23 ilustra o mapeamento das CWs nos modos de diversidade de transmissão (TxD) e multiplexação espacial (SM). O modo TxD transfere apenas uma CW a cada 1ms, enquanto que no modo SM duas CWs são multiplexadas e transmitidas pelas camadas espaciais do canal MIMO.



**Figura 23** - Mapeamento CW nos modos de transmissão TxD e SM.

Um máximo de duas CWs podem ser transmitidas de uma só vez usando os modos de multiplexação espacial da técnica MIMO [50]. Se o número de camadas espaciais for maior que dois, então é aplicado o modo SM para melhorar as taxas de *throughput*. No LTE-A esse processo, extrapola teoricamente as taxas de dados com a transmissão paralela em até 8 camadas espaciais em *downlink*. Na prática, por sua simplicidade, o modo mais utilizado é o TM-3 MIMO 2×2 e RI = 2, com duas CWs multiplexadas em duas camadas transmitidas por duas antenas. Portanto, cada usuário pode ser agendado com dois blocos de transporte (TB).

A Fig. 24 ilustra a atribuição de bits da camada MAC para a camada física (PHY) carregados pelo TBS e transmitidos pelas CWs {1,2}, por meio das camadas espaciais do canal MIMO. As mensagens de dados e sinalização (controle) do usuário são processadas pelas camadas superiores PDCP, RLC e MAC antes de serem transmitidas para a camada física e enviadas pela interface aérea. O canal físico PDSCH é responsável por transportar os dados do usuário, sendo que o rendimento em *downlink* pode ser medido dependendo do número de REs alocados, regime de modulação (QPSK, 16QAM, 64QAM ou 256QAM) e codificação aplicado a cada RE, múltiplos esquemas de transmissão MIMO (2×2, 4×4, 8×8) e do número de blocos de recursos (RBs) disponíveis, de acordo com a equação 10. A combinação de RBs atribuídos e MCS determina a quantidade total de bits transportados por um bloco de transporte (TB). Como pode ser observado, a operação CA permite a utilização de diferentes CCs para aumentar a largura de banda total disponível, adicionando mais RBs e maximizando as capacidades de rádio.



**Figura 24** - Processo de transferência de dados para um UE operando em CA.

No CLSM (TM-4), por exemplo, para uma definida relação SNR, o UE reporta o CQI, o RI levando em consideração as condições atuais do canal para cada camada por meio da PMI e o número ótimo de camadas espaciais por TB a ser transmitido pelo eNB. O tamanho de cada TB vai depender tanto do MCS usado como do número de RBs alocados ao respectivo UE.

Quanto ao cálculo do TBS usando as tabelas do 3GPP para um específico UE, este é executado em duas etapas. Primeiro é encontrado o índice do MCS ( $I_{MCS}$ ) de acordo com a eficiência definida ou interpolada na tabela do CQI com base no valor do SNR. Por conseguinte, o índice do tamanho do bloco de transporte ( $I_{TBS}$ ), presente nas tabelas [57, 7.1.7.1-1] ou [57, 7.1.7.1-1A], caso o móvel possua suporte a modulação 256QAM:  $I_{MCS} \mapsto I_{TBS}$ . Em seguida, associa-se o índice  $I_{TBS}$  ao número de blocos de recursos PRBs ( $N_{PRB}$ ) necessários para suportar a quantidade de dados enviados em bits pela camada MAC. Finalmente, o valor do  $I_{TBS}$  é usado para calcular o TBS ( $N_{PRB}; I_{TBS} \mapsto TBS$ ). De acordo com a referência [50] no modo SM para cada



camada espacial é aplicado uma tabela para o cálculo do TBS. O número de camadas espaciais por TB é determinado de acordo com RI informado pelo UE.

Os exemplos abaixo representam as etapas do processo para encontrar as taxas de dados utilizando as tabelas disponibilizadas pelo 3GPP [50], resumidamente apresentadas nas Tabs. 12 e 13.

**Tabela 12 - Mapeamento MCS /  $I_{TBS}$ , adaptado de [50].**

Table 7.1.7.1-1: Modulation and TBS index table for PDSCH					Table 7.1.7.1-1A. Modulation and TBS index table 2 for PDSCH					
$I_{MCS}$	Modulação	Ordem Mod. ( $Q_m$ )	$I_{TBS}$	CQI	$I_{MCS}$	Modulação	Ordem Mod. ( $Q_m$ )	$I_{TBS}$	CQI	
0	QPSK	2	0		0	QPSK	2	0		
1		2	1	1	1		2	2	1	
2		2	2		2		2	4	2	
3		2	3	2	3		2	6	3	
4		2	4		4		2	8	4	
5		2	5	3	5		16QAM	4	10	
6		2	6		6			4	11	
7		2	7	4	7			4	12	5
8		2	8		8			4	13	
9		2	9	5	9			4	14	6
10	16QAM	4	9		10	4		15		
11		4	10	6	11	6		16	7	
12		4	11		12	6		17		
13		4	12	7	13	6		18	8	
14		4	13		14	6		19		
15		4	14	8	15	6	20	9		
16		4	15		16	6	21			
17	64QAM	6	15	9	17	6	22	10		
18		6	16		18	6	23			
19		6	17	10	19	6	24	11		
20		6	18		20	256QAM	8	25		
21		6	19	11	21		8	27	12	
22		6	20		22		8	28		
23		6	21	12	23		8	29	13	
24		6	22		24		8	30		
25		6	23	13	25		8	31	14	
26		6	24		26		8	32		
27		6	25	14	27		8	33/33A	15	
28	6	26/26A	15	28	QPSK		2	Reserv.	Reserv.	
29	QPSK	2	Reserv.	Reserv.	16QAM		4			
30	16QAM	4			64QAM		6			
31	64QAM	6			256QAM	8				

**Tabela 13** - Mapeamento  $I_{TBS}$  / PRBs para 1 camada espacial, adaptado de [50].

TBS: bits por TTI (1ms)					
$I_{TBS}$	# Resource Blocks ( $N_{PRB}$ )				
	1	...	50	...	100
0	16	...	1384	...	2792
1	24	...	1800	...	3624
2	32	...	2216	...	4584
3	40	...	2856	...	5736
4	56	...	3624	...	7224
5	72	...	4392	...	8760
6	328	...	5160	...	10296
7	104	...	6200	...	12216
8	120	...	6968	...	14112
9	136	...	7992	...	15840
10	144	...	8760	...	17568
11	176	...	9912	...	19848
12	208	...	11448	...	22920
13	224	...	12960	...	25456
14	256	...	14112	...	28336
15	280	...	15264	...	30576
16	328	...	16416	...	32856
17	336	...	18336	...	36696
18	376	...	19848	...	39232
19	408	...	21384	...	43816
20	440	...	22920	...	46888
21	488	...	25456	...	51024
22	520	...	27376	...	55056
23	552	...	28336	...	57336
24	584	...	30576	...	61664
25	616	...	31704	...	63776
26	712	...	36696	...	75376
26A	632	...	32856	...	66592
27	648	...	32856	...	66592
28	680	...	35160	...	71112
29	712	...	36696	...	73712
30	776	...	39232	...	78704
31	808	...	40576	...	81176
32	840	...	42368	...	84760
33	968	...	48936	...	97896
33A	840	...	43816	...	87936

# **Caso 1**: Para um canal SISO  $1 \times 1$  (1 *layer/codeword*) é atribuído apenas um TB aos bits provenientes da camada MAC para uma camada espacial. Considerando uma relação SNR = 19,488 dB da Tab. 8, correspondente ao CQI=15, a partir da Tab. 12 obtém-se o mapeamento:  $I_{MCS} = 28 \mapsto I_{TBS} = 26$ . Para uma largura de banda de

20MHz, a Tab. 7 fornece a quantidade de recursos da camada física:  $N_{PRB}=100$ . Portanto, a análise desses valores resulta na Tab. 13 em:

$$N_{PRB} = 100; I_{MCS} = 28 \mapsto I_{TBS} = 26 \mapsto TBS = 75376\text{bits}/(\text{TTI}=1\text{ms})$$

Ou seja, uma taxa de  $R_b \approx 75\text{Mbps}$ , aproximadamente igual à encontrada pela equação 10 para um fator de rendimento  $\eta = 0,75$ .

# **Caso 2:** Na configuração MIMO 2×2 com RI = 2 (duas camadas), são atribuídos dois TBs aos bits provenientes da camada MAC. O 3GPP define a formação de até duas *codewords* associadas individualmente para cada TB que serão mapeadas para cada camada espacial do canal MIMO. Por exemplo, para uma  $BW=20\text{MHz} \mapsto N_{PRB}=100$ , o maior índice na Tab. 12 para uma modulação 64QAM é  $I_{TBS} = 26$ . A partir da Tab. 13, tem-se:

$$N_{PRB} = 100; I_{TBS} = 26 \mapsto TBS\_L1 = 75376 \mapsto 2 \cdot TBS\_L1 = 150752\text{bits}/1\text{ms}$$

# **Caso 3:** Na configuração MIMO 4×4 com RI = 4 (quatro camadas), são atribuídos dois TBs aos bits provenientes da camada MAC. As duas *CWs* são individualmente associadas aos TBs e então mapeadas separadamente para duas camadas espaciais. Nas mesmas condições anteriores relacionar o  $TBS\_L1 = 75376$  bits na Tab. 13 resulta em  $TBS\_L2$ , logo:

$$N_{PRB} = 100; I_{TBS} = 26 \mapsto TBS\_L1 = 75376 \mapsto 4 \cdot TBS\_L1 \approx 301,5\text{Mbps}$$

Basicamente o algoritmo que envolve o uso do mapeamento das tabelas disponibilizadas pelo 3GPP [50] para o cálculo da máxima taxa de bits disponível para um usuário móvel resume-se em:

- Registrar o número de *Physical Resource Blocks* da banda total disponível (Tab. 7);
- Encontrar o CQI com base no valor do SNR (depende do fabricante do UE);
- Relacionar o  $I_{MCS}$  ao CQI de acordo com a Tab. 12;
- Encontrar o  $I_{TBS}$  a partir do  $I_{MCS}$  na Tab. 12;
- Obter na Tab. 13 o TBS [bits/ms] mediante os valores  $I_{TBS}$  e  $N_{PRB}$ ;
- Finalmente, multiplicar o TBS pelo número de camadas espaciais do canal MIMO.

Os cálculos resultantes do mecanismo apresentado estão resumidos na Tab. 14. As estimativas das taxas máximas teóricas no *downlink* são alcançadas para uma CC de 20MHz, duas, até cinco CCs e topologia MIMO empregada.

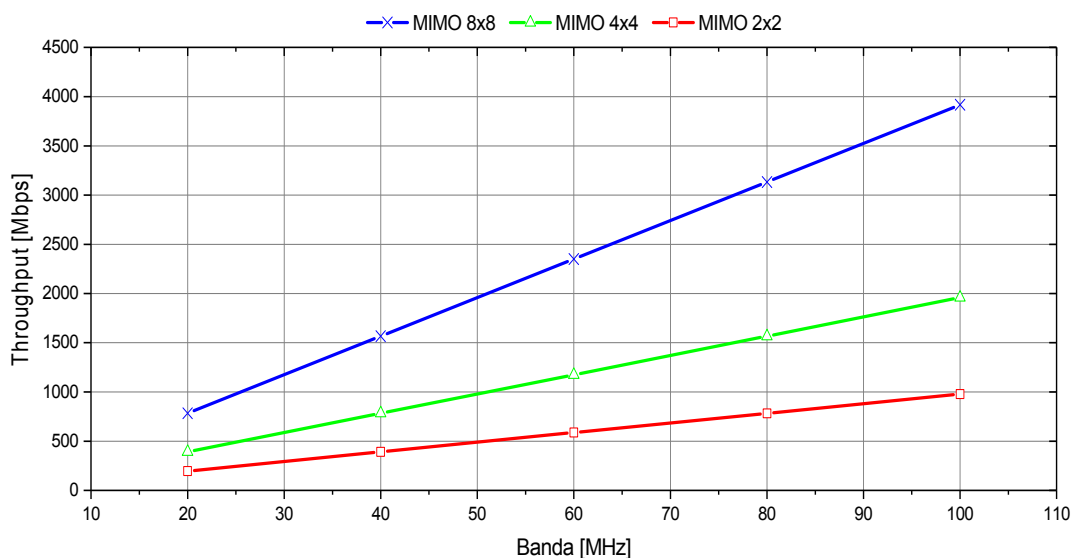
**Tabela 14 - Resultados teóricos das máximas taxas no DL, com HOM e MIMO.**

Esquema MIMO	$I_{TBS}$	Modulação	Débitos máximos no DL [Mbps]				
			20MHz	40MHz	60MHz	80MHz	100MHz
			100 RBs	200 RBs	300 RBs	400 RBs	500 RBs
SISO SIMO	9	QPSK	15,840	31,680	47,520	63,360	79,200
	15	16QAM	30,576	61,152	91,728	122,304	152,880
	26	64QAM	75,376	150,752	226,128	301,504	376,880
	33	256QAM	97,896	195,792	293,688	391,584	489,480
MIMO 2×2	9	QPSK	31,680	63,360	95,040	126,720	158,400
	15	16QAM	61,152	122,304	183,456	244,608	305,760
	26	64QAM	150,752	301,504	452,256	603,008	753,760
	33	256QAM	195,792	391,584	587,376	783,168	978,960
MIMO 4×4	9	QPSK	63,408	126,816	190,224	253,632	317,040
	15	16QAM	123,328	246,656	369,984	493,312	616,640
	26	64QAM	299,552	599,104	898,656	1198,208	1497,760
	33	256QAM	391,632	783,264	1174,896	1566,528	1958,160
MIMO 8×8	9	QPSK	127,552	255,104	382,656	510,208	637,760
	15	16QAM	248,928	497,856	746,784	995,712	1244,640
	26	64QAM	599,712	1199,424	1799,136	2398,848	2998,560
	33	256QAM	783,312	1566,624	2349,936	3133,248	3916,560

Os métodos e recursos utilizados nesta Dissertação têm por objetivo encontrar débitos binários próximos de 75Mbps, 150Mbps, 200Mbps, 450Mbps e 600Mbps na configuração SU-SIMO e SU-MIMO. Para tanto, foram utilizados dois dispositivos de Categoria 9 e 16, com suporte a MIMO 2×2 e ordem de modulação 64QAM e 256QAM. Deve-se observar que o benefício de uma elevada eficiência espectral introduzida com a modulação 256QAM só é significativo se o canal possuir baixa seletividade no tempo e na frequência. Portanto, taxas teóricas de aproximadamente 4Gbps são propostas para cenários muito específicos, possíveis apenas para elevada largura de banda, topologia de antenas MIMO 8×8, HOM em células pequenas com canal relativamente plano e uma relação SNR no receptor, no mínimo, acima de 20dB de acordo com a Tab. 8.

A Fig. 25 apresenta os picos teóricos de *throughput* para diferentes configurações do MIMO e largura de banda. O LTE Rel-8, no enlace de *downlink*, usa

uma banda máxima de 20MHz (1 CC) e MIMO 4×4, enquanto que o LTE-A pode ser configurado até 100MHz (5CCs) e MIMO 8×8, podendo a eNB transmitir 2 CWs, uma para cada conjunto de 4 antenas (8 camadas). Para uma modulação 256QAM MIMO 2×2 (BW=20MHz) é possível atingir picos de 1Gbps. Quando utilizado um arranjo MIMO 8×8 o *throughput* teórico no Rel-10 poderá atingir taxas de 4Gbps.



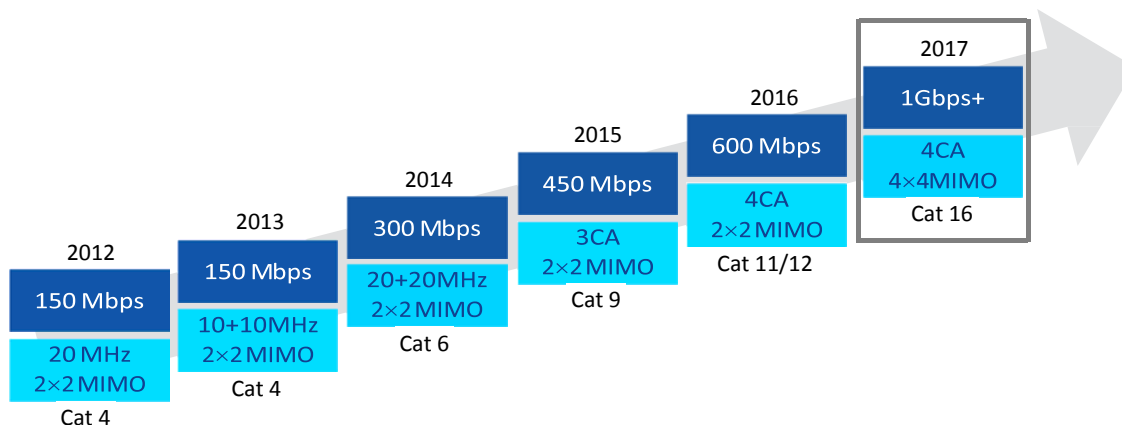
**Figura 25** - *Throughput* teórico em função da banda de operação para DL, [4].

### 3.6. Agregação de Portadoras no LTE-Advanced

Atualmente a maioria dos dispositivos móveis são tipicamente de Categoria 4 ou 6, os quais podem oferecer uma velocidade máxima de até 150 ou 300Mbps respectivamente em DL, com uma única portadora de largura de banda de 20MHz e arranjo de antenas MIMO 2×2. Entretanto, no LTE-Advanced para atingir aos requisitos do IMT-A para as velocidade de 1Gbps e 500Mbps no sentido de DL e UL respectivamente, não apenas os móveis passarão por uma evolução tecnológica, mas as atuais redes de Quarta Geração serão adaptadas para ofertar maior espectro utilizando CA e avançadas técnicas de múltiplas antenas capazes de elevar a eficiência espectral a um máximo nunca antes experimentado por seus usuários.

A versão inicial da técnica Agregação de Portadoras, lançamento comercial em 2013, permitiu débitos iniciais de 150Mbps com alocação de 10+10MHz contíguos. A

próxima fase com dispositivos da categoria 6 está comercialmente disponível desde 2014, suportando 300Mbps com a agregação de 20+20MHz. A Categoria 16 lançada recentemente (modelos Sony Xperia XZ Premium e Samsung Galaxy S8) permitirá taxas de pico de 1Gbps com a agregação de até 4CCs, MIMO 4×4 e HOM (256QAM) de acordo com as especificações do Release-13 do 3GPP, Fig. 26 [79].



**Figura 26** - Evolução de CA na categoria dos UEs, adaptado de [79].

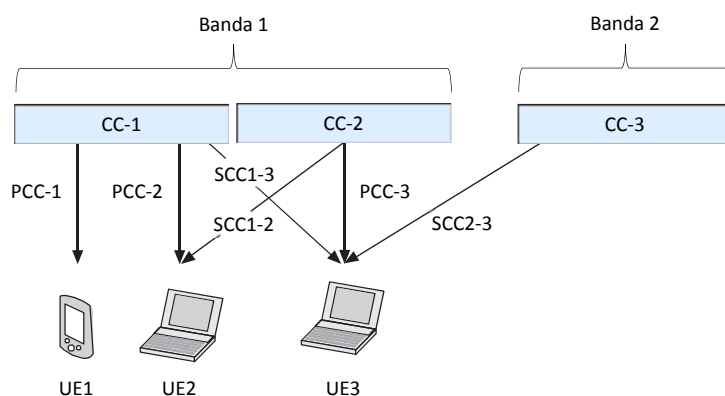
A necessidade de velocidades cada vez maiores está conduzindo o desenvolvimento dos novos dispositivos móveis. Para acompanhar esse ritmo, as operadoras estão atualizando suas redes LTE Rel-8 para o LTE Rel-10 ou além. À medida que novos espaços espectrais são disponibilizados com a compra ou *refarming* da banda atual de frequências, as operadoras poderão explorar o uso de porções fragmentadas do espectro onde já possuem licença de operação.

Nesse contexto, apresenta-se a técnica mais inovadora do LTE-A, denominada Agregação de Portadoras, que permite do ponto de vista da camada física, a agregação de diferentes fragmentos do espectro disponível de forma a elevar substancialmente a banda de transmissão nos dispositivos móveis por meio da programação de múltiplas portadoras simultaneamente nos recursos da eNB. Cada banda agregada, seja no enlace de DL ou UL, atribuída para um UE é denominada de portadora componente (CC, *Component Carrier*).

