



Planeamento Rádio LTE em Ambiente Rural

Pedro Miguel Roque Nobre

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Professor António Luís Campos da Silva Topa

Júri

Presidente: Professor José Eduardo Charters Ribeiro da Cunha Sanguino

Orientador: Professor António Luís Campos da Silva Topa

Vogal: Professor António José Castelo Branco Rodrigues

Julho de 2021

Declaração

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.

Declaration

I declare that this document is an original work of my own authorship and that it fulfills all the requirements of the Code of Conduct and Good Practices of the Universidade de Lisboa.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, quero agradecer ao Prof. António Luís Campos da Silva Topa por me ter aceite como seu aluno de dissertação e por toda a orientação académica, conselhos e sabedoria que me transmitiu e ajudou a levar este projecto a bom porto. Foi um privilégio ter sido seu aluno, tanto na dissertação como nas unidades curriculares por ele leccionadas, estando sempre bem-disposto e disponível. O meu mais sincero obrigado!

Agradecer também à minha família, sem eles não teria sido possível chegar até aqui.

Quero agradecer a todos os meus colegas de curso e trabalho pelo apoio e disponibilidade, em especial para os meus colegas, Diogo Fernandes, José Roxo e Marco José, sem eles a realização desta dissertação teria sido uma tarefa muito mais difícil. A eles o meu muito obrigado.

Por fim, quero também agradecer à minha namorada por todo o amor, compreensão e palavras que me ajudaram a ultrapassar momentos mais difíceis ao longo do desenvolvimento desta dissertação.

Esta dissertação teve como instituição de acolhimento, o Instituto de Telecomunicações.

Resumo

O trabalho desenvolvido nesta dissertação foca-se no planeamento de um sistema de comunicações móveis com a tecnologia LTE (*Long-Term Evolution*) para uma zona específica do Alentejo Norte, em Portugal, mais propriamente entre a vila de Alandroal e Elvas, uma vez que o LTE é actualmente a tecnologia com melhores *performances*, devido à sua capacidade e baixa latência, e que irá fazer a ponte para a transição para o 5G. Tem sido também graças ao LTE, e às suas melhores características quando comparado com as tecnologias anteriores 2G e 3G, que foi possível o forte crescimento do tráfego de dados nas redes móveis que se verificou na passada década, uma vez que as operadoras de telecomunicações móveis procuram sempre rentabilizar ao máximo as suas redes.

Esta dissertação visa aplicar o estudo de planeamento teórico, através de vários indicadores da área em análise, como perfil do terreno ou densidade populacional, a uma ferramenta de planeamento rádio desenvolvida pela Forsk, Atoll, de maneira a analisar os resultados finais obtidos através desta, após serem escolhidos os modelos de propagação e características dos equipamentos a utilizar nas simulações.

Para o planeamento deste projecto foram simulados os resultados para as bandas LTE de 800 MHz e 1800 MHz, com larguras de banda de 10 MHz e 20 MHz, respectivamente, após uma análise prévia à zona em estudo e ao potencial número de utilizadores. Por fim foi feita uma comparação entre os resultados obtidos, para os diferentes indicadores em estudo, com os resultados teóricos calculados previamente.

Palavras-chave: Comunicações Móveis, LTE, Planeamento Rádio, Carrier Aggregation, Cobertura, Ambiente Rural

Abstract

The work developed in this dissertation focuses on the planning of a mobile communications system with LTE (Long-Term Evolution) technology, for a specific area from north Alentejo, in Portugal, more specifically between the towns of Alandroal and Elvas, since LTE is currently the technology with the best performance, due to its capacity and low latency, and which will make the bridge to the transition to 5G. It has also been thanks to LTE, and its better characteristics when compared to previous 2G and 3G technologies, that the strong growth of data traffic on mobile networks that has occurred in the past decade has been possible, since mobile telecommunications operators they always seek to make the most of their networks.

This dissertation has the objective of applying a theoretical planning study, through several indicators of the area under analysis, such as land profile or population density, to a planning tool developed by Forsk, Atoll, in order to analyze the final results obtained through this one, after propagation models and equipment characteristics to be used in the simulations are chosen.

For the planning of this project were simulated the results for the LTE bands of 800 MHz and 1800 MHz, with bandwidths of 10 MHz and 20 MHz, respectively, after a previous analysis of the area under study and the potential number of users. Finally, was made a comparison between the results obtained, for the different indicators under study, with the theoretical results previously calculated.

Keywords: Mobile Communication, LTE, Radio Planning, Carrier Aggregation, Coverage, Rural Environment

Índice

1.	Introdução.....	1
1.1	Motivação	1
1.2	Evolução histórica das redes móveis em Portugal	3
1.3	Objectivos.....	4
1.4	Organização da dissertação.....	4
1.5	Contribuição Principal	5
2.	Estado de Arte.....	7
2.1	LTE	7
2.1.1	Débito binário	7
2.1.2	Arquitectura	8
2.1.3	Mobilidade	11
2.1.4	VoLTE.....	13
2.1.5	Esquemas de alocação espectral	13
2.1.6	Técnicas de Acesso Múltiplo.....	16
2.1.7	Modulação	19
2.1.8	Interface LTE	23
2.1.8.1	Protocolos de rádio.....	23
2.1.8.2	Canais lógicos, de transporte e físicos.....	24
2.1.9	Qualidade de Serviço (QOS - <i>Quality of Service</i>)	26
2.1.10	LTE- <i>Advanced</i> e LTE- <i>Advanced Pro</i>	27
2.1.10.1	MIMO	28
2.1.10.2	<i>Carrier Aggregation</i>	31
2.1.10.3	CoMP.....	32
2.2	Soluções de Predição e Planeamento de Rede	33
2.2.1	Link Budget.....	34
2.3	Análise da Rede Móvel	38
2.3.1	Medições através de equipamentos móveis	39
3.	Planeamento de Rede.....	43
3.1	Planeamento de Cobertura	43
3.1.1	Cenários de propagação	43
3.1.2	Modelos de Propagação.....	44
3.1.3	Interferência.....	46
3.1.3.1	Interferência de Canal Adjacente	47
3.1.3.2	Interferência Co-canal	47
3.1.4	Planeamento de Frequências	49
3.2	Planeamento de Capacidade	51
3.2.1	Expansão de Capacidade do Sistema	54
3.3	Cálculo <i>Link Budget</i>	55