De acordo com a especificação LTE Rel. 8, a largura de banda máxima de uma simples CC é de 20 MHz. Isso é insuficiente para suportar taxas de dados de 1Gbps, mesmo considerando os esquemas MIMO de mais alta ordem (Tab. 14), para uma rede

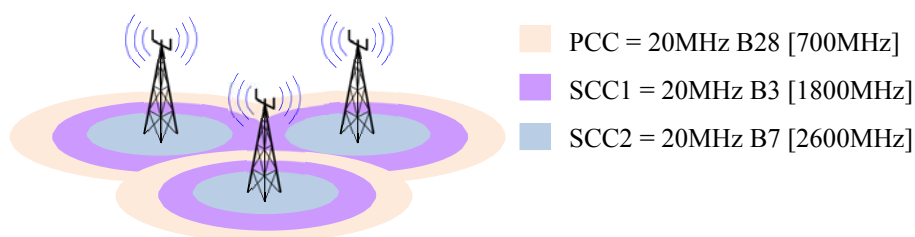
que atenda aos requisitos da ITU-R para sistemas IMT-Advanced [25]. No LTE-A o 3GPP especifica um máximo possível de largura de banda de 100MHz, a partir da agregação de cinco CCs de 20MHz [2][17]-[20][80], podendo fornecer a um dispositivo adequadamente equipado (Cat. 8, Rel. 10, MIMO 8×8, por exemplo) uma taxa potencial teórica de dados agregada, em DL próximo aos 3Gbps! Para manter a compatibilidade espectral com o LTE, no LTE-A é permitido o uso de banda agregada formada a partir de uma das seis larguras espectrais definidas pelo LTE Rel-8 (1.4, 3, 5, 10, 15 ou 20MHz).

A conexão mais simples de rádio ocorre quando o UE está conectado à apenas uma célula da eNB. Essa conectividade de rádio, no contexto de CA, é descrita como *Primary Carrier Component (PCC)* e ao serviço por ela transportado como *Primary Serving Cell (PCell)*. Um UE dos Releases 8 e 9 (ou um UE superior que não precisar de CA) apenas se conecta à rede via *PCell* não sendo necessário atribuir quaisquer recursos adicionais da rede. Já a partir do Release 10 (LTE-A) um UE que necessitar de um serviço de CA irá solicitar o suporte de uma ou até mais quatro células servidoras secundárias conhecidas como *Secondary Serving Cells (SCells)* cada uma das quais transportadas por uma *SCC (Secondary Component Carrier)* [80]. Dependendo das condições de rádio e requisitos de QoS, para um mesmo eNB, uma célula pode ser PCC para um UE e uma SCC para outro UE, Fig. 27, [20]. As CCs podem ser seletivamente ativadas e agregadas para certos UEs com requisitos de QoS específicos que exigem baixa latência e altas taxas de dados.



**Figura 27 - Seleção de PCC e SCC para diferentes UEs, [27].**

Em [81] são previstos vários cenários de implantação de CA, tanto para redes homogêneas e heterogêneas com a utilização adequada de diferentes CCs. Nessa dissertação as CCs foram configuradas em uma única eNB equipado com antenas do tipo painel para uso *indoor* coexistindo nas mesmas direções de propagação, ganho de 7dBi e largura de faixa 698-2690MHz, Fig. 28.



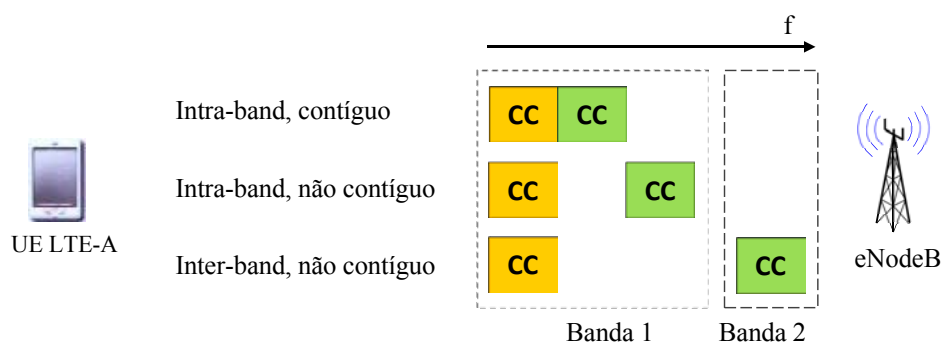
**Figura 28** - Implantação de CA em diferentes eNBs e bandas de operação.

Um fato relevante do CA é que as regiões de cobertura da PCC e da SCC não obrigatoriamente precisam se sobrepor. Além disso, a partir do Release 12, nem precisam pertencem ao mesmo eNB. Esse recurso, chamado de *inter site carrier aggregation* [19], conta com conectividade dupla onde o dispositivo tem duas conexões de rádio simultâneas para dois eNB, mantendo elevadas taxas em processos de *handovers*.

Na prática, não há muitos casos com 100MHz de espectro contíguo disponível para executar a técnica CA. Para obter larguras de bandas suficientemente largas com uso eficiente do espectro de RF fragmentado, a técnica de CA foi concebida para suportar a agregação de uma variedade de diferentes arranjos de CCs, incluindo CCs de mesma ou de diferentes larguras de banda, adjacentes ou não adjacentes, e até mesmo CCs em diferentes bandas de frequência. Dessa forma, três modos ou cenários flexíveis de Agregação de Portadoras foram especificados pelo *IMT-Advanced*: modo *intra-band* contíguo ou não-contíguo e modo *inter-band*, evidentemente não contíguo [20] [81].

A Fig. 29 ilustra os modos de operação da CA em termos no uso das bandas espectrais adjacentes ou não. Ao agregar CCs não adjacentes, o espectro fragmentado pode ser mais eficientemente utilizado.

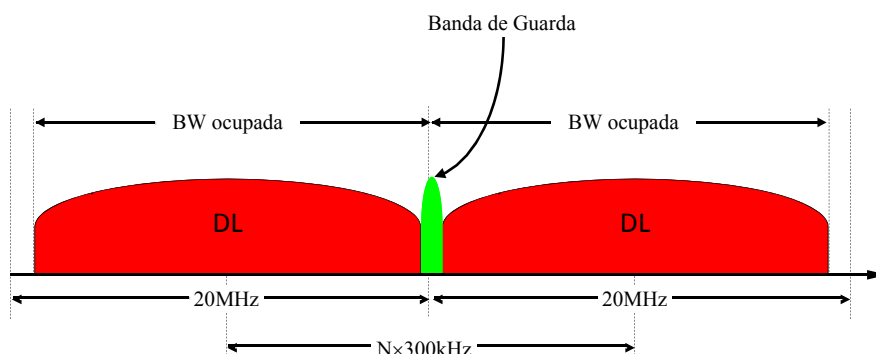




**Figura 29** - Classificação CA nas bandas de operação.

- *Modo Inter-Band*: Neste caso, as comunicações são realizadas usando diferentes faixas de frequência, como as bandas de 700MHz, 1800MHz e 2GHz. Com este tipo de agregação, a robustez da mobilidade pode ser melhorada por meio da exploração de diferentes características de propagação de rádio nas diferentes bandas [20]. No que diz respeito ao UE, este requer o uso de múltiplos transmissores, apresentando novos desafios relacionados ao custo, desempenho e consumo de energia. Entretanto, esse é o cenário mais provável utilizado pelas operadoras, devido à atual fragmentação do espectro de frequências.

- *Modo Intra-Band contíguo*: Esse é o modo mais simples de agregação. Nesse modo as CCs pertencem a mesma banda para agregação e são contíguas, isto é, adjacentes entre si. Para preservar a ortogonalidade entre as subportadoras, espaçadas de 15kHz e 100kHz, o espaçamento entre as frequências centrais do agregado contíguo deve ser múltiplo de 300kHz [20], assim como mostrado na Fig. 30.



**Figura 30** - Alocação espectral entre duas CCs contíguas.

- *Modo Intra-Band não-contíguo*: Por último, nesse modo as CCs pertencem a mesma banda para agregação embora não são obrigatoriamente adjacentes. Como no modo *Inter-Band*, isso adiciona complexidade significativa, especialmente ao terminal onde o espaço, a potência e o custo são considerações importantes.

O espaçamento nominal entre duas CCs E-UTRA agregadas adjacentes é definido como [80]:

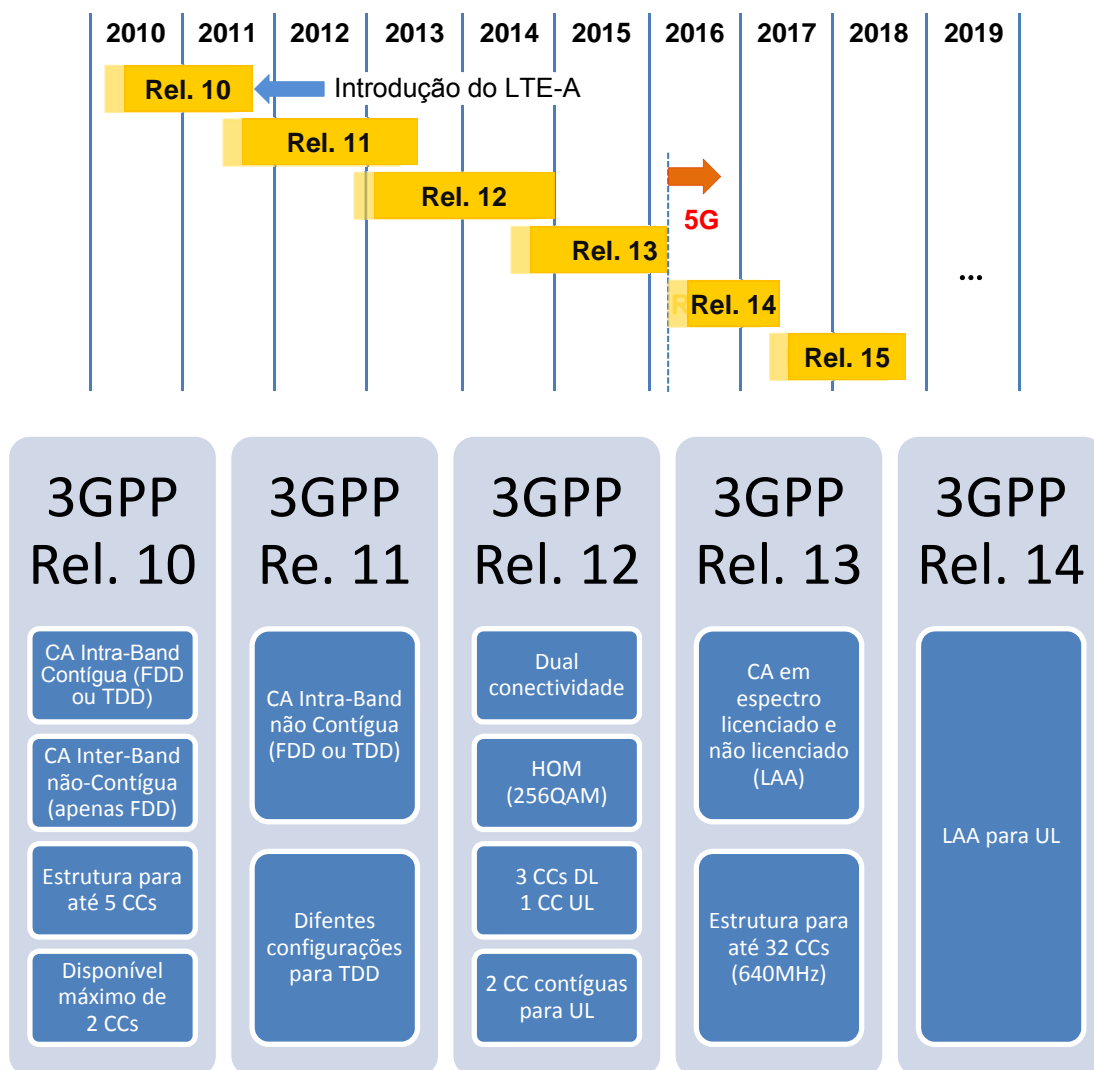
$$\Delta f_N = \left\lceil \frac{BW_{\text{Channel}(1)} + BW_{\text{Channel}(2)} - 0,1 |BW_{\text{Channel}(1)} - BW_{\text{Channel}(2)}|}{0,6} \right\rceil \cdot 0,3 \text{ [MHz]} \quad (12)$$

onde:  $BW_{\text{Channel}(1)}$  e  $BW_{\text{Channel}(2)}$  são as larguras de banda de duas respectivas CCs em MHz.

Os padrões do 3GPP são muito abrangentes e introduzem muitas alternativas possíveis de configuração ao longo das suas diferentes versões para além do LTE-Advanced Release 10. No Release 13 do 3GPP [85], tecnicamente denominado de LTE-U (*LTE-Unlicensed*), LTE-LAA (*LTE Licensed Assisted Access*) ou LTE-Advanced Pro e comercialmente chamado de rede 4,5G está previsto a agregação massiva de até 32 CCs de 20MHz tanto no UL quanto no DL com avançados esquemas de modulação [85], [86]. No LTE-LAA a agregação de portadoras poderá ocorrer em espectro licenciado e não licenciado garantindo elevadas taxas de pico de dados aos usuários da rede móvel. Além da expansão do uso de CA diversas outras melhorias foram introduzidas no Release 13, como o suporte às aplicações IoT de banda estreita, alta eficiência espectral usando sofisticados arranjos de antenas (MIMO 16x2), beamforming e AAS (*Active Antenna Systems*) que fornecerão maior flexibilidade e desempenho ao sistema irradiante [86].

Do ponto de vista da padronização do 3GPP, a Fig. 31 apresenta a escala de evolução e as principais especificações introduzidas para melhorar significativamente o desempenho da funcionalidade CA. Do LTE-A Rel. 10 ao LTE-A Pro Rel. 13 mais CCs são introduzidas provendo larguras de banda cada vez maiores. O Rel. 13 pode ser considerado como a última versão LTE antes da era 5G, e suas características apresentam as formas preliminares das tecnologias 5G. O Rel. 14 já representa a fase

de estudos sobre soluções de rádio para redes 5G, mas o primeiro release de Quinta Geração de fato será o 15 aguardado para meados de 2018 [86].



**Figura 31 - Principais característica dos padrões 3GPP, [86][87].**

Os impactos correspondentes à vida útil da bateria nos UEs são evidentes quando a função CA está configurada ou ativa mesmo que não ocorra transferência de dados. Isso porque o móvel deve monitorar duas ou mais frequências, ativar hardware de RF e aumentar a atividade em banda base [88]. Para reduzir o consumo de energia e prolongar a vida útil da bateria, um temporizador de inatividade configurado pelo operador de rede no eNB desconecta a SCC ociosa evitando que o UE consuma energia enviando medições desnecessárias de CSI e CQI. No caso de curtas transferências de

dados a conexão de rádio gastará a maior parte do tempo esperando que o temporizador de inatividade expire para ocorrer a desativação de uma SCC, isso implica em um consumo maior consumo de energia. Este resultado indica que a propriedade de CA deve preferencialmente ser configurada somente quando o volume de dados transferido for relativamente grande [88]. Os valores de limiar de desconexão de uma SCC podem ser configurados para otimizar o desempenho do throughput do usuário, o consumo de bateria do UE e a utilização de recursos da interface aérea.

No cenário atual, a Agregação de Portadoras e o avanço das tecnologias MIMO são, as principais tecnologias para o desenvolvimento de redes LTE-Advanced, que atendam aos requisitos do IMT-Advanced com taxas de até 1 Gbps no enlace de *downlink*. No próximo capítulo dessa dissertação serão apresentados os cenários de testes, as características de uma rede real projetada para suportar uma agregação de até 3CCs de 20MHz e os principais indicadores de desempenho relacionados ao uso das técnicas mencionadas consoantes à fundamentação teórica exposta até o momento.

## Capítulo 4. Implementação de Redes LTE-A

Neste capítulo, inicialmente serão descritos os cenário de testes, equipamentos e métodos utilizados durante as medições, tendo como principal objetivo encontrar as máximas taxas possíveis em *downlink* propostas para uma rede de Quarta Geração Móvel, LTE-Advanced com a funcionalidade *Carrier Aggregation*, modo de operação FDD e arranjo de antenas SU-MIMO 2×2. Com esse propósito, dois testes foram realizados: um em modo emulado no laboratório de testes da Qualcomm em São Paulo para validar as capacidades do móvel Categoria 16 utilizado; o outro dentro do ecossistema móvel de uma operadora em ambiente *indoor* a partir de uma rede piloto, especificamente programada para os ensaios. Em seguida são apresentados os resultados e análises com diferentes indicadores e parâmetros de desempenho.

O cenário de testes emulado teve como premissa um modelo de rede próximo a realidade da disposição física instalada pela operadora. Dessa forma, optou-se para um cenário *Inter-Band CA*, com a utilização de 3CCs de 20MHz, não contíguas nas bandas B3 (1800MHz), B7 (2600MHz) e B28 (700MHz) seguindo as recomendações TS 36.306 [28]. Para os critérios de avaliação, adotou-se a configuração CA assimétrica, com um total de 60MHz de banda agregada no *downlink*; intervalo de tempo de transmissão (TTI) igual a 1ms que contém 14 símbolos OFDMA, cada um dos quais compreende 66,6µs de dados efetivos e Normal-CP ( $A_0 = 5,21\mu s$ ,  $A_{1-6} = 4,69\mu s$ ). Como o interesse principal era a taxa máxima em *downlink*, o PDCCH dentro do *subframe* é reservado apenas para o primeiro símbolo OFDMA e o sinal de dados mapeado para os símbolos restantes.

Diferentes parâmetros dos principais indicadores de qualidade, que permitem caracterizar o desempenho dos serviços suportados, foram utilizados no pós-processamento, tais como: SNR; RSRP (*Reference Signal Received Power*) que indica a potência do sinal recebido, *throughput* em *downlink* na camada física (PDSCH) e os relatórios de estado do canal baseado nas informações de *feedback* do UE, ou seja, avaliou-se o desempenho da AMC por intermédio dos relatórios de CQI. As condições de rádio foram determinadas medindo os níveis de RSRP e SNR. O RSRP ilustra a força do sinal na recepção e a SNR a qualidade do sinal experimentado pelo UE.

Com base na discussão do Capítulo 2, era de se esperar que os principais parâmetros que iriam ter um maior impacto no *throughput* fossem a largura de banda agregada, o valor do CQI condicionado à taxa de bloqueio BLER inferior a 10% e a configuração das antenas relativas à tecnologia MIMO. Por essa razão, a análise apresentada concentrou-se em variar esses parâmetros e avaliar o efeito nas máximas taxas de *throughput*.

Inicialmente, com a finalidade de registrar e comparar as máximas taxas de *throughput* em DL especificadas pelo 3GPP Rel-10, realizou-se uma simulação em modo emulado na plataforma Rhode&Schwarz CMW500 e um protótipo Qualcomm Categoria 16. Com base nos resultados emulados, uma eNB foi projetada e configurada com as mesmas características de largura de banda (60MHz) com três rádios distintos a operar nas bandas B3, B7 e B28, esquema MIMO 2×2 e licença para 256QAM em DL. Complementando as análises propostas, restrita ao uso do dispositivo da Qualcomm, um móvel Categoria 9 (Samsung Galaxy S-7 Edge, *3-way Carrier Aggregation*, MIMO 2×2, 64QAM) foi utilizado com a finalidade de explorar a capacidade e a cobertura da rede local programada.

## 4.1. Equipamentos de Testes e Softwares Utilizados

Os seguintes equipamentos e softwares foram utilizados nos experimentos:

- Móvel não comercial (protótipo) Qualcomm MDM9X50, Categoria 16, 256QAM, suporte MIMO 2×2;
- Móvel comercial Samsung Galaxy S-7 Categoria 9, 64QAM, suporte MIMO 2×2;
- Plataforma Rhode&Schwarz CMW500 (emulação rede LTE-Advanced);
- EnodeB Ericsson Dual\_RBS6000, capacidade de tráfego 1200Mbps equipado com três RRU (Remote Radio Unit) com faixas de operação nas bandas B3 (1800MHz), B7 (2600MHz) e B28 (700MHz) e potência máxima de 49dBm. Essa eNB foi implantada e configurada dentro da rede ativa da operadora em ambiente de ensaio controlado, cobertura exclusivamente *indoor*, livre da carga da rede e interferência das células vizinhas, permitindo estudos independentes nas bandas de interesse. O arranjo de antenas utilizado foi o SU-MIMO 2×2.

- Os parâmetros RSRP, CQI, SNR, modos de transmissão e *throughput*, foram registrados utilizando-se o *software* XCAL da Accuver. A partir desse ponto, no ensaio de rede real, inicializa-se o trabalho de pós-processamento dos relatórios com o objetivo de recolher as estatísticas desses parâmetros de interesse e identificar suas correlações de desempenho.
- Servidor Linux com banda dedicada de 1Gbps para geração dos pacotes pelo *software* *iperf*.

Para analisar as máximas taxas de *throughput* atingidas em ambos cenários (emulado e real), adotou-se a ferramenta de medição *iperf* como gerador de tráfego UDP em um servidor com banda dedicada de 1Gbps. O *iperf* é um *software* de uso livre capaz de avaliar o rendimento da banda de redes cabeadas ou sem fio por meio da geração de pacotes TCP (*Transport Control Protocol*) ou UDP (*User Datagram Protocol*) em uma topologia de rede *client-server*. Por padrão, o protocolo de transporte utilizado pelo *iperf* é o TCP, contudo, nos testes realizados optou-se pelo mecanismo de entrega não orientado à conexão, ou seja, o UDP, a fim de evitar os pedidos de confirmação (ACK) do protocolo TCP e enviar/receber os pacotes com o menor intervalo de tempo possível para medir o máximo *throughput* no receptor. Além disso, apenas no modo UDP é possível variar a banda de transmissão o que torna esse modo interessante para aplicações reais de rede, imitando de forma ímpar um modelo de tráfego de *buffer* completo comumente usado em simulações.

## 4.2. Primeiro Cenário: Modo Canal Emulado

Para configuração e análise da rede LTE-Advanced no modo FDD, e *Transmission Mode 3* (TM3, SU-MIMO 2×2 *open-loop*), emulou-se inicialmente em ambiente estático de laboratório na plataforma Rhode&Schwarz CMW500, uma rede composta por três 3CCs não contíguas no cenário *Inter-band CA* e um UE protótipo Qualcomm MDM9X50. A avaliação nessa primeira etapa visou aferir as capacidades do dispositivo móvel utilizado no cenário de Agregação de Portadoras em conformidade aos requisitos de um UE Categoria 16 (Tabela 2).

A canalização das três componentes de 20MHz utilizadas, nas bandas B3, B7 e B28 está apresentada na Tabela 15.

**Tabela 15 - Inter-Band com Tri-CA no DL e 60MHz de banda total agregada.**

E-UTRA CA Banda	E-UTRA Banda	Canal UL (EARFCNUL)	Canal DL (EARFCNDL)	Máxima Banda Agregada (MHz)		Modo
CA 3A_7A_28A	B3 (1800MHz)	1745,0MHz (19550)	1840,0MHz (1550)	20	60	FDD
	B7 (2600MHz)	2540,0MHz (21150)	2660,0MHz (3150)	20		FDD
	B28 (700MHz)	728,0MHz (27460)	783,0MHz (9460)	20		FDD

O UE utilizado para os testes foi o protótipo da MDM9X50 Qualcomm Categoria 16 capaz de suportar até 1Gbps no DL, 5CCs, com possibilidade de agregação de 100MHz nas bandas E-UTRA 1A, 3A, 7A, 8A e 28A. A leitura das mensagens RRC (*Radio Resource Control*) da camada 3 de rádio indicava as capacidades do UE. Nessas mensagens foi possível verificar a ordem de modulação suportada pelo UE (256QAM), como a possibilidade de uso do arranjo de antenas MIMO 2×2. A plataforma de testes CMW500 e o UE são apresentados na Fig. 32.



**Figura 32 - Analisador Rhode&Schwarz CMW500 e UE Qualcomm MDM9X50.**

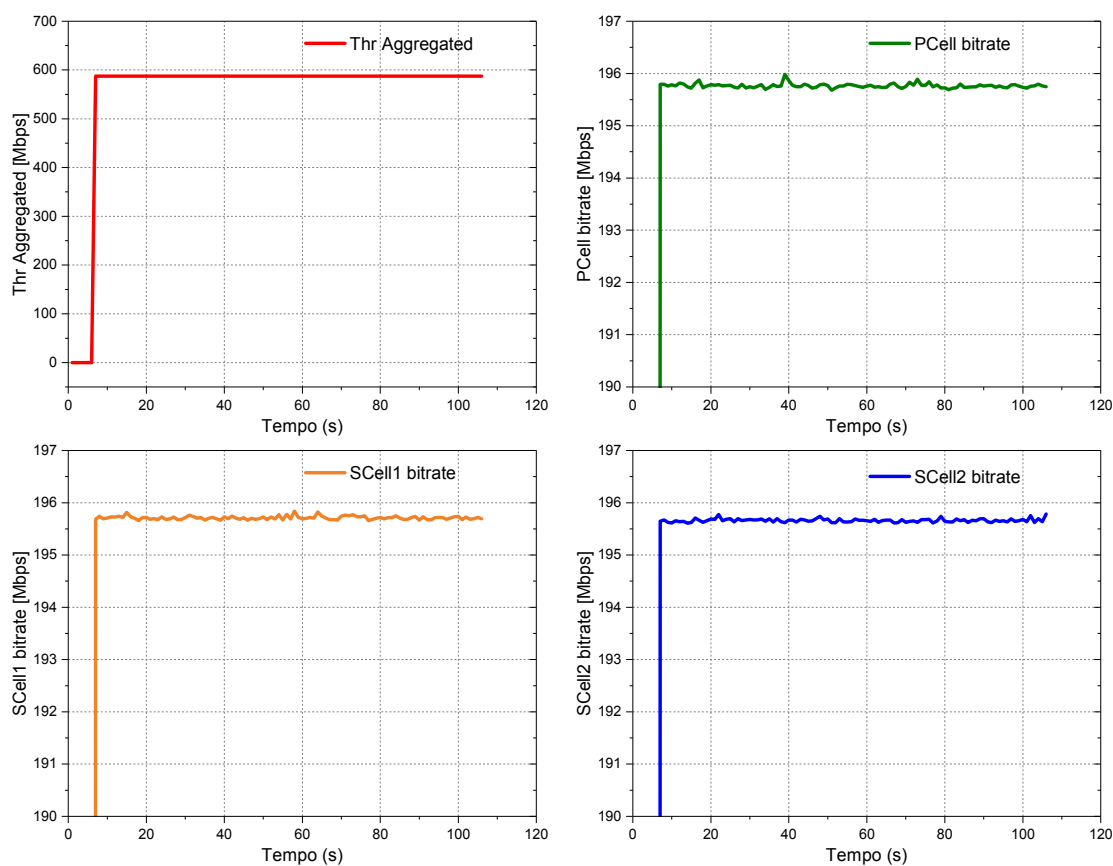
A Fig. 33 ilustra o comportamento da rede emulada no modo CA durante o intervalo de medição. A taxa agregada experimental obtida pelo CMW500 foi aproximadamente de 587Mbps, para uma condição de canal AWGN. Este valor está em concordância com a predição apresentada na Tab. 16. O gerador de tráfego *iperf* está incluso como uma aplicação da própria plataforma de testes, configurado em



modo UDP. As interfaces para as antenas do dispositivo foram conectadas diretamente ao CMW500 garantindo uma relação SNR elevada, constante e livre de interferências externas que poderiam comprometer as máximas taxas de *throughput* esperadas.

**Tabela 16** - Dados simulados no CMW500 na configuração Inter-Band.

	<b>PCC</b>	<b>SCC1</b>	<b>SCC2</b>
Banda 3GPP	B7	B3	B28
Canal (earfcnDL)	3150	1550	9460
Cell Bandwidth (BW)	20MHz	20MHz	20MHz
Frequência Central	2660,0MHz	1840,0MHz	783,0MHz
Potência Célula ( $P_{TX}$ )	-54,2dBm	-54,2dBm	-54,2dBm
MIMO DL	TM-3 Open Loop SM 2×2 (stream 1 = stream 2) / SU-MIMO		
Quantidade de RBs	100	100	100
Prefixo Cíclico	N-CP: 5,21µs [A=0] + 4,69µs [A=1-6]		
Modulação (TBS)	256QAM (33)		
Throughput por CC	195,792 Mbps	195,792 Mbps	195,792 Mbps
Throughput Total	<b>587,16Mbps</b>		



**Figura 33** - Throughput experimental para o cenário de canal emulado.

Considerando a Tab. 12, para uma ordem de modulação de 256QAM obtém-se os coeficientes:  $Q_m = 8 \mapsto I_{MCS} = 27 \mapsto I_{TBS} = 33$ . Entrando com esses valores na Tab. 13 resulta a transmissão de  $TBS\_1 = 97896\text{bits/TTI}$  (1ms) com a utilização de 100RBs (banda de 20MHz por CC). Na condição SU-MIMO 2x2, são dois TBs transmitidos e duas CWs multiplexadas sobre duas camadas espaciais (uma para cada CW) resultando em  $2 \cdot TBS\_1 = 195,792\text{Mbps}$ . Como são três CCs de 20MHz (300 RBs) a taxa teórica de dados alcançará a velocidade de 587,376Mbps, indicando que a rede LTE-Advanced proposta possui taxas de dados de pico convergentes para os padrões 3GPP. Portanto, o UE utilizado suporta as taxas ofertadas por uma rede *Tri-Band LTE-Advanced* com *Carrier Aggregation* e largura de banda global de 60MHz.

A Tab. 17 indica os principais parâmetros de capacidade do UE utilizado. Essas mensagens obtidas experimentalmente identificam as características do móvel como o suporte a *Carrier Aggregation*, as possíveis bandas das CCs, capacidade para MIMO e até mesmo a ordem de modulação suportada pelo móvel. Nas mensagens de capacidade pode-se verificar que o móvel suporta CA no *downlink* com até 5 diferentes componentes, nas bandas: B1 (2100MHz); B3 (1800MHz); B7 (2600MHz); B8 (900MHz) e B28 (700MHz), com suporte a MIMO 2x2 e capacidade de modulação de 256QAM em DL.

**Tabela 17 - Parâmetros de capacidades do UE Cat-16 MDM9X50 Qualcomm.**

Bandas Suportadas	Capacidade de CA e MIMO	Modulação
<pre>rf-Parameters supportedBandListEUTRA bandEUTRA 1, halfDuplex FALSE , bandEUTRA 3, halfDuplex FALSE , bandEUTRA 7, halfDuplex FALSE , bandEUTRA 8, halfDuplex FALSE , bandEUTRA 28, halfDuplex FALSE</pre>	<pre>bandEUTRA-r10 1, ca-BandwidthClassDL-r10 a, supportedMIMO-CapabilityDL- r10 twoLayers , bandEUTRA-r10 3, ca-BandwidthClassDL-r10 a, supportedMIMO-CapabilityDL- r10 twoLayers , bandEUTRA-r10 7, ca-BandwidthClassDL-r10 a, supportedMIMO-CapabilityDL- r10 twoLayers , bandEUTRA-r10 8, ca-BandwidthClassDL-r10 a, supportedMIMO-CapabilityDL- r10 twoLayers , bandEUTRA-r10 28, ca-BandwidthClassDL-r10 a, supportedMIMO-CapabilityDL- r10 twoLayers</pre>	<pre>rf-Parameters-v1250 supportedBandListEUTRA-v1250 dl-256QAM-r12 supported , dl-256QAM-r12 supported , dl-256QAM-r12 supported , dl-256QAM-r12 supported</pre>

### 4.3. Segundo Cenário: Modo Real de Rede LTE-Advanced

Essa seção apresenta a implantação de uma rede piloto 4G LTE-Advanced dentro do ambiente móvel real de uma operadora celular em regime controlado, cobertura *indoor* e baixa potência de transmissão ajustada em 30dBm por RRU (*Remote Radio Unit*), a fim de evitar interferências com os serviços existentes 4G ativos ou “vazamentos” (*leakage*) fora da banda, uma vez que os 20MHz de largura de banda utilizados por cada CC não estão licenciados para uso da mesma operadora. Essa rede não transportava nenhum tráfego comercial, possibilitando uma avaliação independente sobre as métricas utilizadas para o seu desempenho.

Como proposto no primeiro cenário, as medições nesse segundo ambiente também tinham como objetivo encontrar a capacidade máxima de *throughput* da rede, em adicional para um UE comercial Categoria 9 que utiliza o recurso de Agregação de Portadoras nas mesmas três faixas espectrais não contíguas programadas.

Para permitir que as 3CCs agregadas atingissem máximas taxas de *throughput* de 450Mbps e 600Mbps em cenários SU-MIMO 2×2, a taxa de bits máxima que os UEs deveriam receber do núcleo da rede 4G (*Evolved Packet Core*, EPC) tinha que ser maior ou no mínimo igual a 600Mbps. Além disso, os UEs utilizados deveriam cumprir aos requisitos do 3GPP Release 10 ou posterior e suportar as bandas de frequência propostas. A topologia de teste usada no laboratório é descrita nas Fig. 34. As medições ocorreram individualmente para cada tipo de UE utilizado.

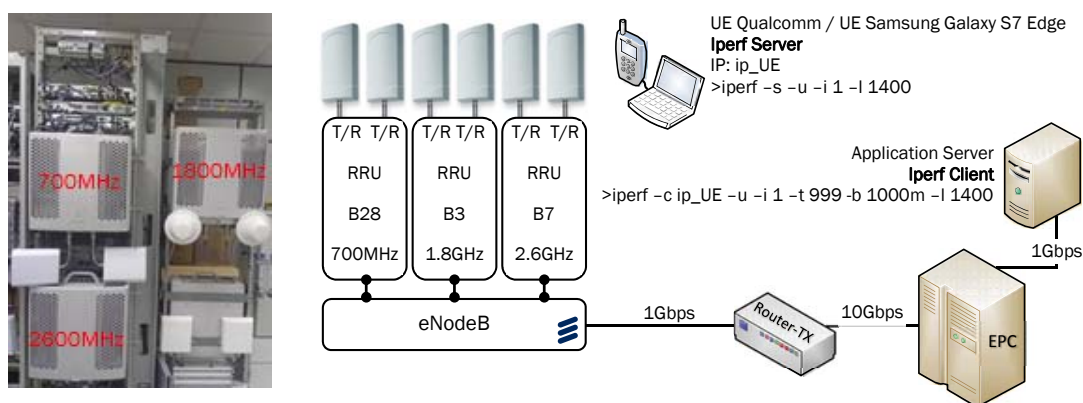


Figura 34 - Topologia experimental usada no laboratório.

Os principais parâmetros utilizados na programação do eNB piloto estão ilustrados na Fig. 35. A programação utilizou em DL as funções ativas de 256QAM (dl256QamEnabled), modo de transmissão TM3 (transmissionMode), a canalização utilizada (earfcnd1) e largura de banda por CC de 20MHz (dlChannelBandwidth) em três faixas de operação: B3, B7 e B28 (freqBand). Além disso, apresenta-se os *timers* de ativação da operação CA. Para uma rápida ativação das SCells, foi adotado um intervalo de tempo de 1000ms (waitForAdditionalSCellOpportunity). Os demais parâmetros estão de acordo com o padrão do fabricante (Ericsson).

```

=====
MO                               Attribute                               Value
=====
EUTranCellFDD=SLSPVM29A        EUTranCellFDDId                       SLSPVM29A
EUTranCellFDD=SLSPVM29A        dl256QamEnabled                         true
EUTranCellFDD=SLSPVM29A        dlChannelBandwidth                     20000
EUTranCellFDD=SLSPVM29A        earfcnd1                               9460
EUTranCellFDD=SLSPVM29A        freqBand                               28
EUTranCellFDD=SLSPVM29A        transmissionMode                       3 (TRANSMISSION_MODE_3)
EUTranCellFDD=SLSPVM29A        ulChannelBandwidth                     20000
EUTranCellFDD=SLSPVM29E        EUTranCellFDDId                       SLSPVM29E
EUTranCellFDD=SLSPVM29E        dl256QamEnabled                         true
EUTranCellFDD=SLSPVM29E        dlChannelBandwidth                     20000
EUTranCellFDD=SLSPVM29E        earfcnd1                               1550
EUTranCellFDD=SLSPVM29E        freqBand                               3
EUTranCellFDD=SLSPVM29E        transmissionMode                       3 (TRANSMISSION_MODE_3)
EUTranCellFDD=SLSPVM29E        ulChannelBandwidth                     20000
EUTranCellFDD=SLSPVM29I        EUTranCellFDDId                       SLSPVM29I
EUTranCellFDD=SLSPVM29I        dl256QamEnabled                         true
EUTranCellFDD=SLSPVM29I        dlChannelBandwidth                     20000
EUTranCellFDD=SLSPVM29I        earfcnd1                               3150
EUTranCellFDD=SLSPVM29I        freqBand                               7
EUTranCellFDD=SLSPVM29I        transmissionMode                       3 (TRANSMISSION_MODE_3)
EUTranCellFDD=SLSPVM29I        ulChannelBandwidth                     20000
=====
MO                               ENodeBFunction=1,CarrierAggregationFunction=1
=====
caPreemptionThreshold           50
caRateAdjustCoeff              5
caUsageLimit                   300
sCellActDeactDataThres        10
sCellActDeactDataThresHyst    7
sCellActDeactUlDataThresh     100
sCellActDeactUlDataThreshHyst 90
sCellActProhibitTimer         10
sCellDeactDelayTimer          50
sCellDeactOutOfCoverageTimer  100
sCellDeactProhibitTimer       200
sCellScheduleSinrThres        -25
waitForAdditionalSCellOpportunity 1000
waitForBetterSCellRep         1000
waitForCaOpportunity           2000
=====

```

**Figura 35** – Principais parâmetros na programação do eNB piloto.

A Fig. 36 ilustra o início do processo de coleta dos dados com um dos UEs conectado ao laptop no segundo andar onde estava localizado a eNB.



**Figura 36 - Equipamentos utilizados na coleta dos dados.**

Os móveis foram conectados a um laptop com a aplicação *iperf* inicializada no modo *server* (`> iperf -s -u -i 1`) e um servidor remoto Linux com banda reservada de 1Gbps conectado ao EPC da rede executando o *iperf* no modo *client*. Em seguida, foram enviados ao laptop fluxos contínuos de dados UDP, a partir do *Application Server* (`> iperf -c #ip_dispositivo_remoto# -u -i 1 -t 999 -b 1000m`), para manter o UE sempre no modo conectado e exigindo a alocação máxima dos 300RBs da banda total agregada pelo *scheduling* do eNB, simulando um modelo de tráfego de *buffer* completamente ocupado, comumente usados em aplicações de tempo real, como VoLTE (voz sobre LTE), transmissão de vídeo HD ou *real-time gaming*, por exemplo.

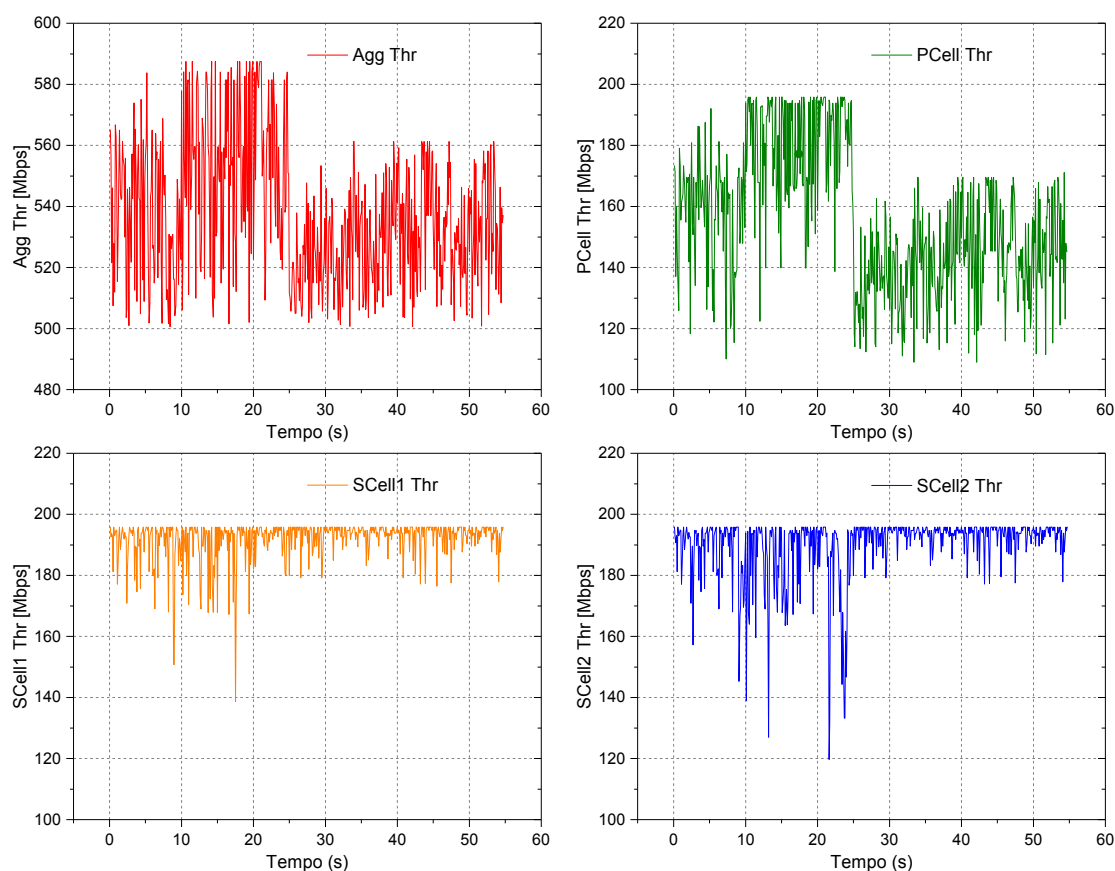
Para o UE Categoria 16 MDM9X50 Qualcomm, devido ao uso proprietário desse protótipo, foram registradas apenas as máximas taxas de cada CC em função do tempo e da BLER em modo estático, no qual o dispositivo encontrava-se no centro celular em linha de visada (LoS, *Line of Sight*) a 2mts das antenas. No caso do *smartphone* comercial *Samsung S7 Edge*, um dispositivo Categoria 9, além do registro das máximas taxas de *throughput* foi possível explorar outros indicadores de desempenho da rede LTE-A em modo LoS e NLoS (*No-Line of Sight*), como: a variação do *throughput* em função do número de antenas (modos SIMO 1×2 e MIMO 2×2), em função da SNR, em função da variação do RSRP e consequentemente em função dos relatórios de CQI informados pelo UE.