3.4	Zonas de Sombra	57
3.5	Planeamento de Parametrização	58
3.5.1	PCI – <i>Physical Cell Identity</i>	58
3.5.2	RSI – <i>Root Sequence Index</i>	59
3.5.3	TA – <i>Tracking Area</i>	59
3.5.4	<i>Tilt</i> Eléctrico e Mecânico.....	60
4.	Análise de Resultados.....	63
4.1	RSRP	63
4.2	Best Server.....	64
4.3	Qualidade	65
4.3.1	SINR	65
4.3.2	BLER	66
4.3.3	RSRQ	67
4.4	Cell Throughput.....	69
4.5	Plano de Vizinhas.....	70
4.6	Análise de Custos.....	71
4.6.1	Antenas	71
4.6.2	Torres Metálicas Auto-suportadas e <i>Cabinet</i>	72
4.6.3	Largura de Banda.....	72
4.6.4	Custos Finais.....	73
4.6.5	Retorno do Projecto.....	73
5.	Conclusão.....	75
5.1	Conclusões Principais	75
5.2	Perspetivas de Trabalho Futuro	76
A.	Anexo A.....	80
A.1	Modelo de propagação Okumara-Hata	80
B.	Anexo B.....	83
B.1	Fichas Técnicas.....	83
C.	Anexo C.....	90
C.1	Localização e orientação das antenas.....	90
D.	Anexo D.....	92
D.1	Parâmetros configurados na ferramenta de planeamento Atoll.....	92

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Bandas LTE FDD (adaptado de [46]).....	14
Tabela 2.2: Bandas LTE TDD (adaptado de [46]).....	15
Tabela 2.3: Subportadoras consoante cada largura de banda de transmissão [25].	17
Tabela 2.4: Resource Blocks e subportadoras em função da largura de canal [25].	17
Tabela 2.5: Tabela CQI com respectiva modulação [66].	21
Tabela 2.6: Indicadores de classe do QoS [33].	26
Tabela 2.7: Níveis de QoE [44].	27
Tabela 2.8: Modos de transmissão no LTE [14].	30
Tabela 2.9: Classes do UE em LTE (adaptado de [28]).	31
Tabela 2.10: Classificação de SINR consoante o seu valor [51].	37
Tabela 3.1: Bandas e larguras de banda LTE consideradas no projecto (informação extraída da Tabela 2.1).....	50
Tabela 3.2: Frequências atribuídas em cada sector.	50
Tabela 3.3: Características, parâmetros e equipamentos de rede utilizados no planeamento de cobertura da área em estudo.....	53
Tabela 3.4: Parâmetros utilizados nos cálculos teóricos do débito binário.	55
Tabela 3.5: Valores teóricos calculados para o débito binário total.....	55
Tabela 3.6: Valores teóricos calculados para o débito binário por utilizador.....	55
Tabela 3.7: Parâmetros utilizados nos cálculos teóricos do SINR.	56
Tabela 3.8: Valores teóricos para o path loss em cada banda LTE.	56
Tabela 3.9: Valores teóricos calculados do SINR na fronteira de célula.	57
Tabela 3.10: PCI's e RSI's adoptados para as diferentes células utilizadas na zona em análise.	59
Tabela 3.11: Valores de tilts para as diferentes células utilizadas na zona em análise.	62
Tabela 4.1: Classificação do RSRP consoante o seu valor [51].	63
Tabela 4.2: Classificação do RSRQ consoante o seu valor [51].	67
Tabela 4.3: Custos associados às antenas.	71
Tabela 4.4: Custos associados às torres metálicas auto-suportadas e estrutura de apoio.	72
Tabela 4.5: Custos associados à largura de banda.	72

Lista de Figuras

Figura 1.1: Evolução do tráfego móvel entre os dispositivos móveis [56].	1
Figura 1.2: Subscrições móveis em comparação com a população mundial [54].	2
Figura 1.3: Evolução do débito binário consoante as tecnologias de redes móveis utilizadas [55].	3
Figura 2.1: Tráfego móvel total global [1].	7
Figura 2.2: Arquitectura de rede LTE [4].	9
Figura 2.3: Handover entre células do mesmo eNodeB.	12
Figura 2.4: Inter RAT handover.	12
Figura 2.5: Frame structure do tipo 1 - FDD [17].	14
Figura 2.6: Frame structure do tipo 2 - TDD [18].	15
Figura 2.7: Modos FDD e TDD [19].	15
Figura 2.8: Eficiência espectral em função da largura de banda [26].	16
Figura 2.9: Esquema OFDMA (adaptado de [23]).	17
Figura 2.10: Representação OFMA no domínio do tempo e frequência [24].	17
Figura 2.11: Transmissão OFDMA e SC-FDMA com modulação QPSK [25].	18
Figura 2.12: Processo de transmissão do sinal [13].	19
Figura 2.13: Modulação consoante distância entre transmissor e receptor [13].	20
Figura 2.14: Mapeamento entre os valores de CQI e SINR [21].	20
Figura 2.15: Débito binário em função do valor de SINR do UE.	22
Figura 2.16: Débito binário em função da largura de banda e da modulação.	22
Figura 2.17: Pilha protocolar. (a) Control plane, (b) User plane.	23
Figura 2.18: Mapeamento de canais em downlink e uplink [32].	24
Figura 2.19: MIMO [9].	28
Figura 2.20: Soluções transmissão [16].	29
Figura 2.21: Carrier Aggregation - serving cells [8].	31
Figura 2.22: DL CoMP em transmissão conjunta entre dois transmissores de diferentes eNodeB's para o mesmo UE [8].	32
Figura 2.23: DL CoMP em transmissão dinâmica onde cada transmissor emite em diferentes subframes para o mesmo UE [8].	32
Figura 2.24: Interface Atoll [22].	33
Figura 2.25: Fluxograma do planeamento de cobertura da rede.	34
Figura 2.26: Técnica de cell breathing [30].	36
Figura 2.27: SINR em função da distância entre o eNodeB e o UE.	38
Figura 2.28: Interface TEMS Investigation.	39
Figura 2.29: Processo de coleta de dados em MDT [20].	40
Figura 2.30: Interface do GeoSynthesis com tráfego por m ² .	40
Figura 2.31: Interface do GeoSynthesis dados de throughput.	41
Figura 2.32: Interface do GeoSynthesis com valores de CQI.	41