A eNB utilizada consistia em duas unidades de banda base (*MU, Main Unit*) com capacidade de processamento de 1200Mbps e três unidades de rádio remota RRU conectadas à MU pela interface ótica do *Common Public Radio Interface* (CPRI) a uma taxa de 2,5Gbps. Esta interface transmite informações de RF da MU para as RRU em formato digital e, em seguida, na RRU, ocorre a conversão do sinal óptico para RF, que alimentará as antenas. Uma unidade MU executa o gerenciamento de operação e manutenção, processamento de sinal em banda base para DL e UL, gerenciamento de recursos de rádio e interface para o *backhaul* da rede de transporte. As unidades RRUs, dentre outras funções de banda passante, realizam a modulação, demodulação, processamento do sinal OFDM, combinação e divisão de sinais da banda espectral e operação dos recursos de rádio. A conexão entre a eNB e o agregador da rede de transporte foi via fibra óptica com taxa de 1Gbps. Toda a transmissão de dados, na topologia de laboratório, era *full-IP*.

#### 4.3.1. Análise com UE Cat-16 MDM9X50 Qualcomm

A investigação experimental baseou-se no desempenho do UE MDM9X50 em função do *throughput* e da BLER em modo estático na situação de SU-MIMO  $2 \times 2$  e condição de LOS. A SNR manteve-se próxima a 30dB (CQI=15) garantindo uma ótima condição de rádio e possibilitando elevados valores para o índice MCS, em sua maior parte atingindo os coeficientes  $Q_m = 8 \mapsto I_{MCS} = 27 \mapsto I_{TBS} = 33$ , para as 3CCs. Desta maneira, PCell, SCell1 e SCell2 operavam com todas as subportadoras do canal OFDM moduladas em 256QAM.

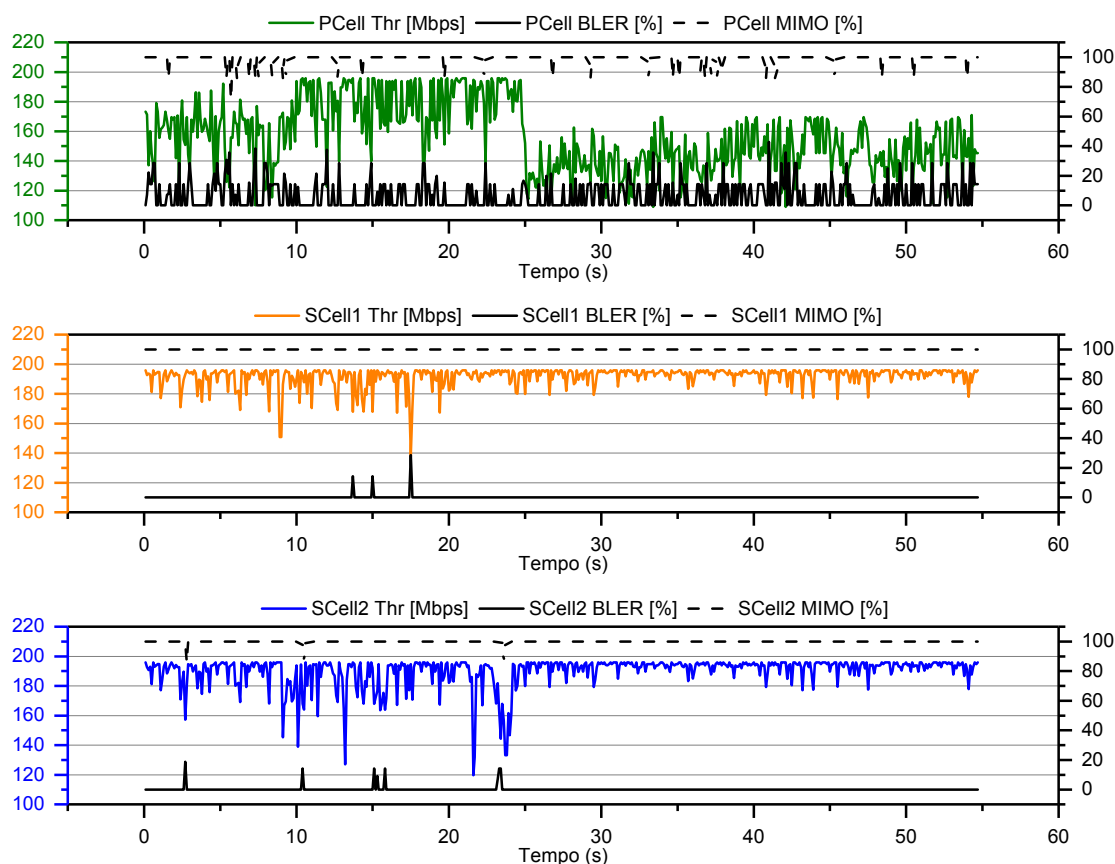
As Figs. 37 e 38 apresentam os resultados experimentais da investigação de desempenho em função das taxas de pico do *throughput* e da BLER, respectivamente. As taxas registradas da rede LTE-Advanced programada com CA, três componentes de 20MHz em uma rede piloto experimental, cenário SU-MIMO  $2 \times 2$  ( $rank=2$ , multiplexação espacial de duas camadas), TM3, resultaram em uma média de pico igual a 540Mbps. Isso significa um ganho relativo de aproximadamente três vezes quando comparado com uma rede LTE tradicionalmente implementada com apenas uma CC de 20MHz.



**Figura 37 - Throughput camada física na rede LTE-A,  $BW_{agg} = 60\text{MHz}$ .**

A Fig. 37 apresenta o rendimento máximo obtido em DL para a BW mencionada, na camada física de DL, medido nos canais PDSCH responsáveis pelo transporte de dados dos UEs. O débito máximo em DL obtido é resultante do tráfego processado em cada CC que compõe a banda agregada ( $BW_{agg} = 60\text{MHz}$ ). A cada TTI de 1ms os TBs são paralelamente processados pelo *scheduling* do eNB e enviados ao UE por cada CCs pelos canais espaciais MIMO. Por se tratar de uma configuração SU-MIMO piloto, as taxas obtidas representam os máximos de velocidade sem a carga concreta de tráfego de uma rede real, mas validam as taxas de *throughput* propostas para uma rede LTE-A utilizando as propriedades Agregação de Portadoras e MIMO como melhorias técnicas para elevar a capacidade de transmissão.

A maioria das transmissões de DL capturadas foram baseadas no modo de transmissão TM3, que suporta transmissões MIMO com uma (TxD) ou duas (SM) *codewords* para uma maior resiliência e capacidade respectivamente. Especificamente, na Fig. 38 pode-se notar a utilização aproximadamente 100% no modo SM.



**Figura 38 - Throughput, Utilização MIMO e taxa de BLER para cada CC.**

Por outro lado, a BLER é um indicador de desempenho responsável por condicionar as taxas de *throughput* em DL; normalmente definida como uma probabilidade máxima de bloqueio de 10% para uma rede LTE [89]. A BLER informa quão bem-sucedido é a transmissão dos dados na camada física. Está estreitamente relacionada a qualidade do sinal de rádio recebido pelo UE, desde a ineficiência de cobertura, interferências, a falhas na adaptação da ligação, equipamentos ou configuração de rede. Se for alta, mais pacotes serão descartados, e serão necessárias retransmissões adicionais, diminuindo a taxa de transferência.

Os resultados apresentados na Fig. 38 indicam as taxas de *throughput* de pico obtido em cada uma das CC em função do tempo. Nesse gráfico e nas curvas da Fig. 39 ocorre ativação e desativação das CC em frações de milissegundos executados pelas mensagens de reconfiguração do protocolo RRC da interface aérea, indicadas pelos vales ao longo do período de observação. A ativação de uma SCell ocorre, por exemplo, quando os dados no *buffer* da eNB excedem um limiar específico ou pela



programação de temporizadores. Esses valores de limiar (*thresholds*) podem ser configurados pelo operador para otimizar o desempenho do *throughput* do usuário, o consumo de bateria do UE e a utilização de recursos da interface aérea. Nos testes, para agilizar a conexão RRC, a cada 1s o *scheduling* da eNB foi programado para permitir a reconfiguração de mais SCells.

No que diz respeito à utilização do MIMO, cada CW foi transmitida no modo SM por todo período, como pode-se observar no gráfico da Fig. 38. Um fato interessante ocorre na PCell: desde o início das medições essa CC está com o piso de BLER mais elevado que as outras CCs e a partir dos 25s de testes ocorre uma queda de *throughput* de 190Mbps para uma média de 140Mbps. Essa queda se reflete também no desempenho do *throughput* global da Fig. 37, uma vez que o *throughput* final é a soma das taxas individuais produzidas por cada CC. Como o MIMO ainda continuou a operar em modo de multiplexação, uma análise mais detalhada revelou a origem dessa redução, provocada por valor elevado do parâmetro *VSWR* (*Voltage Stand Wave Ratio*) em um dos ramos de conexão da antena para o RRU (`VSWR Over Threshold AuxPlugInUnit=RRU-3, DeviceGroup=ru, RfPort=A ReturnLoss 13.2 dB, VSWR 1.6, Sensitivity 100%`). Consequentemente, ocorre a queda do MCS e redução nas taxas de dados produzidas pela PCell. Corrigido esse problema, não se observou mais quedas inesperadas durante os períodos de medição.

O modelo utilizado considerava uma combinação do padrão 3GPP de 3CCs de 20MHz *inter-band CA* resultando uma elevada taxa de transferência com todos os 300RBs dedicados a um único UE nas condições de RF quase ideais. Esses resultados comprovam que, com poucas modificações e programações adicionais, a Agregação de Portadoras pode ser implementada com êxito nas redes LTE existentes, permitindo uma maior taxa de transferência, capacidade e balanceamento de carga entre as suas CCs, garantindo equidade para os usuários da rede em termos de oportunidade de transmissão e alocação de tráfego.

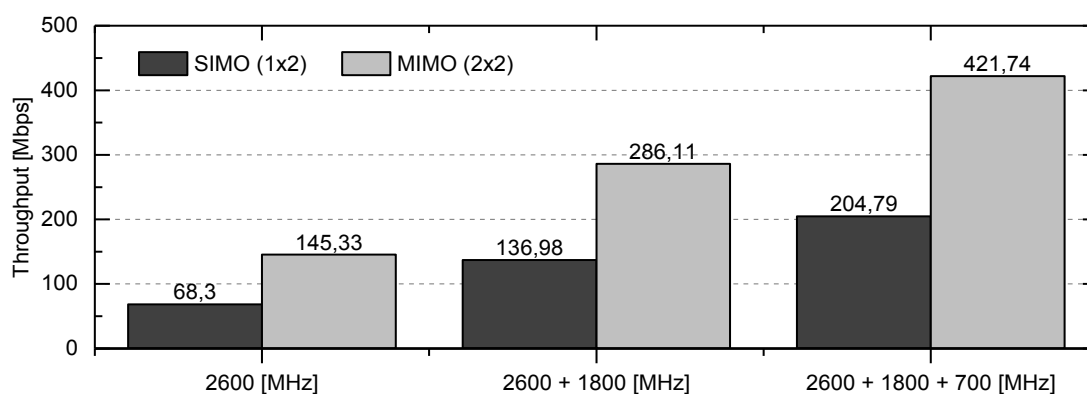
#### 4.3.2. Análise com UE Samsung Galaxy S7 Edge

Comprovado o êxito da programação aplicada a eNB utilizada no cenário anterior, novas possibilidades para avaliar o desempenho da rede piloto foram

investigadas com o uso do móvel Samsung Galaxy S7 Edge. Um modelo comercial e muito utilizado em testes de Tri-CA, capaz de processar o arranjo MIMO 2×2 com modulação 64QAM em DL. Embora as taxas fossem limitadas ao seu hardware, esse modelo apresentou bom desempenho na taxa de *throughput*, próxima a 450Mbps teórica, conforme apresentado na Tab. 14.

A primeira análise será apresentada para modo estacionário em condição de LoS com o móvel disposto a dois metros das antenas, nos mesmos padrões utilizados para o UE do caso anterior. A configuração TM3 *Dynamic Open-Loop MIMO* foi aplicada a eNB para permitir a comutação dinâmica entre os modos TxD e SM dependendo das condições da qualidade do canal de RF no atual TTI. Neste caso, o UE reporta o RI detectado para apoiar a comutação dinâmica entre TxD e OLSM.

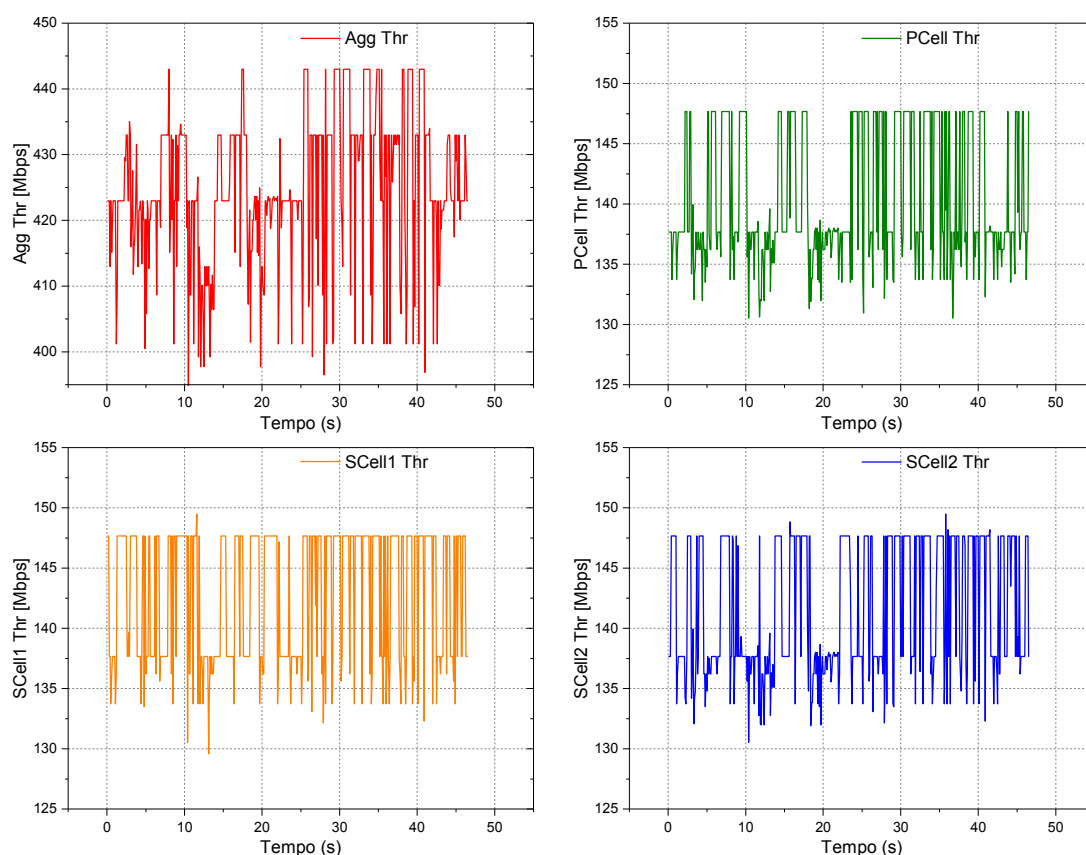
A Fig. 39 compara o efeito do sistema de antenas utilizado nas taxas de *throughput*, na presença de um canal SIMO 1×2 e para um canal MIMO 2×2. Como visto na seção 3.1, o RI indica o número de camadas de transmissão úteis quando a multiplexagem espacial MIMO é usada. Para produzir um canal SIMO com RI igual a 1 (TM1) e explorar as características de diversidade espacial, foi necessário o bloqueio de um dos ramos de transmissão da unidade de rádio (RRU) conectado à antena para cada uma das CC do sistema. Os resultados para o esquema SIMO 1×2 representam a transmissão de uma única CW, ou *streams* de dados, por uma única camada espacial com taxas próximas às teóricas mencionadas na Tab. 14 para uma, duas e três CCs de 20MHz. No caso MIMO 2×2 TM3 (RI = 2), são transmitidas duas *codewords* distintas ao mesmo tempo e ambas compartilham os mesmos parâmetros de configuração, levando ao dobro do rendimento máximo do sistema conforme pode ser observado.



**Figura 39** - *Throughput camada física para os modos SIMO e MIMO.*

Os resultados da Fig. 39 demonstram que a taxa de transferência dependerá do número de antenas transmissoras e dos *streams* (CWs) de dados transmitidos condicionados à qualidade do canal de RF. Em um ambiente dispersivo, por exemplo, as ondas de RF se recombinaem de forma construtiva ou destrutiva no receptor, criando variações na amplitude e fase do sinal transmitido devido ao desvanecimento e aos retardos de propagação ocorridos nos múltiplos percursos. Ao contrário dos sistemas convencionais, os sistemas MIMO aproveitam essas variações para atingir características de espalhamento e alta SNR ao mesmo tempo, de modo que a qualidade (BER) ou a taxa de *throughput* para cada usuário MIMO será melhor que sistemas SISO ou SIMO.

A Fig. 40 apresenta o ganho em *throughput* no DL nas taxas de transferências acumuladas pela *PCell* mais as *SCells* medido em condição de LoS na camada física sobre os canais PDSCH para o caso MIMO 2×2 TM3 para sistemas LTE-Advanced com a funcionalidade CA, utilizando o móvel Categoria 9.



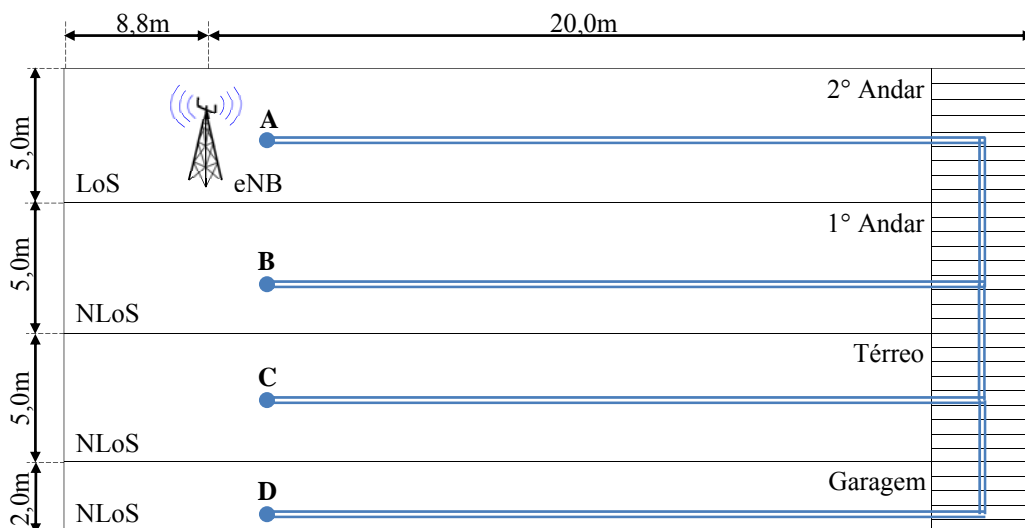
**Figura 40 - PDSCH Throughput para o UE Samsung Galaxy S7.**

Os dados na Fig. 40 determinam um resultado esperado, que o throughput em DL com CA é aproximadamente igual à taxa em DL sem CA multiplicada pelo número de CCs utilizado na agregação, para uma mesma largura de banda utilizada pelas CCs. Devido à excelente condição de rádio (SNR  $\approx$  30dB) a modulação 64QAM (CQI-15) foi utilizada quase que 100% do tempo para todas as CCs atingindo picos de até 443Mbps. As quedas no *throughput* ilustram as possibilidades da ativação e desativação das SCells, uma falha no *packet scheduling*, uma taxa de BLER superior a 10% ou utilização de apenas um canal MIMO (TxD).

A segunda análise tinha como objetivo a obtenção das características da transmissão de rádio em função dos níveis da SNR, RSRP e CQI; sempre observando as taxas de transmissão da camada física tomadas sobre os canais PDSCH. As amostras são registradas para o estado do móvel conectado. Para capturar essas características variáveis do canal de RF, restritas à cobertura *indoor*, foi necessário o deslocamento entre os andares do prédio. Diversas medidas foram tomadas e o processamento final concentrado nas amostras mais relevantes. Este estudo ainda considera o TM3 SU-MIMO na configuração *Dynamic Open-Loop*, com suporte a uma ou duas CWs e taxas de pico nas condições de canal relacionadas. Neste modo, o móvel se adapta para usar o melhor modo de transmissão, TxD ou SM, para as condições atuais do canal. Para evitar qualquer interferência externa nas bandas utilizadas as eNBs ativos vizinhos à cobertura de interesse foram mantidos bloqueadas durante o percurso *indoor*.

A Fig. 41 ilustra o *layout* do ambiente de medição e o local onde a eNB e as antenas foram colocadas, juntamente com as posições estáticas [A-B-C-D] detalhados e rotas onde as medidas foram realizadas. Os andares são classificados em LoS e NLoS e as medidas tomadas de acordo com as condições do canal RSRP e SNR. Os andares do prédio são constituídos de áreas abertas e salas com divisórias em madeira típicas de instalações de escritórios. A maior parte da rota percorrida não é iluminada diretamente pela eNB, nesse caso era de se esperar um grande número de reflexões, ou seja, um ambiente altamente dispersivo. Neste ambiente, vários fluxos do sinal modulado podem ser atribuídos a diferentes camadas espaciais, a fim de obter maior rendimento. O móvel foi lentamente deslocado entre os andares para caracterizar um canal EPA (3km/h) do 3GPP seguindo as rotas destacadas no *layout*. A Tab. 18

descreve as condições do canal em detalhes para os ambientes de medição em mobilidade de conforme ilustrado na Fig. 41.

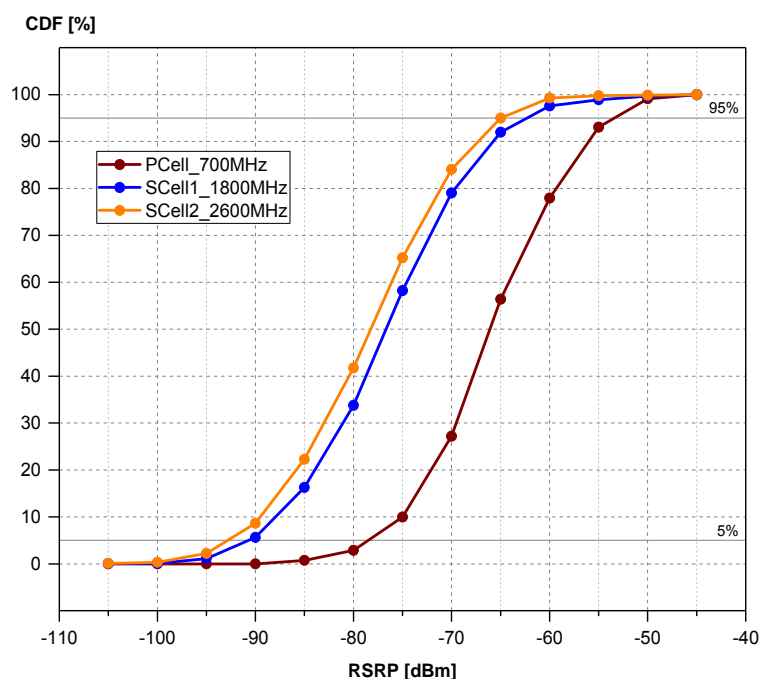


**Figura 41** - Layout da cobertura indoor no cenário com mobilidade.

**Tabela 18** - Classificação dos ambientes.

Local	Canal	Classificação	RSRP [dBm]	SNR [dB]
2º Andar	LoS	Excelente	$-60 < \text{RSRP} < -50$	$25 < \text{SNR} < 30$
1º Andar	NLoS	Bom	$-85 < \text{RSRP} < -60$	$20 < \text{SNR} < 25$
Térreo	NLoS	Fraco	$-100 < \text{RSRP} < -85$	$10 < \text{SNR} < 20$
Garagem	NLoS	Borda da Célula	$-130 < \text{RSRP} < -100$	$-10 < \text{SNR} < 10$

A análise do comportamento da rede a partir das medições de varredura de RF determina um modelo estocástico, descrito por variáveis aleatórias com distribuições de probabilidades tipicamente utilizado para detectar problemas relacionados a RF e compreender a natureza da área de cobertura do teste. As distribuições das Figs. 42 e 43 representam, dessa forma, a função de densidade acumulada (CDF, *Cumulative Distribution Function*) para os indicadores de cobertura (RSRP, média linear das contribuições de potência recebida em Watts) e qualidade do canal de RF (SNR) da rede LTE-A para as três CCs agregadas, medidos nas condições de mobilidade entre os andares do prédio como ilustrado anteriormente na Fig. 41. Já a Fig. 42 reporta uma comparação da CDF dos níveis RSRP obtidos nas amostras dos pacotes de RF nas bandas B7 (2600MHz), B3 (1800MHz) e B7 (1800MHz).



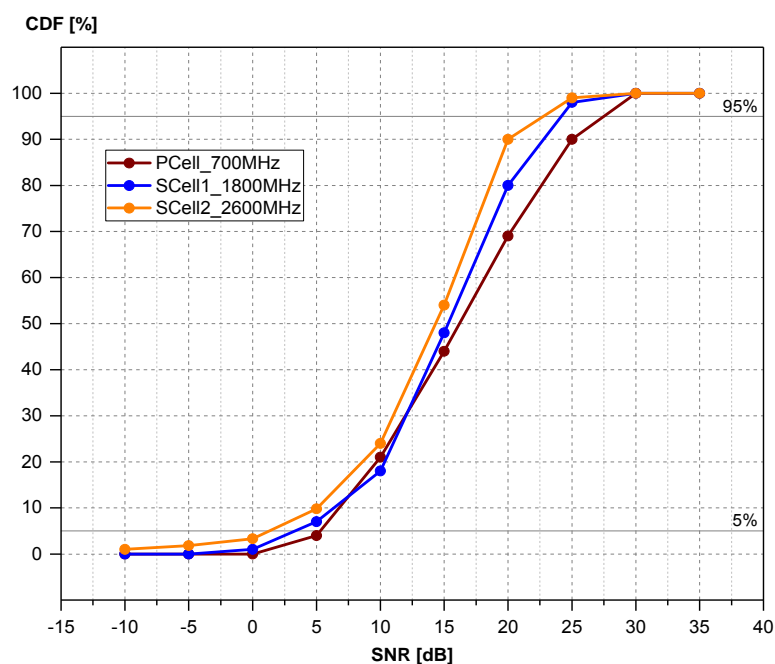
**Figura 42** - CDF das medidas de RSRP em DL para as três CCs.

O gráfico da CDF permite descrever a probabilidade acumulada de uma determinada variável aleatória e fornece dados importantes sobre o desempenho geral do sistema analisado e como seus recursos estão distribuídos. Na avaliação do canal de RF, por exemplo, os UEs acumulados até o 5º percentil são definidos como usuários na borda da célula e podem apresentar algum nível de degradação no indicador de qualidade estudado. O mesmo pode ser configurado para usuários de alto desempenho, situados em algum ponto inferior ao raio de cobertura da célula, identificados no percentil 95, e usuários com desempenho médio no percentil 50.

Observa-se no gráfico da Fig. 42 que 5% das amostras para SCell1 registraram níveis de RSRP inferiores a -90dBm e -92,91dBm para SCell2, enquanto para a componente de 700MHz a potência recebida pelo UE apresentou amostras abaixo de -78,5dBm. Isso acontece devido às diferenças de atenuação associadas a cada banda, uma vez que as CCs mais elevadas possuem maior atenuação, a potência recebida no UE será menor. Essas medidas ocorreram entre os pisos da garagem e o andar térreo classificando o cenário com baixa cobertura celular. O valor médio da SCell2 é 12,22dB menor do que as amostras obtidas para a PCell e apenas 1,62dB inferior às amostras da SCell1. Em outras palavras, metade das amostras de RSRP para a SCell2 estão abaixo dos -78,27dBm, para a SCell1 inferiores à 76,65dBm e para a PCell

abaixo dos -66,05dBm, indicando a partir desse percentil bons níveis de cobertura para as três CCs no percurso entre o 1° e 2° andar do prédio. Já no segundo andar, a cobertura foi excelente com variação muito pequena entre os níveis de RSRP medidos por cada CC, resultando em amostras de RSRP de -65, -62,37 e -53dBm para SCell, SCell1 e PCell, respectivamente.

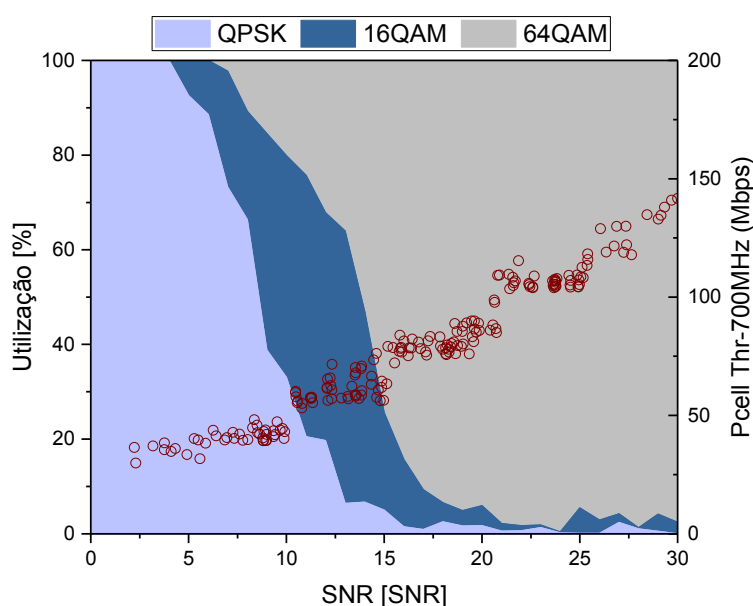
A Fig. 43 ilustra a CDF dos níveis SNR obtidos nas amostras dos pacotes de RF para as três CCs. Os resultados mostram que cerca de 20% das medidas da SNR estão abaixo dos 10dB. As amostras de SNR são registradas como a média das duas CWs (símbolos modulados) transmitidas por uma ou múltiplas camadas do canal de transmissão formado pelo arranjo de antenas MIMO. Os valores para o limite celular (5%) são de 1,21dB na SCell2, 3,36dB na SCell1 e 5,35dB na PCell. Em termos de eficiência espectral, baseado na equação 9 e adotando os coeficientes  $\eta \cdot BW_{eff} = 0,83$ ;  $SNR_{eff} = 1,6$  segundo a referência [23], resulta em: 1,44bps/Hz na SCell2, 2,06bps/Hz na SCell1 e 2,74bps/Hz na PCell. Vale salientar que esses são resultados máximos teóricos sobre um canal AWGN e são, na realidade, demasiadamente otimistas em redes práticas, nas quais a variabilidade de larga e pequena escala no sinal modulado face às interferências do ambiente de propagação podem afetar significativamente a taxa de transmissão.



**Figura 43** - CDF das medidas de SNR em DL para as três CCs.

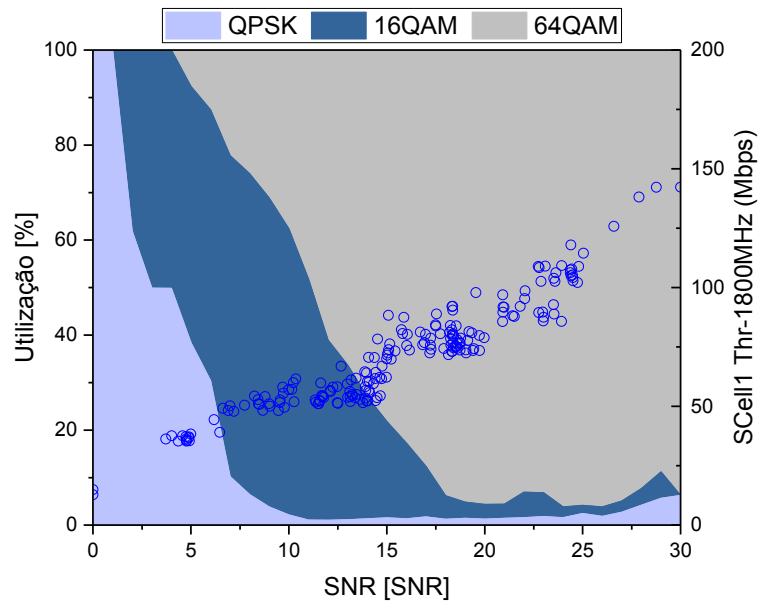
Idealmente, quanto mais deslocados para a direita estiverem as curvas de RSRP e SNR, maior será a tendência de se obter taxas de *throughput* próximas ao débito binário máximo por cada CC, em vista de melhores condições de RF do canal. Uma análise mais detalhada da Fig. 43 revela que aproximadamente 50% das amostras encontram-se acima dos 15dB na rota percorrida entre os pisos do prédio. Para essa relação sinal-ruído, a modulação nas três CC será 64QAM resultando em elevados índices ( $I_{MCS}$ ) para operação da AMC. Como visto na seção 2.5, no que diz respeito às ordens de modulação, com base no CQI relatado, o *scheduler* do eNB seleciona um apropriado MCS que será atribuído ao usuário. O padrão 3GPP permite índices MCS de 0-31 (Tab. 12). A faixa do MCS de 0-9 permite a modulação QPSK mais robusta, de 10-16 permite a modulação 16QAM, de 17-28 permite o uso da modulação 64QAM com elevada eficiência espectral e a uma faixa reservada de 29-31 permite uma operação especial durante períodos de retransmissões [50]. Por consequência, espera-se que para índices do  $I_{MCS}$  acima de 17 resultem em elevados valores de *throughput*.

Nas Figs. 44, 45 e 46 pode-se verificar a operação da AMC em função da SNR com as respectivas amostras de *throughput*. Tal como seria de esperar, à medida que SNR aumenta, a qualidade do sinal melhora e a adaptação da ligação permite o uso de modulações com maior eficiência espectral. Algum tráfego QPSK registrado acima dos 15dB é devido a presença de canais de controle e sinalização do quadro OFDM.

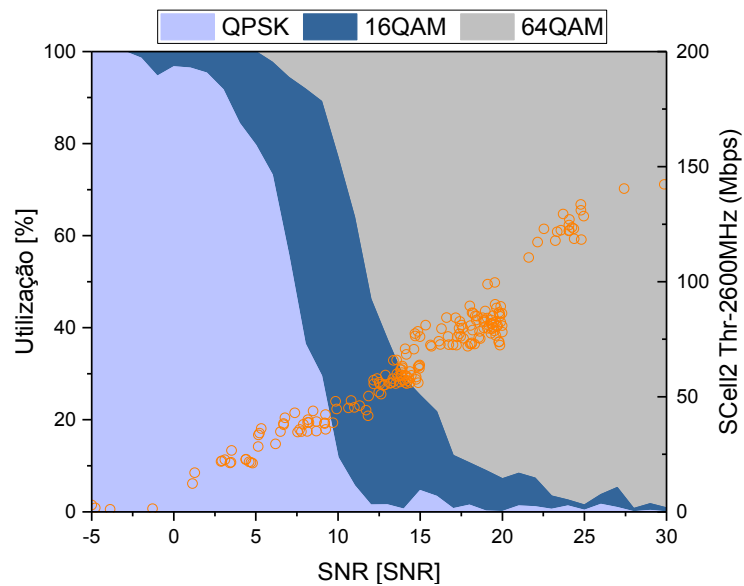


**Figura 44** - Operação da AMC e amostras de *throughput* para PCell-700MHz.





**Figura 45** - Operação da AMC e amostras de throughput para SCell1-1800MHz.

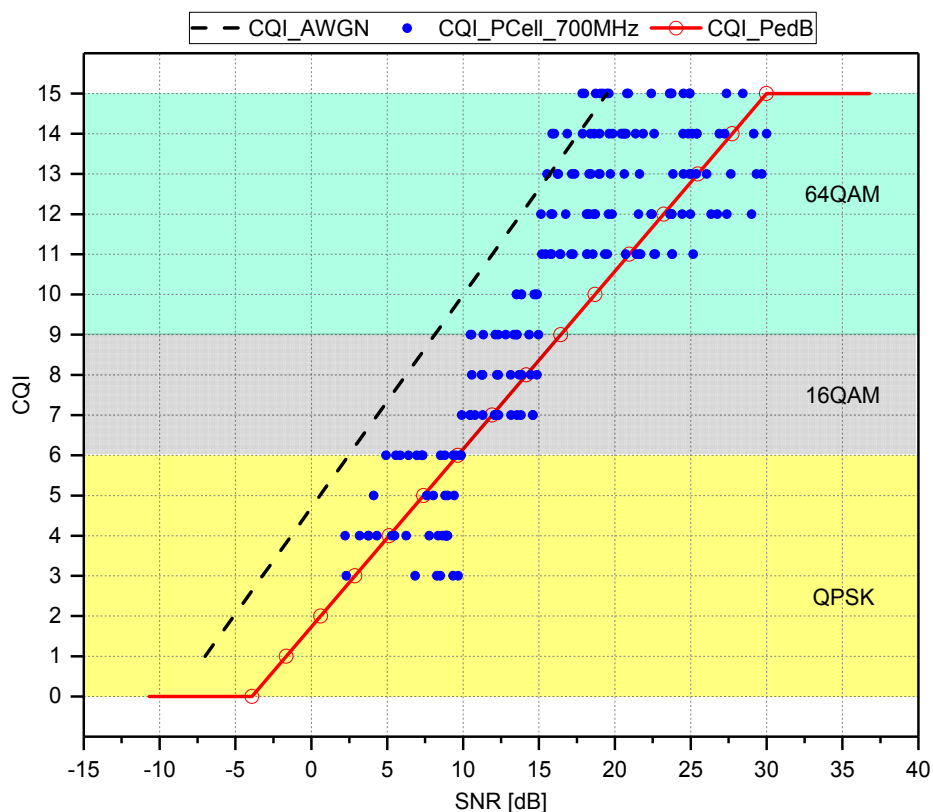


**Figura 46** - Operação da AMC e amostras de throughput para SCell2-2600MHz.

Uma outra forma de comparar a mudança na taxa de modulação é analisar o comportamento do CQI em função da SNR. O CQI, na verdade, é uma medida da eficiência do regime de modulação e taxa de codificação prevista para ser suportada por um UE. Também pode ser interpretado como um indicador de desempenho de cobertura, pois retrata a qualidade do canal de rádio móvel na banda que o UE está conectado. Da discussão exposta na seção 2.5, a média de cada índice CQI apresentou uma relação aproximadamente linear com a SNR. Caso contrário, vão existir

problemas nas taxas de transferência e vazão máxima que serão menores que o oferecido pela célula LTE-A.

A curva em vermelho das Figs. 47, 48 e 49 traduz a qualidade do canal experimentada pelo UE em função do nível de interferência do canal de rádio para um usuário com baixa mobilidade (deslocamentos inferiores à 3km/h) em um modelo de propagação mais realista (PedB, *Pedestrian B*) definido pelo 3GPP [50]. A linha preta pontilhada é a simulação para um canal teórico com Adição de Ruído Branco Gaussiano apresentado na Tab. 8 da seção 2.5. As estimativas do canal, são informadas pelos CQIs que englobam uma avaliação da qualidade do canal para toda a banda calculado apenas pela CW0. Como pode ser observado, os valores mais elevados das amostras de CQI em função da SNR indicam a eficácia nos processos da AMC com base no MCS. Em condições mais favoráveis do canal de rádio pode-se verificar o uso de MCS mais elevados. Valores de CQI mais baixos implicam em MCS menos eficientes, mas mais resistentes. À medida que o móvel se aproxima do centro celular a SNR melhora e a modulação 64QAM prevalece.