Figura 3.1: Tipos de células [34].	44
Figura 3.2: Modelos de propagação em função da frequência utilizada [36].	44
Figura 3.3: Modelos de propagação em função da altura da antena da estação rádio base [36].	45
Figura 3.4: Interferência co-canal entre duas células [60].	48
Figura 3.5: Planeamento de frequência para evitar interferência nos limites de célula. Sendo a largura de banda representada pela cor amarela e as restantes cores pelas frequências reutilizadas [43].	50
Figura 3.6: Distribuição diária de tráfego de voz (em erlangs) típica de uma rede movel.	51
Figura 3.7: Perfil de tráfego da utilização das diferentes aplicações móveis no ano de 2020 [48].	52
Figura 3.8: Troço entre Évora e Caia da nova linha férrea [38].	52
Figura 3.9: Sectorização de uma célula para três sectores de 120° [61].	54
Figura 3.10: Exemplo de antena omnidirecional com os seus diagramas de radiação respectivos [62].	54
Figura 3.11: Exemplo de antena directiva com os seus diagramas de radiação respectivos [62].	54
Figura 3.12: Zona de sombra [35].	57
Figura 3.13: Ilustração de PCI Confusion (esquerda) e PCI Collision (direita) [39].	58
Figura 3.14: Esquema de radiação com tilt mecânico e eléctrico (adaptado de [45]).	60
Figura 3.15: Esquemático entre os vários intervenientes no cálculo do tilt [50].	61
Figura 3.16: Área em estudo – zona rural entre a localidade de Alandroal e a fronteira entre Portugal e Espanha, com futura ferrovia tida em conta.	62
Figura 4.1: Valores de RSRP obtidos através de simulação [64].	64
Figura 4.2: Best Server's obtidos através de simulação [64].	65
Figura 4.3: Valores de SINR obtidos através de simulação [64].	66
Figura 4.4: Valores de BLER obtidos através de simulação [64].	66
Figura 4.5: Valores de RSRQ obtidos através de simulação [64].	68
Figura 4.6: Valores de throughput para L800 obtidos através de simulação [64].	69
Figura 4.7: Valores combinados de throughput para L800 e L1800 obtidos através de simulação [64].	70
Figura 4.8: Relações de vizinhança da rede planeada [64].	71
Figura 4.9: Variação do custo médio para o cliente de uma chamada de 3 min ao longo de 25 anos.	74
Figura A.1: Elevação do terreno.	82
Figura A.2: Terreno rugoso.	82
Figura A.3: Presença de obstáculo.	82
Figura A.4: Elevação do terreno.	82
Figura A.5: Superfície aquosa.	82
Figura C.1: Localização ERB1.	90

Figura C.2: Localização ERB2.	91
Figura D.1: Definição de bandas LTE utilizadas.	92
Figura D.2: Definição das prioridades das bandas LTE utilizadas.	92
Figura D.3: Definição das características do MHA utilizado.	92

Lista de Acrónimos

1G	Primeira Geração
2G	Segunda Geração
3G	Terceira Geração
4G	Quarta Geração
AM	Amplitude Modulation
AMBR	Aggregate Maximum Bit Rate
AMC	Adaptive Modulation and Coding
ANACOM	Autoridade Nacional de Comunicações
ANR	Automatic Neighbour Relation
ARP	Allocation and Retention Priority
AuC	Authentication Center
BCCH	Broadcast Control Channel
BLER	Block Error Rate
CA	Carrier Aggregation
CC	Component Carrier
CCCH	Common Control Channel
CDR	Call Drop Rate
CINR	Carrier to Interference plus Noise Ratio
CoMP	Coordinated Multi Point
CQI	Channel Quality Indicator
CS	Circuit Switching
CSFB	Circuit-Switched Fall-Back
DCCH	Dedicated Control Channel
DL-SCH	Downlink Shared Channel
DRX	Discontinuous Reception
DTCH	Dedicated Traffic Channel
EIRP	Equivalent Isotropically Radiated Power
EPC	Evolved Packet Core
EPS	Evolved Packet System
ERB	Estação Rádio Base
E-UTRAN	Evolved – UMTS Terrestrial Radio Acces
FDD	Frequency Division Duplexing
FFR	Fractional Frequency Reuse
FM	Frequency Modulation
FSS	Frequency Selective Scheduling
GBR	Guaranteed Bit Rate
GTP	GPRS Tunneling Protocol
GSM	Global System for Mobile Communications

HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request
HFR	Hard Frequency Reuse
HSS	Home Subscriber Server
ICIC	Inter-Cell Interference Coordination
IMS	IP Multimedia Subsystem
KPI	Key Performance Indicator
LA	Location Area
LU	Location Update
LoS	Line of Sight
LTE	Long Term Evolution
MAC	Medium Access Control
MAPL	Maximum Allowable Path Loss
MBR	Maximum Bit Rate
MCCH	Multicast Control Channel
MCH	Multicast Channel
MDT	Minimization Drive Test
MHA	Mast Head Amplifier
MI	Margem de interferência
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MME	Mobility Management Entity
MMS	Multimedia Messaging Service
MTCH	Multicast Traffic Channel
NAS	Non-Access Stratum
Non-GBR	Non-Guaranteed Bit Rate
NSA	Non-standalone
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PAPR	Peak to Average Power Ratio
PBCH	Physical Broadcast Channel
PCELL	Primary Cell
PCH	Paging Channel
PCI	Physical Cell Identity
PCRF	Policy and Charging Resource Function
PDB	Packet Delay Budget
PDCCH	Physical Downlink Control Channel
PDCP	Packet Data Convergence Protocol
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel
PER	Packet Error Rate
PHY	Physical Layer
PM	Phase Modulation
PMCH	Physical Multicast Channel