**Figura 47** – Amostras SNR-CQI da PCell (700MHz).

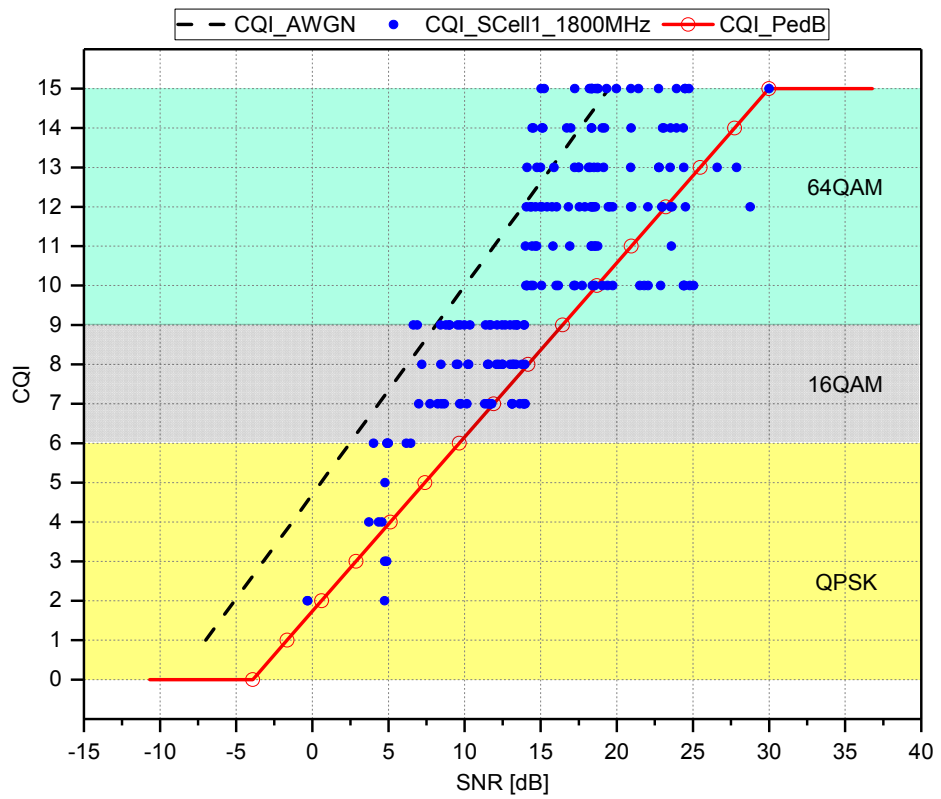


Figura 48 - Amostras SNR-CQI da SCell1 (1800MHz).

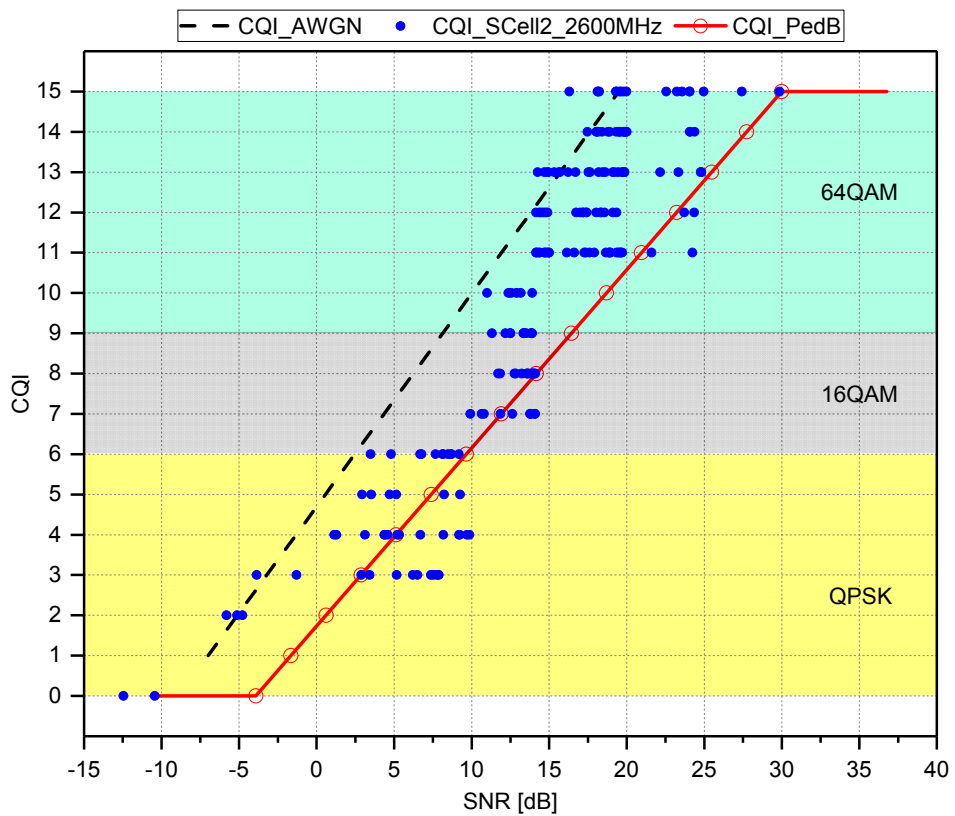


Figura 49 - Amostras SNR-CQI da SCell2 (2600MHz).

Nas Figs. 47, 48 e 49 o mapeamento entre CQI e SNR reflete uma relação linear sobre a qualidade de sinal da ligação descendente bem como a eficiência do algoritmo para atribuição dos RBs da eNB. Esse índice determina a melhor escolha do MCS pelo *scheduler* da eNB que vai ser utilizada na comunicação em DL de acordo com as condições atuais de RF. Basicamente, o CQI representa o valor da SNR com erros e atrasos acrescentados nas atuais condições do canal de RF. Quanto maior o valor do CQI recebido pela eNB, maior será o MCS selecionado pelo *scheduler* e, por consequência, maiores taxas de transferência serão atingidas por cada CC.

Na condição de borda da célula ( $-10 < \text{SNR} < 10$ ), valores de CQI abaixo de 6 são registrados para todas as CC, o que significa uma constelação com poucos símbolos, possivelmente QPSK, para manter a taxa de erro de bit a níveis aceitáveis de tal forma que o receptor possa decodificar corretamente a sequência de bits transmitida. A Fig. 50 apresenta os resultados nas taxas de DL em função do CQI para as três CCs.

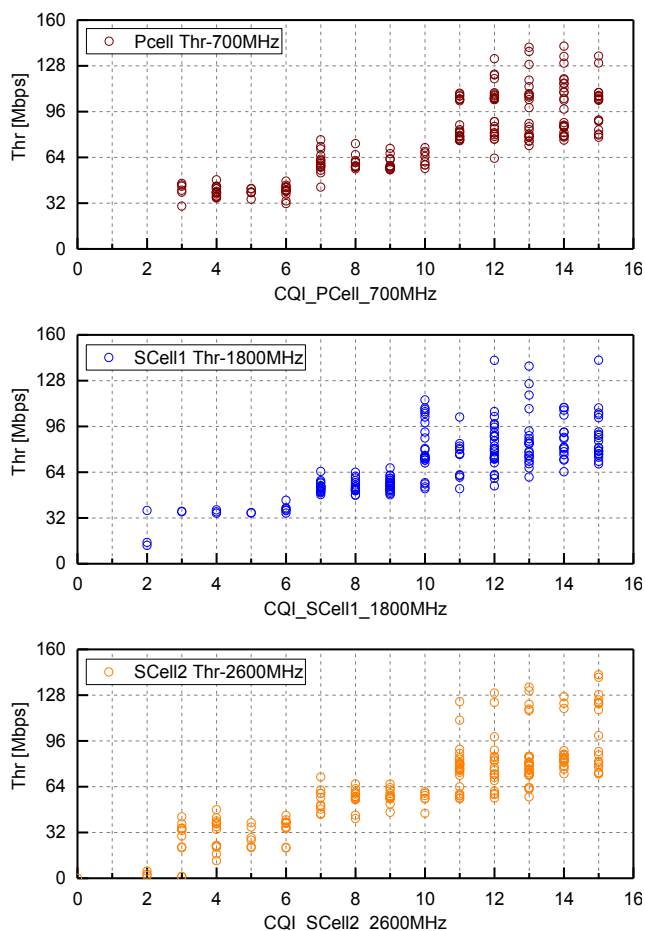


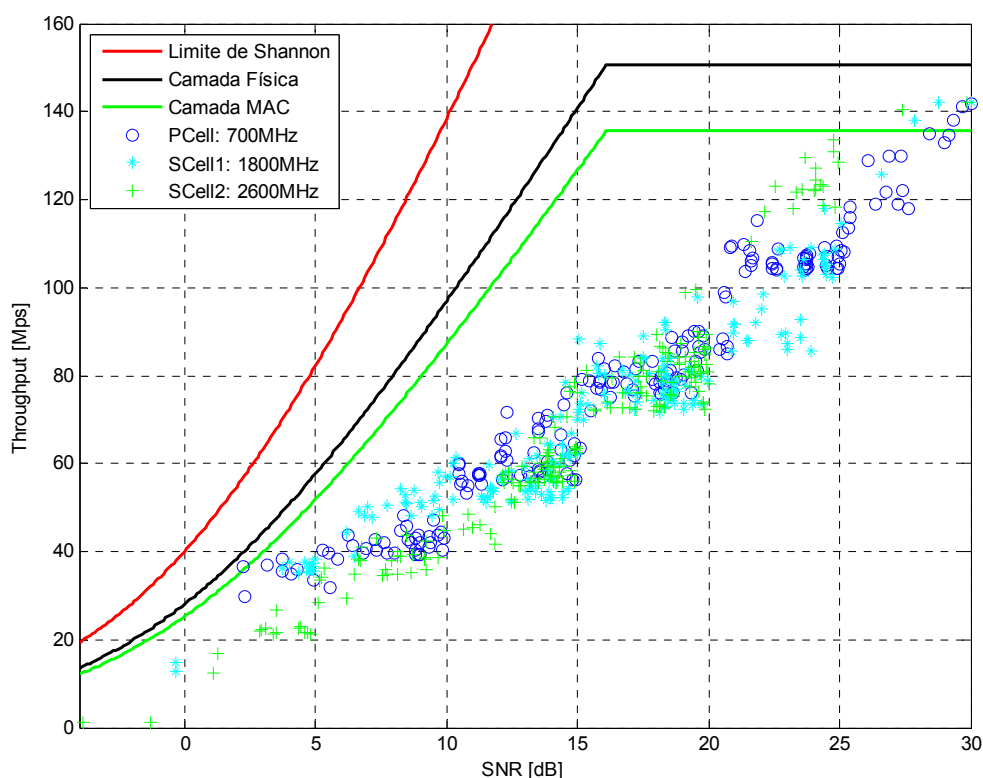
Figura 50 - Amostras de throughput em função do CQI.

As estatísticas do CQI indicam que a CC de 700MHz possui uma melhor condição do canal que as CC nas bandas de 1800MHz e 2600MHz. É possível encontrar amostras com nível da SNR abaixo de 0dB, região de severa degradação da SCell1 e da SCell2. Na portadora de 2600MHz foram registradas amostras com CQI igual a zero, apontando uma grande probabilidade de bloqueio na camada de transporte de *downlink* (BLER), conforme discutido na seção 2.5.

A função de adaptação do MCS, por meio da AMC executada pela camada MAC, para combater as degradações na qualidade do canal móvel pode ser verificada, para o valor do CQI igual a 12 na PCell. Esse ponto indica uma variação nas taxas de *throughput* de aproximadamente 70Mbps. Como resultado, a eficiência espectral pode variar a par dos níveis de modulação e da taxa de codificação consoante as condições do canal de tal forma que o UE possa operar no esquema de transmissão mais eficiente suportado em cada TTI. Idealmente, a configuração aplicada na próxima transmissão será a combinação de MCS e número de RBs atribuídos pela eNB mais perto da eficiência criada pelo CQI, limitada pelo objetivo da BLER abaixo de 10%.

No que diz respeito à intensidade do sinal, a avaliação apenas do CQI não dá uma imagem clara da área de cobertura, mas indica a qualidade do canal de RF dentro dessa área. Um ponto de medição próximo ao eNB pode registrar um CQI menor em comparação com um ponto mais distante. Essa diferença é traduzida como uma variação da qualidade do canal, que é uma consequência da variação dos parâmetros do canal além do SNR, tudo dependendo do ambiente de rádio.

A Fig. 51 ilustra como a taxa de *throughput* medida varia com a relação SNR e sua comparação com o limite teórico de Shannon, linha vermelha, para uma largura de banda de 20MHz por CC dado pela equação 9 da seção 3.4. O limite da camada física (PDSCH *throughput*), linha preta, foi calculado com um fator de sobrecarga  $\{\eta \cdot BW_{eff} \approx 0,7\}$ , conforme indicado na Tab. 11, teoricamente mais preciso para sistemas com abordagem MIMO 2x2 e taxa teórica máxima de 150,752Mbps segundo a Tab. 11 para uma modulação 64QAM e taxa de codificação 9/10 (5,4bps/Hz). A curva verde corresponde às possíveis taxas de retransmissões na camada MAC limitadas a uma BLER de 10%.



**Figura 51** - Amostras de Throughput da camada física por CC.

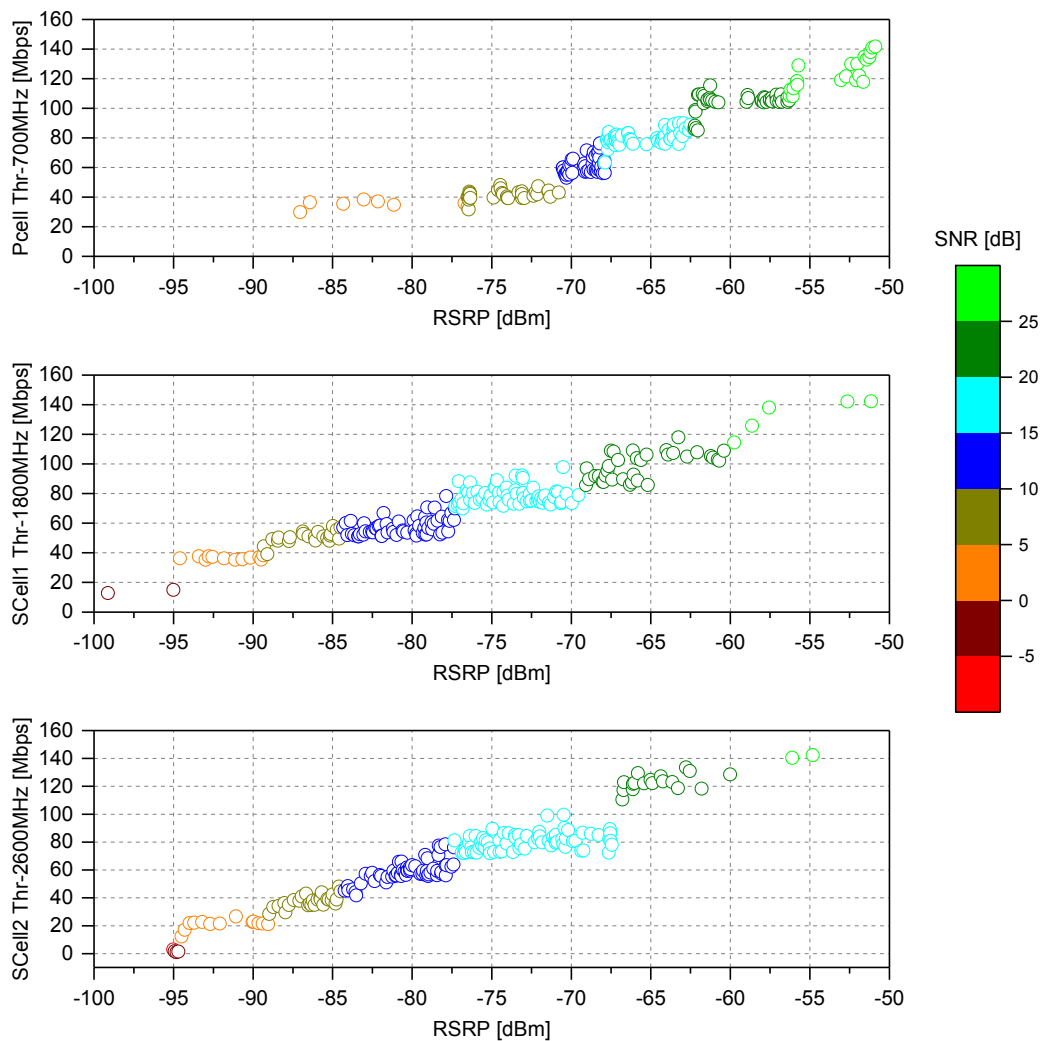
A distribuição dos dados na Fig. 51 demonstra a tendência a uma curva exponencial, na qual as amostras de *throughput* obtidas em cada CC são maiores à medida que a relação SNR torna-se maior; saturando em 30dB quando o receptor atinge as melhores condições do canal com modulação máxima de 64QAM e baixa BER. Como esperado, esse comportamento reflete o efeito do algoritmo de atribuição de recursos da eNB: em boas condições do canal de rádio os valores de SNR são mais elevados, os valores de CQI reportados pelo UE para a eNB são maiores, resultando em altos índices de MCS com melhor eficiência espectral e elevadas taxas de *throughput* podem ser atingidas. Além disso, o relatório RI dos canais MIMO tem impacto significativo no rendimento das taxas de *throughput*.

Os resultados experimentais confirmam que a SNR é um dos fatores mais importantes que determinam o débito em *downlink* para um UE. No entanto, para caracterizar o canal de rádio e fornecer taxas de dados elevadas, além da SNR, a classificação das camadas espaciais (RI) formadas pelo conjunto de antenas MIMO define uma segunda variável muito valiosa na avaliação de desempenho dos sistemas LTE-A. Um canal com elevada SNR pode não suportar a multiplexação espacial

devido a classificação insuficiente, causada pelas características da antena, direção e por um ambiente pobre em condições de dispersão, por exemplo. Em consequência, para que um usuário possa aproveitar o efeito multiplicativo em *throughput*, proveniente dos recursos de multiplexação espacial do MIMO é necessário um canal rico em reflexões (alta classificação,  $RI > 1$ ) para que os sinais multiplexados em cada um dos canais MIMO possam experimentar diferentes situações de múltiplo percurso com razoável SNR. Adicionalmente, a máxima taxa de *throughput* depende do nível de potência de recepção e da interferência intrínseca do canal de rádio móvel. Como o nome sugere, a RSRP (valor médio da potência de recepção medido pelo dispositivo, calculado em função da medição da potência dos sinais de referência) é uma importante medida de camada física do LTE realizada periodicamente pelo móvel e utilizada principalmente durante a tomada de decisão nos processos de *handovers* ou até mesmo para seleção de CCs para uso em CA. As amostras com baixo nível RSRP geralmente apontam para uma região com baixa SNR resultando também em amostras com baixo *throughput*.

Teoricamente, pode-se estimar a potência de transmissão em números de *Reference Signals* ( $P_{TX\_RS}$ ) de uma CC do sistema: para uma largura de banda de 20MHz, que corresponde a 100RBs com 12 subportadoras por RB identicamente espaçadas de 15KHz e uma potência de transmissão de 30dBm, resulta em  $P_{TX\_RS} = -0,79\text{dBm}$  ( $30 - \log(12 \times 1200)$ ). A RSRP será calculada extraíndo as perdas do modelo de propagação relevante da potência dos sinais de referência ( $RSRP = P_{TX\_RS} - L$ ).

A Fig. 52 apresenta os níveis de RSRP variando de -100 a -50dBm em função das amostras de *throughput*. Tais níveis definem a cobertura celular em termos da sua qualidade de serviço. Tipicamente, para medições em LTE, os níveis de RSRP acima de -75dBm classificam uma excelente QoS. O QoS entre -95dBm e -75dBm é considerado bom a aceitável com ligeira degradação no débito binário e para níveis inferiores à -95dBm o QoS torna-se inaceitáveis produzindo taxas de *throughput* muito baixas tendendo a zero. Como o *throughput* da camada física teórico de pico esperado para cada CCs nas condições adotadas é estimado em 150,752Mbps, as taxas experimentais superiores à 140Mbps são atingidas com níveis de RSRP acima de -55dBm. Pode-se observar uma correspondência nos valores de SNR e RSRP diretamente relacionadas às taxas de *throughput* em cada CC.



**Figura 52 - Amostras de throughput em função do RSRP.**

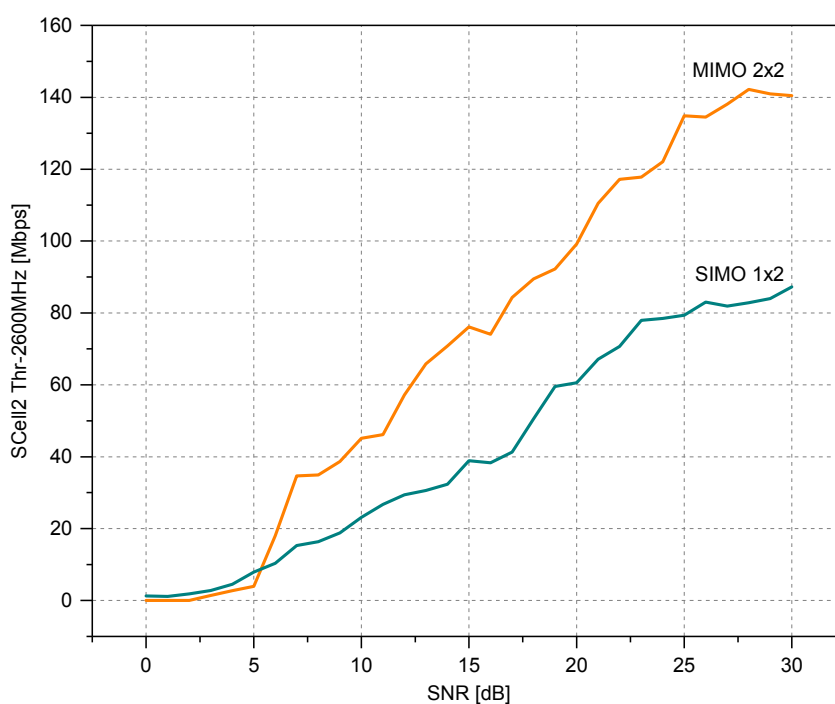
Uma primeira análise do comportamento das CCs na Fig. 52 em função das variações do canal de RF, aponta que a taxa de *throughput* é baixa quando o nível da RSRP está abaixo dos -90dBm para as amostras registradas na SCell1 e SCell2. Uma razão imediata por trás desse resultado comprova a ação da AMC: nas condições em que a potência de recepção é baixa, a probabilidade dos erros aumenta, daí a necessidade de reduzir o MCS de forma a aumentar a taxa de codificação dos *frames* ou então diminuir a ordem de modulação no transmissor. Portanto, utilizar esquemas de modulação, nessa situação, com uma eficiência mais baixa leva a um aumento da resiliência contra os erros de canal. Em segundo lugar, as amostras de *throughput* indicam que as medidas de SNR variam conforme as medições dos níveis de RSRP, ou seja, as melhores condições da SNR são obtidas para os melhores níveis de RSRP



(acima de -60dBm), resultado de uma influência direta entre esses dois parâmetros de desempenho. Nesse sentido, as máximas taxas de transferência são obtidas com os melhores níveis de cobertura e baixa interferência. No caso, picos de 140Mbps por CC são registrados com uma potência de recepção acima de -55dBm.

Em virtude da variação do SNR a eNB pode também selecionar o esquema de transmissão MIMO mais adequado que resulte na transmissão simultânea de mais de um *codeword* para a UE com o propósito de maximizar a taxa de *throughput*. No severo ambiente de propagação imposto no teste (mobilidade entre andares) as amostras de *throughput* são condicionadas ao modo de operação dinâmico do TM3, alternando de SM ( $RI > 1$ ) para TxD ( $RI = 1$ ) de acordo com a qualidade do canal. Como resultado, no ambiente *indoor*, é difícil alcançar o desempenho como função da distância, mas em função da SNR as análises qualitativas tornam-se mais significativas.

A Fig. 53 ilustra como o desempenho da técnica de múltiplas antenas dependem muito da SNR do canal de RF e dos Modos de Transmissão. Em particular, uma análise comparativa dos efeitos das diferentes dinâmicas entre os modos SIMO (TM1,  $RI = 1$ ) e MIMO 2x2 SM (TM3,  $RI > 1$ ) para algumas amostras da SCell2.



**Figura 53** - Throughput da SCell2 nos modos SIMO 1x2 e MIMO 2x2.

Os resultados de na taxa de transferência de DL são melhores, quase o dobro, quando utilizado o modo de transmissão MIMO 2×2 OLSM (TM3, RI = 2) em comparação com a transmissão SIMO onde existe apenas uma antena transmissora. Este resultado demonstra que o ganho na taxa de transferência dependerá do número de antenas transmissoras (M), receptoras (N), fluxos de dados de acordo com a relação  $\min\{M,N\}$  da equação 9 e principalmente da qualidade do sinal (SNR) experimentada pelo móvel. Em OLSM (TM3, RI = 2), dois diferentes sub-fluxos espaciais de dados são transmitidos simultaneamente para duas antenas de recepção, levando a uma taxa de bits aproximada de duas vezes superior ao modo TM1.

No entanto, quando a qualidade do canal é degradada, a multiplexação de múltiplos fluxos de dados não traz nenhum ganho de desempenho. Nessa situação é preferível transmitir com um número menor de fluxos de dados para obter ganho de diversidade espacial na recepção (RI = 1). Por exemplo, para  $SNR < 5\text{dB}$  receber diversidade (SIMO, linha verde) fornece uma taxa de dados superior ao modo de operação MIMO 2×2 (linha laranja). Portanto, a classificação adaptativa (RI 1 ou 2) dos canais MIMO otimiza o desempenho das transmissões no sentido que pode ajustar o número de fluxos de dados de acordo com as condições atuais do canal. Para realizar a operação AMC nesse contexto, uma baixa seleção da MCS no eNB é tomada com base em valores mais baixos dos relatórios de CQI e modulações mais robustas (16QAM ou QPSK) serão utilizadas a fim de aumentar a resiliência contra erros da transmissão.

## Capítulo 5. Conclusões e Trabalhos Futuros

O principal objetivo dessa Dissertação foi a avaliação experimental dos principais indicadores de desempenho para uma rede LTE-Advanced baseada no uso de múltiplas antenas e Agregação de Portadoras, com foco em soluções comercialmente disponíveis. A parte teórica apresentou uma descrição geral das tecnologias LTE e LTE-Advanced, o uso de um sistema de antenas MIMO para transmissões em múltiplas camadas e as principais características e funcionalidades da operação Agregação de Portadoras. As capacidades máximas e o desempenho da CA foram avaliadas para a eNB piloto sem a influência da carga de uma rede ativa. No entanto, as argumentações trabalhadas podem estender a análise para uma rede de alta capacidade levando em conta a carga dos múltiplos usuários com a possibilidade de avaliar as variações do CQI, capacidade, *throughput* e eficiência do *scheduler*, por exemplo.

O Capítulo 1 forneceu uma revisão da tecnologia LTE-Advanced, atualmente considerada a tecnologia predominante para redes de comunicação móvel de banda larga de Quarta Geração. Entre outras características, as especificações da rede LTE-Advanced introduzidas pelo Release 10 do 3GPP, fornecem uma solução escalável, com muitas configurações possíveis em relação à frequência e largura de banda, modos de transmissão associados a esquemas com múltiplas antenas, tipo e número de camadas em um sistema MIMO. O recurso mais utilizado do LTE-A é a Agregação de Portadoras, que suporta até 1Gbps em *downlink* com a agregação de cinco portadoras LTE de 20MHz e avançadas técnicas de transmissões MIMO. Os primeiros dispositivos móveis capazes de suportar a técnica de CA foram comercializados no segundo semestre de 2016 já dentro das especificações do Release 13 do 3GPP, com novas capacidades, bandas para agregação e esquemas de antenas MIMO. O Capítulo 1 apresentou também uma revisão bibliográfica para situar o presente trabalho, os objetivos e as contribuições que essa Dissertação possa resultar. Cabe salientar, que toda programação aplicada no regime experimental proposto por essa Dissertação, hoje integra uma das mais importantes redes móveis no Estado de São Paulo.

O Capítulo 2 apresentou conceitos fundamentais da camada física das redes LTE e LTE-Advanced, abrangendo os aspectos técnicos do uso da modulação

multiportadoras OFDM e da alocação dos recursos de rádio do enlace de *downlink* para esses sistemas. Em uma operação multiportadoras, dividindo a banda total disponível em sub-bandas menores, resulta em um maior período de símbolo que, por consequência, melhora o desempenho do sistema por agora ser capaz de lidar com maiores atrasos do canal de transmissão. Ainda para mitigar os efeitos degenerativos nos sinais OFDM gerado pela ligação em *downlink* do LTE causados pela variabilidade do canal, técnicas como o uso do Prefixo Cíclico proposta por Peled e Ruiz na década de 1980 [90] eleva a robustez contra os múltiplos percursos às custas do rendimento do sinal recebido, uma vez que apenas uma fração do símbolo total transmitido é aproveitado pelo demodulador.

Nas seções seguintes do Capítulo 2, uma descrição da interface de rádio e técnicas mais agressivas para melhorar a eficiência nos domínios da frequência e do tempo são apresentadas. A AMC (Adaptive Modulation and Coding) é uma das técnicas aplicadas em sistemas reais para otimizar e produzir maiores taxas de transferências aos usuários da rede móvel. A qualidade do sinal recebido pelo dispositivo móvel depende da qualidade do canal de RF e dos níveis de interferência e ruído presentes na transmissão. O processo da AMC consiste em selecionar o melhor conjunto de MCS aplicado aos PRBs a cada TTI de forma adaptável em função das condições de propagação e transmissão com base nos relatórios de estado informado ou CSI (*Channel State Information*) pelo UE em função dos seus requisitos de QoS como CQI, RI e PMI, transmitidos nos canais de *uplink*. Como conclusão, esse Capítulo fornece uma análise detalhada das métricas de avaliação da qualidade do canal que permitem que a estação rádio-base implemente o processo AMC com eficácia aos recursos de rádio disponíveis na interface aérea.

Os aspectos de capacidade, desempenho e interferência foram discutidos no Capítulo 3 com ênfase no uso do MIMO e Agregação de Portadoras, além das melhorias introduzidas no LTE-Advanced, a tecnologia MIMO e seus modos de transmissão capaz de aumentar a eficiência espectral e a capacidade do sistema sem, contudo, aumentar a potência de transmissão ou largura de banda adicional. Como resultado prático das técnicas apresentadas, observa-se que as implantações baseadas em redes MIMO 2×2 com predominância do TM3 (Modo de Transmissão 3), são capazes de capturar as variáveis do canal e adaptar dinamicamente o número de

camadas de transmissão (ou *rank*), alternando entre os modos diversidade de transmissão (TxD) ou multiplexação espacial (SM). Comparado ao caso basal (SISO), o ganho da eficiência espectral passa de logarítmico para linear quando utilizado técnicas de múltiplas antenas, significando uma melhoria significativa de desempenho em relação a sistemas convencionais, fornecendo enlaces ou caminhos de comunicação com diversidade e capacidade substanciais. Portanto, os sistemas MIMO permitem obter estimativas acerca da qualidade do canal de transmissão (SNR) iguais aos atuais, mas com menor potência de transmissão e conseqüentemente maior eficiência espectral.

Na seção 3.3 foi discutido e comparada a eficiência espectral com o uso de múltiplas antenas em diferentes arranjos para explorar a diversidade espacial e melhorar a qualidade do sinal sem largura de banda ou potência adicional. Em especial, no modo de operação SIMO apenas um fluxo de dados, isto é, uma única CW, ou *codeword*, é transmitida e recebida por múltiplas antenas. Nesse caso o receptor pode seleccionar o sinal de maior SNR a cada instante ou efetuar a combinação linear de todas as cópias dos sinais recebidos nas diferentes antenas, garantindo a robustez e fiabilidade da informação recebida com menor BER. Para as transmissões de *uplink*, por exemplo, esse modo de transmissão tem sido usado por muitos padrões móveis durante muitos anos.

As seções 3.4 e 3.5 abordaram a eficiência e capacidade das taxas de *throughput* do LTE-Advanced no enlace de *downlink*, apresentando o cálculo analítico quanto o cálculo teórico seguindo as recomendações do 3GPP da referência [50]. Os resultados teóricos apontam que as taxas de pico de aproximadamente 4Gbps não seriam possíveis apenas utilizando sistema MIMO 8×8 em conjunto com constelações de alta ordem (256QAM) sem, contudo, não aumentar a largura de banda de transmissão. Nesse sentido, esse Capítulo termina apresentando uma das principais características das atuais e futuras redes móveis para aumentar efetivamente a largura de banda do sistema por meio da utilização simultânea de múltiplas portadoras ou *Component Carriers* (CCs) da camada física de rádio do LTE-Advanced.

Para suportar taxas máximas de dados de até 1 Gbps em *downlink*, nas especificações iniciais do LTE-Advanced, torna-se imperativo o uso de uma largura de banda de transmissão mais ampla. O problema, no entanto, reside que as operadoras

mundiais de rede móveis não dispõem de um acesso contínuo de largura de banda (no caso, 100MHz) devido à atual fragmentação do espectro. Conforme apresentado, para solucionar esse problema, o 3GPP introduziu a função Agregação de Portadoras ou *Carrier Aggregation* (CA) como uma das características mais importantes do Release 10, e aprimoradas em suas versões posteriores permitindo o uso eficiente e flexível do atual espectro eletromagnético. Por meio do uso dessa função, os UEs podem aumentar suas taxas máximas de dados com o suporte a uma largura de banda de transmissão maior virtual agregada. Uma visão geral sobre as questões técnicas envolvidas nos sistemas LTE-Advanced com a propriedade CA é apresentada em diferentes cenários de agregação, formados por CCs contíguas ou não contíguas dentro da mesma faixa de frequência ou não. Os cenários *intra-band* CA fornecem benefícios em termos de esforço de implementação. Uma única unidade de RF do móvel pode transmitir e receber várias CCs quando elas estão posicionadas dentro da mesma faixa de operação. O cenário mais comum para operação é o *inter-band* CA que oferece benefícios em termos da disponibilidade de espectro, pois muitas vezes o espectro licenciado de uma operadora provavelmente encontra-se distribuído em diversas faixas de frequências em vez de estar localizado dentro de uma única banda.

Embora até 5 CCs de 20MHz licenciados tenham sido inicialmente considerados para a Agregação de Portadoras no padrão LTE-Advanced, a crescente demanda por dados móveis de alta velocidade exige fortemente sugerir que as futuras aplicações da CA utilizarão mais CCs, para realizar o conceito de Massiva Agregação de Portadoras ou *massive CA* (mCA). Propostas para mCA de 32 CCs aparecem nas especificações do Release 13 do 3GPP anunciado em março de 2016, bem como o uso de CCs fora do espectro licenciado. Em resumo, a Agregação de Portadoras aumenta a taxa de dados de pico do UE, aumenta a eficiência da utilização do espectro e fornece configurações flexíveis dentro da mesma ou em diferentes bandas de frequência.

O Capítulo 4 relatou todo o cenário interno de testes da rede piloto, dispositivos utilizados e métodos utilizados, além dos resultados e conclusões propostos a cada fase de testes. Em geral, o principal parâmetro utilizado para avaliação da técnica Agregação de Portadoras utilizando um esquema MIMO 2x2 foi o *throughput* ou máxima taxa na qual o pacote de dados é entregue com sucesso da origem para destino por uma rede de comunicação. O objetivo foi medir a capacidade da rede

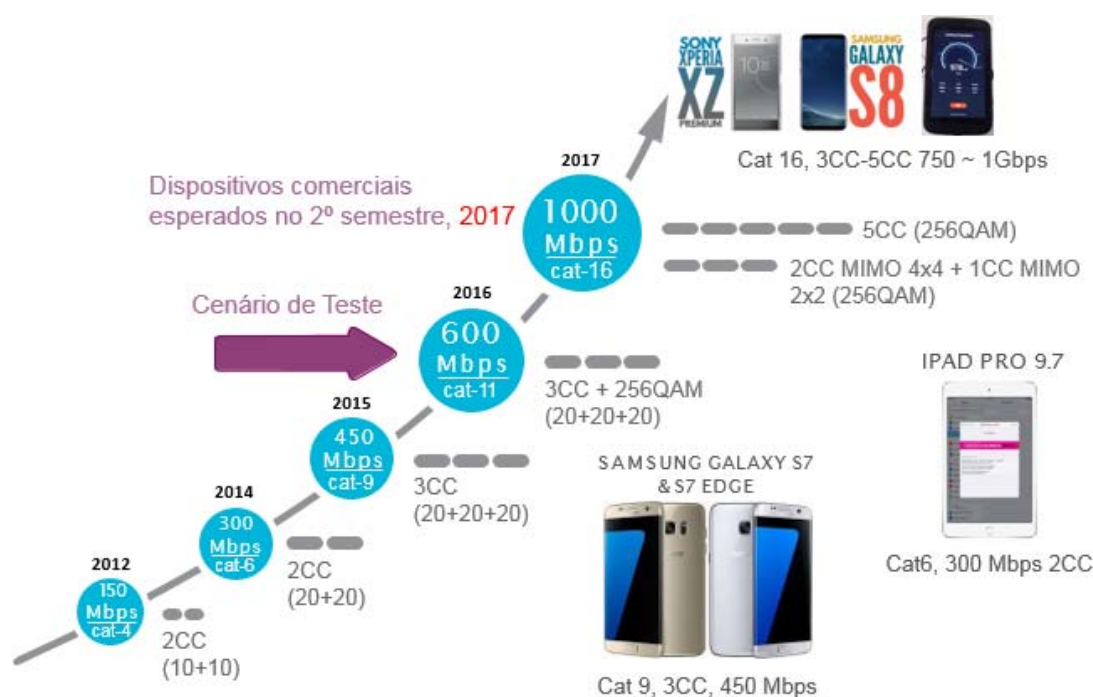
programada a partir da perspectiva do usuário final. Inicialmente as capacidades e o desempenho são avaliados separadamente para dois dispositivos LTE-Advanced no modo estacionário, um protótipo Categoria 16 e um comercial Categoria 9. Adicionalmente para o móvel Categoria 9, foram analisados os efeitos nas taxas de *throughput* em situações de mobilidade. Da análise dos pontos estáticos foi possível confirmar que quando os móveis encontram-se em situações de excelentes condições de cobertura ( $RSRP \geq -55\text{dBm}$ ) e qualidade do canal (SNR próxima dos 30dB), o desempenho obtido nas taxas máximas de *throughput* é excelente, aproximando-se dos valores máximos teóricos suportados. No cenário estático e configuração CA 3×20MHz, MIMO 2×2 a maior taxa de transferência medida na camada de aplicação foi de 540Mbps para o dispositivo Categoria 16 (256QAM DL) e para o móvel Categoria 9 (64QAM DL) foi de 443Mbps, enquanto a taxa de transferência máxima teórica para a camada física é de 600Mbps e 450Mbps para os móveis respectivamente. Essas taxas de dados só poderão ser alcançadas em condições de rádio extremamente boas e que a carga da rede deve ser mínima. Esse Capítulo também apresentou uma avaliação da camada física do LTE-Advanced em termos do *feedback* do CQI, cobertura (RSRP), capacidade (*throughput*) e qualidade (SNR) de cada CC quando em situação de baixa mobilidade variando de severa a excelente as condições do canal de RF.

Em relação à configuração de antenas foi possível aumentar a taxa de transmissão com um sistema de múltiplas antenas. Verificou-se que esse aumento é proporcional à função  $\min(M,N)$ , onde M e N é o número de antenas do lado do transmissor e receptor respectivamente. O MIMO 2×2 oferece uma eficiência espectral maior em comparação com a diversidade de recepção SIMO 1×2 devido à adição da antena de transmissão no *downlink*. O *throughput* gerado pelo MIMO 2×2 é aproximadamente o 1,7 vezes o uso da implantação SIMO 1×2. Não é exatamente o dobro conforme era de se esperar e a explicação para isto é basicamente devido à maior quantidade de sinais de referência necessários na moldura do quadro OFDM utilizado na transmissão de múltiplas camadas.

É notável o aumento substancial do débito binário que a Agregação de Portadoras permite em comparação com as gerações anteriores e para atender aos requisitos IMT-Advanced estabelecidos pelo ITU-R. De fato, apenas a ideia de ter

mais de uma CC para um único eNB permite soluções tanto para taxas quanto para capacidade da rede. Um outro resultado importante além da capacidade aumentada ou uso flexível do espectro, a CA também possibilita o balanceamento de carga entre as CCs com novos planos de otimização fornecendo um ótimo desempenho para o sistema. Na prática, essa combinação de frequências significa mais qualidade e estabilidade para os usuários, com ganhos como: menor latência, maiores taxas de transferência com maior alcance e melhor cobertura. Como principal conclusão, a operação Agregação de Portadoras para aumento do espectro e o uso de múltiplas antenas para aumento da eficiência espectral são consideradas tecnologias essenciais para sistemas de comunicação móvel da próxima geração e são amplamente antecipados como um avanço vital necessário para os sistemas 5G.

A Fig. 53 ilustra a evolução da capacidade dos UEs e alguns exemplos de dispositivos móveis comerciais capazes de suportarem tais taxas. Para atingir taxas de 1Gbps algumas configurações futuras também são apresentadas.



**Figura 54** – Evolução dos UEs e proposta de configurações futuras.

Como proposta de continuidade desse trabalho, novas configurações em função de outras variáveis podem ser realizadas, tais como: estudar os efeitos da



variação de carga celular com um maior número de dispositivos com capacidade de suportar a operação CA para avaliar a eficiência do *scheduler* da eNB; estudar o mesmo sistema composto pelas 3×20MHz licenciadas dada a disponibilidade de espectro, material e dispositivos (256QAM DL), em uma configuração 2×CC MIMO 4×4 (Bandas B3 e B7) e 1×CC MIMO 2×2 (Banda B28) capaz de atingir taxas máximas de 1Gbps ou até mesmo em um configuração híbrida por meio da funcionalidade Acesso Assistido e Licenciado dentro da faixa de 5GHz não licenciada com um novo tipo de quadro para garantir coexistência com redes WiFi, proposta do Release 13 do 3GPP. Tal velocidade de acesso define a rede Gigabit LTE, parte integrante de uma rede LTE-Advanced Pro, comercializada como redes 4,5G, que suportam mCA composta pela agregação de até 32×CCs (640MHz).