PMI	Precoding Matrix Indicator
PMIP	Proxy Internet Protocol
PRACH	Physical Random Access Channel
PS	Packet Switching
PUCCH	Physical Uplink Control Channel
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel
P-GW	Packet Data Network Gateway
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QCI	QoS Classe Identifier
QoE	Quality of Experience
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RA	Routing Area
RAT	Radio Access Technology
RB	Resource Block
RBGA	Resource Block Group Assignment
RET	Remote Electrical Tilt
RLC	Radio Link Control
ROHC	Robust Header Compression
RRC	Radio Resource Control
RRC MR	Radio Resource Control Measurements Reports
RRT	Round Trip Time
RSI	Root Sequence Index
RSRP	Reference Signal Received Power
RSRQ	Reference Signal Received Quality
RSSI	Received Signal Strength Indicator
SAE	System Architecture Evolution
SC-FDMA	Single-Carrier Frequency Division Multiple Access
SFR	Soft Frequency Reuse
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio
SIP	Session Initiation Protocol
SISO	Single input single output
SMS	Short Message Service
SRVCC	Single Radio Voice Call Continuity
S-GW	Serving Gateway
TA	Tracking Area
TDD	Time Division Duplexing
TE	Tilt Eléctrico
TM	Tilt Mecânico
TMN	Telecomunicações Móveis Nacionais

TTI	Transmission Time Interval
UE	User Equipment
UL-SCH	Uplink Shared Channel
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
UTRAN	UMTS Terrestrial Radio Acces
VoIP	Voice over Internet Protocol
VoLTE	Voice over LTE

Lista de Símbolos

α_{av}	Abertura vertical da antena
α_{elec}	Ângulo de <i>tilt</i> eléctrico
α_{mech}	Ângulo de <i>tilt</i> mecânico
α_{tilt}	Ângulo total de <i>tilt</i>
γ	Índice de decaimento da potência
Δh	Delta entre a altura da base da estrutura onde está instalada a estação rádio base e a altura do dispositivo móvel
B	Largura de banda
C_{3min}	Custo médio de uma chamada de 3 minutos
Cod	Taxa de codificação
C_{fa}	Custo fixo anual
C_i	Custo inicial
C_{PROJ}	Custo do projecto
C_t	Custo da torre
d	Distância entre emissor e receptor
d_c	Distância entre a célula servidora e o móvel
d_i	Distância entre a célula que contém o canal adjacente e o móvel
D	Distância entre células co-canal
$D_{subframe}$	Duração do <i>subframe</i>
F	Frequência de transmissão
F_c	Ganho resultante da variação dos <i>tilts</i> eléctricos da antena
G_a	Somatório do ganho da antena de transmissão e de recepção
G_{Ant}	Ganho da antena de transmissão
h	Altura da torre
H_t	Altura da antena de transmissão (eNodeB)
H_r	Altura da antena de recepção (UE)
I	Potência associada aos diversos sinais interferentes
I_{ca}	Interferência de canal adjacente
I_{cc}	Interferência co-canal
I_T	Interferência total
ICA	Isolamento de canal adjacente
K_c	Factor de correcção morfológico
L_{BL}	Perdas devido ao corpo humano (<i>body loss</i>)
L_{BPL}	Perdas por penetração em edifícios
L_{CPL}	Perdas por penetração em carros
L_{Prop}	Perdas na propagação do sinal

L_{RX}	Perdas na recepção
L_{TX}	Perdas na transmissão
N	Número de subportadoras por largura de banda
$N_{bits/simb}$	Número de bits por símbolo
N_{cc}	Número de células por cluster
N_{ch}	Número de canais
N_{RB}	Número de <i>resource blocks</i>
N_{simb}	Número de símbolos por subportadoras
N_{SP}	Número de subportadoras por <i>resource blocks</i>
$N_{streams}$	Ordem da configuração MIMO
NF_{RX}	Noise figure do receptor
P_{AMP}	Potência do amplificador
P_{RX}	Potência recebida
P_{TX}	Potência de transmissão
$P_{TX/RB}$	Potência de transmissão por RB
Q_{DL}	Carga do sistema em <i>downlink</i>
Q_{UL}	Carga do sistema em <i>uplink</i>
R	Raio da célula
R_{bu}	Débito binário por utilizador
r_{cc}	Razão de reutilização co-canal
r_p	Receitas de projecto anuais
S_{RX}	Sensibilidade do receptor
$SINR_{min}$	SINR mínimo necessário para a ligação
TN	<i>Thermal noise</i>
t_{ir}	Taxa de retorno interno
t_r	Tempo de retorno do projecto
T_{tel}	Tráfego médio por canal
U	Utilizadores

1. Introdução

1.1 Motivação

A forma como as pessoas comunicam actualmente tem vindo a sofrer alterações, levando as redes móveis a apresentarem um crescimento intenso e um aumento exponencial de tráfego associado à procura da parte dos utilizadores e também do aumento da densidade populacional nas zonas urbanas, sendo expectável que nos próximos anos o crescimento continue a apresentar a mesma tendência que até então. Durante as primeiras gerações de comunicações móveis os serviços mais procurados eram os serviços de voz e mensagens (SMS - *Short Message Service*), contudo com a evolução da tecnologia o tráfego de dados ganhou especial importância, esperando-se que ganhe cada vez mais relevância em relação ao tráfego de voz, havendo uma exigência da parte dos utilizadores de débitos binários mais elevados, incentivando tanto os operadores de telecomunicações como os seus parceiros a procurarem novas soluções e tecnologias para manter em bons níveis a *performance* das redes móveis e um elevado nível de competitividade. O crescimento do tráfego de dados deve-se essencialmente a um aumento do número de aplicações disponíveis aos utilizadores, impulsionadas pelo surgimento e evolução dos *smartphones*, como redes sociais, jogos online ou *video-streaming* cuja utilização requer grandes larguras de banda. Durante a passada década, esse aumento foi mais significativo, impulsionado pela aposta nos *smartphones* e pela transição das tecnologias anteriores para o LTE, tendo o tráfego aumentando tanto em *smartphones* como outros dispositivos como portáteis ou *tablets*, como é possível verificar na Figura 1.1.