## Referências Bibliográficas

- [1] 5G Americas : “Annual Global Technology Forecast Subscriptions & Market Share 2016-2020, June 2016 (online: <http://www.5gamericas.org>).
- [2] Abd-Elhamid M. Talha, N. A. Ali, H. S. Hassanein, “LTE, LTE-Advanced and WiMAX towards IMT-Advanced Networks”, John Wiley, UK, pp.6-10, 2012.
- [3] 3GPP TR 36.913, “3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Requirements for further advancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) (LTE-Advanced) (Release 14)”, v14.0.0, March 2017.
- [4] H. Holma, A. Toskala, “LTE-Advanced LTE - 3GPP Solution For IMT-Advanced”, John Wiley and Sons, Ltd., 2012.
- [5] Global mobile Suppliers Association (GSA) : “Evolution from LTE to 5G”, Report July 2017, (online: <https://www.malaysianwireless.com/wp-content/uploads/2017/07/GSA-LTE-Evolution-to-5G-July-2017-report.pdf>)
- [6] M. Oproiou, V. Boldan, I. Marghescu, “Effects of Using Carrier Aggregation with Three Component Carriers in a Mobile Operator’s Network”, IEEE Inter. Conf. on Commun. (COMM), Bucharest, Romania, June 2016.
- [7] M. Oproiu, A. Vulpe, “Effects of Enabling Carrier Aggregation in a Mobile Operator Network”, IEEE 23<sup>rd</sup>. TeleCommun. Forum Telfor (TELFOR), Belgrade, Serbia, Nov. 2015.
- [8] S. Lee, S. Hyeon, J. Kim, “The Useful Impact of Carrier Aggregation: A Measurement Study in South Korea for Commercial LTE-Advanced Networks” IEEE Vehicular Technology Magazine, vol. 12, No.: 1, March 2017.
- [9] Iskandar, R. Galih, “Throughput evaluation in LTE-Advanced network access using carrier aggregation”, IEEE 1st Inter. Conf. on Wireless and Telematics (ICWT), Manado, Indonesia, Nov. 2015.

- [10] R. Almesaeed, A. S. Ameen, A. Doufexi, A. R. Nix, "Performance Evaluation of LTE-Advanced Downlink in Inter and Intra Band Carrier Aggregation Under Mobility and Interference", IEEE 80<sup>th</sup>. Vehicular Technology Conf. (VTC Fall), Vancouver, BC, Canada, Sept. 2014.
- [11] B. M. Hasiandra, Iskandar, "Planning and Performance Analysis of Downlink Inter-Band Carrier Aggregation for LTE-Advanced 3GPP Released 13", IEEE 10<sup>th</sup>. Inter. Conf. on Telecommunication Systems Services and Applications (TSSA), Denpasar, Indonesia, Oct. 2016.
- [12] H. Wang, C. Rosa, K. Pedersen, "Performance Analysis of Downlink Inter-band Carrier Aggregation in LTE-Advanced", IEEE Vehicular Technology Conf. (VTC Fall), San Francisco, CA, USA, Sept. 2011.
- [13] G. D. Ntouni, A.-A. A. Boulogeorgos, D. S. Karas, T. A. Tsiftsis, F. Foukalas, V. M. Kapinas, G. K. Karagiannidis, "Inter-band Carrier Aggregation in Heterogeneous Networks: Design and Assessment", IEEE 11<sup>th</sup>. Inter. Symposium on Wireless Commun. Systems (ISWCS), Barcelona, Spain, Aug. 2014.
- [14] S. Parkvall, E. Englund, A. Furuskär, E. Dahlman, T. Jönsson, A. Paravati, "LTE Evolution towards IMT-Advanced and Commercial Network Performance", IEEE Inter. Conf. on Communication Systems (ICCS), Singapore, Singapore, Nov. 2010.
- [15] Yashoda B.S, K. R. Nataraj, "Improving the efficiency of LTE-MIMO performance by utilizing Carrier Aggregation method" IEEE Inter. Conf. on Emerging Research in Electronics, Computer Science and Technology (ICERECT), Mandya, India, Dec. 2015.
- [16] X. Huang, Q. Cui, X. Tao, "Coexistence studies involving LTE-advanced", IEEE 3<sup>rd</sup>. Inter. Conf. on Broadband Network and Multimedia Technology (IC-BNMT), Beijing, China, Oct. 2010.

- [17] Z. Shen, A. Papasakellariou, J. Montojo, D. Gerstenberger, F. Xu, “Overview of 3GPP LTE-Advanced Carrier Aggregation for 4G Wireless Commun.,” *IEEE Commun. Magazine*, vol. 50, No.: 2, Feb. 2012.
- [18] K. I. Pedersen, F. Frederiksen, C. Rosa, H. Nguyen, L. G. U. Garcia, Y. Wang, “Carrier aggregation for LTE-Advanced: Functionality and Performance Aspects”, *IEEE Commun. Magazine*, vol. 49, No.: 6, June 2011.
- [19] G. Yuan, X. Zhang, W. Wang, Y. Yang, “Carrier Aggregation for LTE-Advanced Mobile Communication Systems”, *IEEE Commun. Magazine*, vol. 48, No.: 2, Feb. 2010.
- [20] M. Iwamura et al., “Carrier Aggregation Framework in 3GPP LTE-Advanced,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 48, no. 8, Aug. 2010, pp. 60–67.
- [21] T. Ohseki, T. Yamamoto, Y. Suegara, “Performance Evaluation of LTE-Advanced Downlink Adopting Higher Order Modulation in Small Cells”, *IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS)*, San Diego, CA, USA, Jan. 2015.
- [22] T. N. Halawa, R. A. Fathy, A. Zekry, “Performance analysis of LTE-A with 256QAM”, *IEEE Sixth Inter. Conf. on Digital Information Processing and Commun. (ICDIPC)*, Beirut, Lebanon, April 2016.
- [23] P. E. Mogensen, I. Z. Kovács, F. Frederiksen, et al., “LTE Capacity compared to the Shannon Bound”, *IEEE 65<sup>th</sup> Vehicular Technology Conf., (VTC)*, pp. 1234–1238, Dublin, Ireland, April 2007.
- [24] 3GPP TR 36.853-13, “3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); LTE-Advanced 3 Band Carrier Aggregation (CA) (3DL/1UL) (Release 13)”, v13.1.0, June 2016.
- [25] International Telecommunications Union (ITU), M.2012, “Detailed specifications of the terrestrial radio interfaces of International Mobile Telecommunications Advanced (IMT-Advanced)”, (online: <https://www.itu.int/rec/R-REC-M.2012>).

- [26] M. F. L. Abdullah, J. Abdullah, A. Z. Yonis, M. F. Ghanim, “Comparison Study on 3.9G and 4G Evolution”, Inter. Conf. on Information Communication and Management (IPCSIT), vol.16, IACSIT Press, Singapore, 2011.
- [27] M. F. L. Abdullah, A. Z. Yonis, “Performance of LTE Release 8 and Release 10 in Wireless Commun.”, in Proc. Cyber Security, Cyber Warfare and Digital Forensic (CyberSec) Int. Conf., pp. 236–241, 2012.
- [28] 3GPP TS 36.306, “3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio access capabilities (Release 13)”, v13.2.0, June 2016.
- [29] S. Haykin, “Communication Systems”, 4<sup>th</sup> ed., John Wiley & Sons, 2000.
- [30] R. Haas, J. C. Belfiore, “Multiple Carrier Transmission with Time-Frequency Well-Localized Impulses”, IEEE Second Symposium on Commun. and Vehicular Technology in the Benelux, pp. 187–193, Nov. 1994.
- [31] T. S. Rappaport, “Comunicações sem fio Princípios e Práticas”, 2. ed., Prentice Hall, São Paulo, 2009.
- [32] W.C.Y. Lee, “Mobile Cellular TeleCommun.”, McGraw Hill, 2<sup>nd</sup> ed., New York, 2006.
- [33] 3GPP TS 36.101, “3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio access capabilities (Release 11)”, v11.4.0, March 2013.
- [34] H. Lehene, F. Böhagen, “OFDM(A) for wireless communication”, R&I Research Report, Telenor, rev. 7, 2008.
- [35] C. Langton, “Orthogonal frequency divisional multiplexing tutorial”. (online: <http://complextoreal.com/wp-content/uploads/2013/01/ofdm2.pdf>)
- [36] J. Rochol, “Comunicação de Dados”, vol. 22, Série Livros Didáticos Informática UFRGS, Bookman, 2012.

- [37] K. Leonhard, "LTE, Wimax and Wlan Network Desing, Optimization and Performance Analysis", John Wiley, UK, 2012.
- [38] J. Kim, C. G. Kang, W. Y. Yang, Y. S. Cho, "MIMO-OFDM Wireless Communication with Matlab", John Wiley & Sons, Singapore, 2010.
- [39] K. Evgenii, S. Evgenii, "Modulation and Coding Techniques in Wireless Commun.", John Wiley, UK, 2011.
- [40] P. Bello, "Selective Fading Limitations of the KATHRYN Modem and some System Design Considerations", IEEE Transactions on Communication Technology, vol. 13, pp. 320-333, No.: , Sept. 1965.
- [41] E. Powers, M. Zimmermann, "A Digital Implementation of a Multichannel Data Modem," IEEE in Proceedings of the Inter. Conf. on Commun., Philadelphia, USA, Aug. 1968.
- [42] R. Chang, R. Gibby, "A Theoretical Study of Performance of an Orthogonal Multiplexing Data Transmission Scheme", IEEE Transactions on Communication Technology, vol 16, pp. 529 – 540, No.: 4, Aug. 1968.
- [43] R. Parihar, R. Nakkeeran, "Performance Analysis of LTE Networks In Different Transmission Modes Using 16QAM Under Fading Channels", IEEE Inter. Conf. on Commun. and Signal Processing (ICCSP), Melmaruvathur, India, April 2015.
- [44] H. Zarrinkoub, Understanding LTE with MATLAB: From Mathematical Modeling to Simulation and Prototyping, John Wiley & Sons, 2014.
- [45] R. V. Nee, R. Prasad, "OFDM for Wireless Multimedia Commun.," Artech House Publishers, Boston, Massachusettes, 2000.
- [46] 3GPP TS 36.211, "3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation (Release 13)", v13.2.0, June. 2016.
- [47] J. Zyren, W. McCoy, Overview of the 3GPP Long Term Evolution Physical Layer", White Paper, Freescale Semiconductor, Doc. No.

- 3GPPEVOLUTIONWP, Rev. 0, July 2007. (online: <https://www.nxp.com/docs/en/white-paper/3GPPEVOLUTIONWP.pdf>)
- [48] C. Cox, "An Introduction to LTE: LTE, LTE-Advanced, SAE and 4G Mobile Commun.," Ed. Chichester: Wiley, 2012.
- [49] T. N. Halawa, R. A. Fathy, A. Zekry, "Performance Analysis of LTE-A with 256QAM", IEEE 6<sup>th</sup>. Inter. Conf. on Digital Information Processing and Commun. (ICDIPC), Beirut, Lebanon, April, 2016.
- [50] 3GPP TS 36.213, "3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Layer Procedures (Release 13)", v13.0.1, Jan. 2016.
- [51] J. K. Ellenbeck, "Radio Resource Management and System Spectral Efficiency in LTE Multi-Cell Systems", Dissertation, Technical University of Munich (TUM), Feb. 2015.
- [52] 3GPP R1-142638, "WF on 256QAM CQI table design", Huawei, HiSilicon, CATR, Panasonic, III, CATT, Broadcom, Nokia, NSN, Microsoft, CMCC, CTC, Intel and Ericsson, RAN1 77 meeting, May, 2014.
- [53] H. Holma, A. Toskala, "LTE for UMTS – OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access", John Wiley and Sons, Ltd., 2009.
- [54] S. Sesia, I. Toufik, M. Baker, "LTE - The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice", John Wiley & Sons Ltd, 2009.
- [55] P. B. Souza, "Comparação de Esquemas de Alocação de Recursos para Downlink de Redes LTE", Dissertação de Mestrado, UFG, Goiânia, Go, 2014.
- [56] E. H. S. Cardoso, et all, "Análise de desempenho de algoritmos de escalonamento de recursos em redes LTE heterogêneas", Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO), Pernambuco, PE, Ago. 2015.
- [57] D. Gesbert, M. Shafi, Da-shan Shiu, P.J. Smith, A. Naguib, "From theory to practice: an overview of MIMO space-time coded wireless systems," IEEE

- Journal on Selected Areas in Commun., vol. 21, No.: 3, pp. 281–302, April 2003.
- [58] G. Jo, et al, “LTE based Spatial Multiplexing MIMO with Single Radio”, IEEE Proceedings of the 46th European Microwave Conf. (EuMC), London, pp. 1319-1322, UK, Oct. 2016.
- [59] I. E. Telatar, “Capacity of Multi-antenna Gaussian Channels,” European Transactions on TeleCommun., vol. 10, n° 6, pp. 585-595, Nov./Dec. 1999.
- [60] P. Almers, et al., “Survey of Channel and Radio Propagation Models for Wireless MIMO Systems”, EURASIP Journal on Wireless Commun. and Networking, vol. 2007, France, May 2006.
- [61] H. Wu, et al., “High-Rank MIMO Precoding for Future LTEAdvanced Pro”, IEEE 83<sup>rd</sup> Vehicular Technology Conf. (VTC Spring), Nanjing, China, May. 2016.
- [62] P. S. Suratia, S. K. Shah, “Performance Analysis of Open and Closed Loop Spatial Multiplexing in LTE Downlink Physical Layer”, IEEE Inter. Conf. on Commun., Networks and Satellite (ComNetSat), Bali, Indonesia, July 2012.
- [63] S. M. Alamouti, “A simple transmit diversity technique for wireless Commun.”, IEEE Journal on Selected Areas in Commun. (JSAC), vol. 16, No.. 8, pp. 1451-1458, Oct. 1998.
- [64] L. Zheng, D.N.C. Tse, “Diversity and multiplexing: A fundamental tradeoff in multiple-antenna channels”, IEEE Transactions on Information Theory, vol. 49, No.: 5, pp. 1073–1096, May 2003.
- [65] N. I. B. Hamid, N. Salele, M. T. Harouna, R. Muhammad, “Analysis of LTE Radio Parameters in Different Environments and Transmission Modes”, IEEE Inter. Conf. on Electrical Information and Communication Technology (EICT), Khulna, Bangladesh, Feb. 2014.
- [66] S. V. George, L. Mathews, S. S. Pillai, “Performance Analysis of Transmission Modes in 4G LTE/LTE-A Downlink Systems”, IEEE Inter. Conf. on Control,



Instrumentation, Communication and Computational Technologies (ICCICCT), Kumaracoil, India, Dec. 2015.

- [67] K. Werner, J. Furuskog, M. Riback, B. Hagerman, “Antenna Configurations for 4×4 MIMO in LTE-Field Measurements”, IEEE 71<sup>st</sup> Vehicular Technology Conf. (VTC 2010-Spring), Taipei, Taiwan, May 2010.
- [68] J. G. Proakis, “Digital Commun.”, 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2001.
- [69] C. E. Shannon, “A Mathematical Theory of Communication”, IEEE The Bell System Technical Journal , vol. 27, No.: 4, pp. 379-423 e 623-656, Oct. 1948.
- [70] A. A. Ali, R. Nordin, M. Ismail, H. Abdullah, “Investigation of User Scheduling Schemes Under Different MIMO Transmission Modes for Carrier Aggregation in LTE-A”, IEEE 2<sup>nd</sup> Inter. Symposium on Telecommunication Technologies (ISTT), Langkawi, Malaysia, Nov. 2014.
- [71] N. Jindal, A. Lozano, “Fading Models and Metrics for Contemporary Wireless Systems” IEEE Conf. Record of the Forty Fourth Asilomar Conf. on Signals, Systems and Computers (ASILOMAR), pp. 625-629, Pacific Grove, California, USA, Nov. 2010.
- [72] G. J. Foschini, M. J. Gans, “On Limits of Wireless Commun. in a Fading Environment when Using Multiple Antennas,” Wireless Personal Commun., vol. 6, pp. 311–335, New Jersey, USA, Mar. 1998.
- [73] A. J. Paulraj, D. A. Gore, R. U. Nabar, H. Boleskei, “An Overview of MIMO Communication – A Key to Gigabit Wireless”, Proceedings of the IEEE, vol. 92, No.: 2, pp. 198-218, Feb. 2004.
- [74] A. Burr, A. Papadogiannis, T. Jiang, “MIMO Truncated Shannon Bound for System Level Capacity Evaluation of Wireless Networks”, IEEE Wireless Commun. and Networking Conf. Workshops (WCNCW), Paris, France, April 2012.
- [75] A. A. Bin-Salem, T.-C. Wan, Y.-W. Chong, and I. J. Mohamad, “LTE Peak Data Rate Estimation Using Modified alpha-Shannon Capacity Formula”, in

Proceedings of the Asian Internet Engineering Conf. (AINTEC), pp. 9-14, Thailand, Nov. 2014.

- [76] M. Yuan, X. Cheng, "Analysis of Cell Capacity in FDD-LTE Network", IEEE 8th Inter. Conf. on Wireless Commun., Networking and Mobile Computing (WiCOM), Shanghai, China, Sept. 2012.
- [77] N. Bechir, M. Nasreddine, E. Messaoud, A. Mahmoud, "Performance Evaluation of Downlink LTE System", IEEE 1st Inter. Conf. on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP), Sousse, Tunisia, March 2014.
- [78] P. Vieira, P. Queluz, A. Rodrigues, "LTE Spectral Efficiency using Spatial Multiplexing MIMO for Macro-cells", IEEE 2nd. Inter. Conf. on Signal Processing and Communication System (ICSPCS), Australia, Dec. 2008.
- [79] M. Oproiu, V. Boldan, I. Marghescu, "Effects of Using Carrier Aggregation with Three Component Carriers in a Mobile Operator's Network", IEEE Inter. Conf. on Commun. (COMM), Bucharest, Romania, June 2016.
- [80] 3GPP TR 36.808, "3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Carrier Aggregation; Base Station (BS) radio transmission and reception (Release 10), v. 10.0.0, June 2012.
- [81] 3GPP TS 36.300, "3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2 (Release 10), v. 10.3.0, March 2011.
- [82] K. I. Pedersen, F. Frederiksen, C. Rosa, H. Nguyen, L. G. U. Garcia, Y. Wang, "Carrier aggregation for LTE-Advanced: functionality and performance aspects," IEEE Commun. Mag., vol. 49, no. 6, pp. 89–95, June 2011.

- [83] H. Lee, S. Vahid, K. Moessner, "A Survey of Radio Resource Management for Spectrum Aggregation in LTE-Advanced", *IEEE Commun. Surveys & Tutorials*, vol. 16, no. 2, Nov. 2013.
- [84] RP-150277, "Revised WID: LTE Carrier Aggregation Enhancement Beyond 5 Carriers", 3GPP TSG RAN #67, Shanghai, China, March 2015.
- [85] A. Haidine, S. El Hassani, "LTE-A Pro (4.5G) as Pre-phase for 5G Deployment: Closing the Gap between Technical Requirements and Network Performance", *IEEE Inter. Conf. Advanced Commun. Systems and Information Security (ACOSIS)*, Marrakesh, Morocco, Oct. 2016.
- [86] 5G Americas: "Wireless Technology Evolution Towards 5G: 3GPP Release 13 to Release 15 and Beyond, Report Feb. 2017.
- [87] H. Kayama, H. Jiang, "Evolution of LTE and new Radio Access technologies for FRA (Future Radio Access)", *IEEE 48<sup>th</sup> Asilomar Conf. on Signals, Systems and Computers*, Pacific Grove, CA, USA, Nov. 2014.
- [88] Global mobile Suppliers Association (GSA): LTE-Advanced Carrier Aggregation Optimization, white paper, Nokia Networks, 2015 (online: <https://gsacom.com/paper/>)
- [89] C. Mehlhrrer, M. Wrulich, J. C. Ikuno, D. Bosanska, M. Rupp., "Simulating the Long Term Evolution Physical Layer", in *IEEE 17th European Signal Processing Conf. (EUSIPCO 2009)*, Glasgow, Scotland , 2009.
- [90] A. Peled, A. Ruiz, "Frequency domain data transmission using reduced computational complexity algorithms", *IEEE Inter. Conf. on (ICASSP), Acoustics, Speech, and Signal Processing*, pp. 964-967, Denver, Colorado, USA, April 1980.