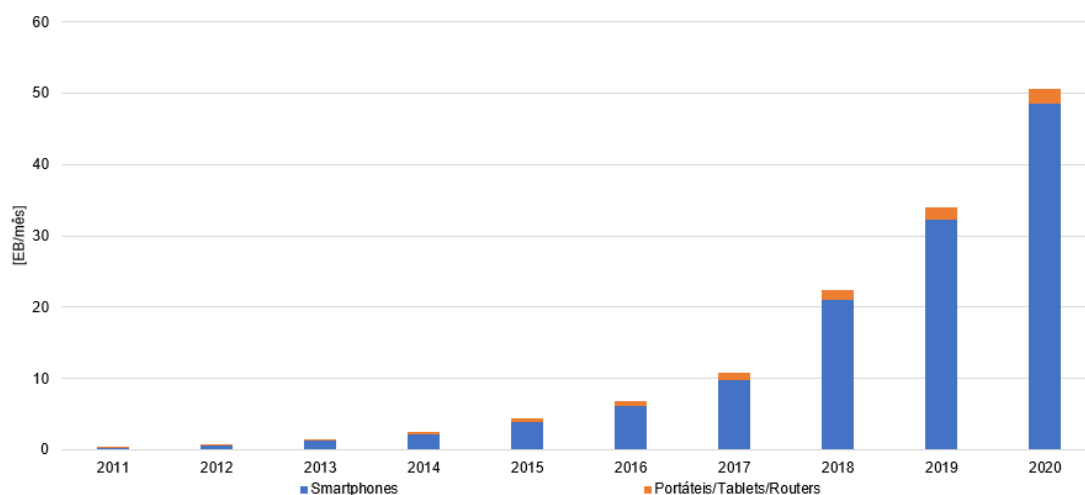


Figura 1.1: Evolução do tráfego móvel entre os dispositivos móveis [56].

Na passada década, o número de subscritores de serviços de comunicações móveis apresentou um crescimento galopante, cerca de 80% entre 2010 e 2020, tendo ultrapassado em 2015 o total da população mundial (Figura 1.2).

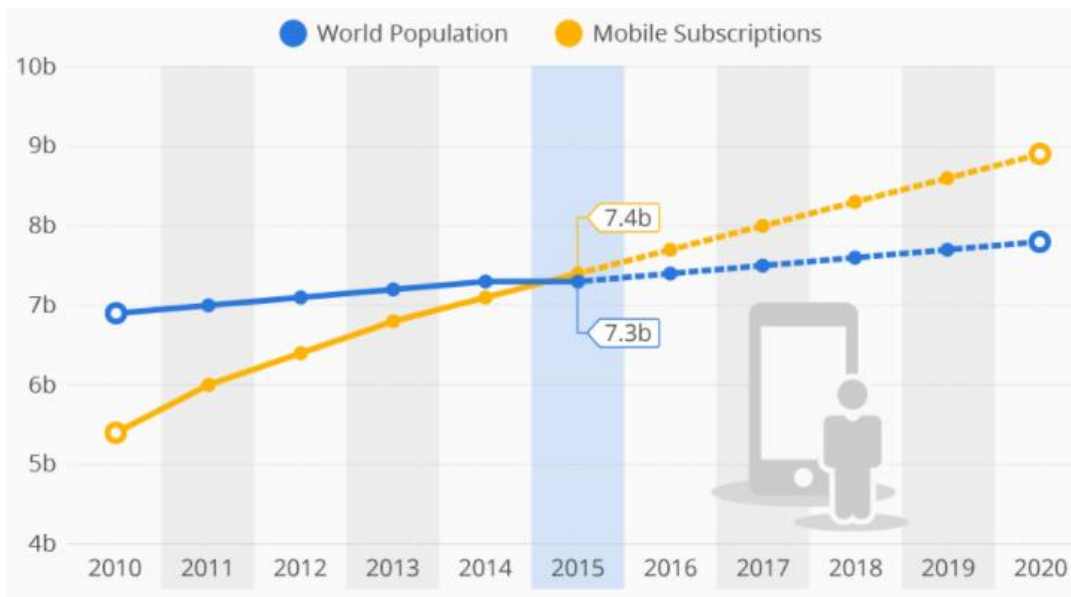


Figura 1.2: Subscrições móveis em comparação com a população mundial [54].

Aquando do surgimento das comunicações, com a primeira geração (1G), foi possível efectuar chamadas em movimento mas com baixa qualidade de voz e apresentando interrupções frequentes, transmitindo a informação em modo analógico com modulação em frequência (FM), não sendo possível realizar qualquer sessão de dados. Os primeiros dispositivos móveis também não eram fáceis de transportar dado o seu tamanho e peso, apresentado custos elevados e autonomias reduzidas. Apenas com o surgimento da segunda geração (2G) foram disponibilizados aos utilizadores dispositivos móveis mais baratos e práticos (com tamanho mais reduzido e fáceis de transportar), surgindo novos serviços como a SMS e passando da era analógica à era digital. Com a terceira geração (3G) foi possível começar a efectuar-se ligações à internet (com débitos binários semelhantes aos da rede fixa da mesma altura) e chamadas de vídeo com qualidade. Actualmente, a quarta geração (4G) ou o LTE (*Long Term Evolution*) apresenta-se como a tecnologia mais madura e avançada, em relação às suas antecessoras, em diversos níveis como latência e débito binário, tendo vindo a dar resposta na passada década às necessidades dos utilizadores, aumentando a procura de TV's interactivas ou jogos *online*, apresentando débitos binários tão bons ou melhores do que os da rede fixa [53]. Esta tecnologia opera com diferentes larguras de banda e em diferentes zonas do espectro radioelétrico, podendo ocupar zonas do espectro anteriormente usadas pelo GSM ou UMTS através dum processo de *refarming* (reutilização de zonas do espectro, que inicialmente foram atribuídas a uma determinada tecnologia, de maneira a poderem ser utilizadas numa tecnologia diferente da inicial). Com a evolução do LTE para o LTE-Advanced foi possível obter valores de *throughput* na ordem dos 300 Mbps, podendo alcançar até 600 com determinadas *features*, sendo que nos últimos anos, com o surgimento do 5G, foi possível obter valores de *throughput* superiores a 1 Gbps (Figura 1.3).

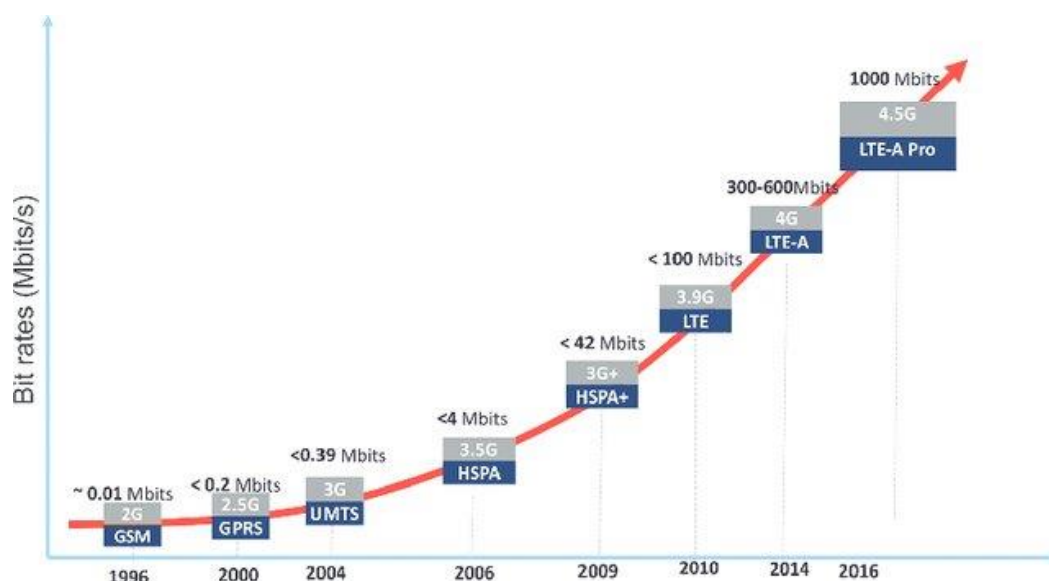


Figura 1.3: Evolução do débito binário consoante as tecnologias de redes móveis utilizadas [55].

Desta maneira, a motivação para a escolha deste tema foi desenvolver uma rede móvel em LTE, uma vez que actualmente é a tecnologia que apresenta melhores *performances* e que no futuro ainda estará muito interligada com o 5G.

1.2 Evolução histórica das redes móveis em Portugal

Os primeiros dispositivos móveis surgiram em Portugal no final da década de 80, sendo que a primeira operadora de telecomunicações a fornecer serviço aos utilizadores foi a TMN (Telecomunicações Móveis Nacionais), que deu origem em 2014 à actual MEO, tendo posteriormente aparecido a Telecel e a Optimus, tendo sido lançado por esta última o serviço de SMS, tornando os *paggers* dispositivos obsoletos [57]. Através da TMN foi lançado o Mimo, em 1995, o conceito de cartão pré-pago, revolucionando o mercado das telecomunicações, algo inédito no mundo até então, uma vez que o utilizador não paga uma assinatura de serviço mas sim apenas o tempo de uso. Inicialmente utilizou na sua rede a tecnologia GSM (2G), tendo posteriormente em 2004 começado a funcionar também com o UMTS (3G) lançando assim o serviço de videochamadas. Em 1998 a TMN alcança o primeiro milhão de clientes, tendo este número duplicado no ano seguinte, continuando nos dias de hoje como a operadora com uma quota de clientes mais elevada [58].

Em 2001, surge no mercado de telecomunicações a Vodafone Portugal tendo acontecido a sua fusão com a Telecel e, em 2002, lançam no mercado novas tecnologias como o serviço de mensagens multimédia (MMS – *Multimedia Messaging Service*) e serviços de visualização de TV em dispositivos móveis.

Os *smartphones* surgem em 2008 com o iPhone OS 2, apresentando desde o início uma grande aceitação da parte dos utilizadores e uma conseqüentemente evolução da tecnologia associada aos dispositivos, desde então.

1.3 Objectivos

O LTE hoje em dia firma-se como uma tecnologia madura e que apresenta uma resposta forte para os requisitos exigentes dos utilizadores, fazendo com que os operadores continuem a reforçar a reforçar a capacidade das suas redes através de novas bandas.

Esta dissertação foca-se numa área de estudo real, podendo ser aplicada posteriormente na mesma, sendo que é essencial um bom planeamento rádio de forma a assegurar o seu bom funcionamento e *performance* máxima.

Deste modo, esta dissertação tem como objectivo executar correctamente um planeamento de uma rede rádio móvel de quarta geração ou LTE, tendo em contas os seus custos associados e clarificando o que é expectável em termos de *performance* de uma rede LTE, através de um estudo teórico que descreve o impacto de alguns parâmetros e posteriormente de uma análise feita para assegurar a boa execução do primeiro, com simulações realizadas utilizando a ferramenta de planeamento e optimização Atoll. Os parâmetros analisados irão ser diversos, como a largura de banda utilizada, MIMO ou o tipo de antena de transmissão. A área de estudo é uma região rural de baixa densidade populacional, situada no Norte Alentejano com pequenas zonas onde o terreno possui um perfil um pouco acidentado, influenciando a qualidade do sinal necessário para estabelecer a conexão entre a rede e o utilizador. Na mesma área está a ser contruída actualmente uma linha férrea para transporte de mercadorias e passageiros que será tida em conta durante o planeamento.

1.4 Organização da dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos, estando estruturada da seguinte forma:

- **Capítulo 1: Introdução** – neste capítulo é feita uma breve introdução ao tema e ao estudo realizado, apresentando as motivações para a realização desta dissertação ao descrever a evolução histórica dos subscritores e das diferentes tecnologias de acesso à rede móvel, os objectivos pretendidos e por fim, apresentando-se detalhadamente a organização da dissertação ao longo do relatório;
- **Capítulo 2: Estado de Arte** – neste capítulo é feito um levantamento dos conceitos e tecnologias fundamentais para a compreensão do estudo em causa, através de uma descrição detalhada sobre os conceitos teóricos relacionados com as redes E-UTRAN, como arquitectura ou débitos binários e o funcionamento da mesma demonstrando como é realizado o acesso rádio em *downlink* e *uplink*, assim como os canais utilizados para o mesmo. Para reforço da capacidade são descritas também soluções como o MIMO ou *Carrier Aggregation (CA)*.
Posteriormente são descritas diversas ferramentas de apoio ao planeamento rádio ou à sua optimização de modo a garantir boas condições rádio ou monitorar as mesmas de maneira a garantir a satisfação dos utilizadores através de bons desempenhos na rede móvel;
- **Capítulo 3: Planeamento** – neste capítulo apresenta-se uma descrição teórica dos equipamentos, parametrização e bandas a utilizar na fase de simulação, assim como os

valores teóricos para os valores de *link budget*, SINR e débito binário em ambos os sentidos, *downlink* e *uplink*. São abordados também os modelos de propagação utilizados, assim como o planeamento das bandas e frequências a ser utilizadas, identificadores de cada célula e os conceitos respectivos valores de *tilt* eléctrico e *tilt* mecânico, fundamentais para o processo de planeamento rádio;

- **Capítulo 4: Análise de Resultados** – neste capítulo é feita a apresentação e análise dos resultados, obtidos através de simulação, pela ferramenta de planeamento *Atoll*. Dentre os resultados analisados estão os valores para a potência do sinal recebido e a qualidade, taxa de erros, relação sinal-ruído e *throughput*. Ainda neste capítulo é possível encontrar também um planeamento de vizinhas realizado para a rede móvel planeada e uma análise de custos de implementação do projecto.
- **Capítulo 5: Conclusão** – neste capítulo são apresentadas as conclusões tiradas com o estudo em causa, fazendo-se uma breve referência às tecnologias futuras e do que é esperado das comunicações móveis nos próximos anos.

Por fim, encontra-se um conjunto de anexos com informações complementares ao caso de estudo, como os modelos de propagação e as fichas técnicas dos equipamentos a serem utilizados.

1.5 Contribuição Principal

Com a realização deste trabalho, foi possível demonstrar os factores a ter em conta quando se elabora o planeamento de uma rede móvel assim como as características rádio a ter em conta para garantir uma boa qualidade de experiência ao utilizador final, que é sempre o objectivo final de qualquer operador de telecomunicações.

Capítulo 2

2. Estado de Arte

Desde o início do século que a internet e as capacidades que a mesma traz para a melhoria do estilo de vida da população, tem levado a um aumento exponencial de tráfego.

Com o GSM foi possível passarmos de uma simples chamada de voz (existe na primeira geração) para uma sessão de dados com débitos à volta de 13 Kbps. Com o crescimento do número de utilizadores e tráfego, especialmente nas zonas urbanas, foi necessária uma alternativa à segunda geração de comunicações móveis. Daí surgiu o 3G, capaz de suportar um maior número de utilizadores e com débitos binários que podem chegar a 11 Mbps [1].

Na passada década o tráfego mundial na rede móvel aumentou mais de dez vezes, entre 2012 e 2017 (Figura 2.1), e estima-se que o tráfego em 2022 seja superior do que a todos os anos combinados até então.

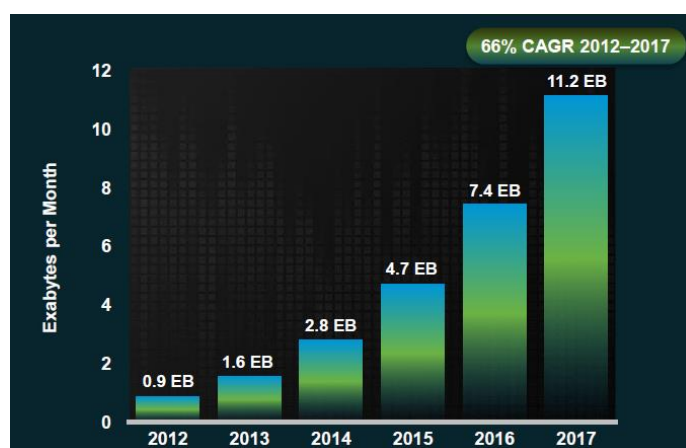


Figura 2.1: Tráfego móvel total global [1].

2.1 LTE

Com a evolução da tecnologia e a galopante exigência de uma rede móvel capaz de fornecer aos utilizadores um *throughput* cada vez mais elevado de modo a que os mesmos usufruam de todas as funcionalidades dos seus equipamentos, tanto a nível de lazer como a nível profissional, surgiu o LTE (*Long Term Evolution*), integrado na quarta geração de redes móveis e que foi lançado primeiramente na Suécia e Noruega em 2009 e sido implantado em todo o mundo ao longo da passada década, com o principal objectivo de assegurar grandes débitos binários e capaz de suportar os novos serviços multimédia que têm surgido.

2.1.1 Débito binário

Com o LTE foi-se capaz de superar os valores de débito binários fornecidos pelo UMTS (3G) em até dez vezes no *downlink*, conseguindo valores de *throughput* superiores a 100 Mbps em

downlink e de 50 Mbps em *uplink*, com baixas latências (10 ms) e uma largura de banda que varia entre o 1,25 MHz até 20MHz [2].

O débito é resultado de vários parâmetros como a configuração do MIMO, a modulação utilizada ou o rácio de código do canal.

O débito binário no *downlink* pode ser calculado através da fórmula:

$$R_b = \frac{N_{RB} \times N_{SP} \times N_{bits/simb} \times N_{simb} \times Cod \times N_{streams}}{D_{subframe}} \quad (2.1)$$

Onde:

- N_{RB} – Número de *resource blocks*;
- N_{SP} – Número de subportadoras por *resource blocks*;
- $N_{bits/simb}$ – Número de bits por símbolo, consoante a modulação utilizada;
- N_{simb} – Número de símbolos por subportadoras;
- Cod – Taxa de codificação;
- $N_{streams}$ – Ordem da configuração MIMO;
- $D_{subframe}$ – Duração do *subframe*.

Após ser calculado o débito binário total no *downlink*, é possível saber o débito binário médio por utilizador (R_{bu}), dividindo o primeiro pelo número de utilizadores (U):

$$R_{bu} = \frac{R_b}{U} \quad (2.2)$$

2.1.2 Arquitectura

A E-UTRAN (*Evolved – UMTS Terrestrial Radio Acces Network*) é a arquitectura de rede existente actualmente para LTE, associada à parte de rádio (Figura 2.2), baseada em IP, capaz de suportar apenas serviços comutados por pacotes, com débitos binários superiores e latências mais baixas, evoluindo da anterior UTRAN (*UMTS Terrestrial Radio Acces Network*). O objectivo foi garantir uma rede com menos níveis e equipamentos necessários de modo a reduzir o número de falhas, custos associados, atrasos na propagação do sinal entre os diversos equipamentos da rede e reduzir o tempo de indisponibilidade do sistema. Relativamente à parte de *core* designa-se SAE (*System Architecture Evolution*) no qual faz parte o EPC (*Evolved Packet Core*), ilustrado na Figura 2.2. Juntos, o rádio (E-UTRAN) e o *core* (SAE) formam o EPS (*Evolved Packet System*) [6].

As funções rádio são atribuídas aos vários eNodeB's (estações rádio base ou *site*), ligados entre si através da interface X2, formando a E-UTRAN, sendo o *core* constituído pelo MME (*Mobility Management Entity*) e o *Serving Gateway/Packet Data Network Gateway* (S-GW/P-GW) [4].

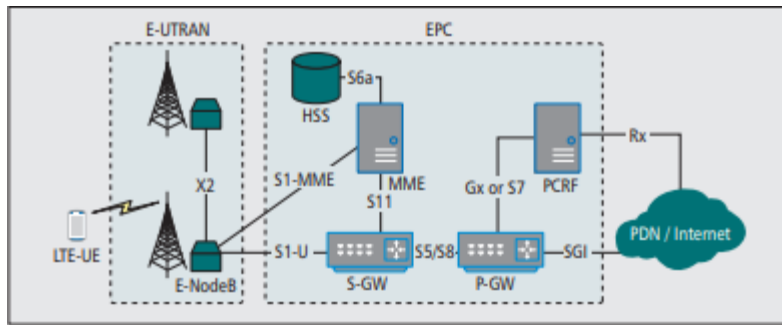


Figura 2.2: Arquitectura de rede LTE [4].

- **LTE-UE** – Dispositivo móvel do utilizador (UE – *User Equipment*) que poderá ser, entre outros, um *smartphone*, *tablet* (...);
- **E-NodeB** – A E-NodeB (*Evolved Node B*) são as estações rádio base, têm como função:
 - Interferência *Inter-Cell*: as E-NodeB's assegurar uma gestão dos valores de interferência no UE ao controlarem os valores de interferência nos recursos rádio disponíveis nas diferentes células, através da troca de informação entre estas;
 - *Load Balancing* (balanceamento da carga): Através desta *feature* (funcionalidade) é possível efectuar uma gestão do tráfego, ao assegurar que este se encontra bem distribuído entre as diferentes células. Em caso de existirem células com cargas elevadas, que podem levar a problemas de baixos *throughput's* ou de interferência e conseqüentemente quedas de chamada, o E-NodeB pode decidir realizar um *handover* entre células de modo a assegurar uma boa destruição do tráfego e assim uma melhor *performance* da rede móvel, garantindo uma melhor *Quality of Service* (QoS) dos seus serviços aos utilizadores;
 - Mobilidade: o E-NodeB é responsável por assegurar a mobilidade do dispositivo móvel entre células de maneira a garantir que as ligações à rede não são perdidas. Para um correcto *handover* é necessário que as leituras das medidas da rede, como potência ou qualidade do sinal, determinem correctamente quando deve ser realizado um *handover* entre células vizinhas, garantindo qual a célula alvo está em melhores condições para receber a continuidade da ligação com o UE;
 - *Paging*: As mensagens de *paging* permitem localizar um determinado UE quando este se encontra em *idle mode* e solicitar que este entre em contacto com a rede móvel;
 - Sincronização: Realizar a sincronização entre a rede EPS e o UE;
 - Transmissão de dados: Asseguram a transmissão e a recepção, na interface rádio. As transmissões rádio, como as mensagens de *paging* ou *broadcast*, são transmitidas no sentido descendente (*downlink*) e ascendente (*uplink*) entre o UE e o EPC. O E-NodeB garante também modulação e desmodulação dos sinais.

- **MME** – Equipamento principal no *core* que tem como função gestão da mobilidade, sinalização e controlo e distribuição das mensagens de *paging* na rede móvel com destino aos E-NodeB's. A sinalização é processada pelo MME entre o UE e a *core network*, garantindo também o estabelecimento, manutenção e libertação de *bearers* que permitem as ligações de dados, gestão de *handover* e *roaming*, retransmissões e servir como *control plane* entre a rede LTE e as gerações anteriores [5]. Ao interagir com o HSS (*Home Subscriber Server*), o MME assegura assim uma autenticação de todos os utilizadores e verificação dos seus respectivos perfis. O MME garante também uma função de mobilidade entre o LTE e as tecnologias inferiores, 2G e 3G;
- **HSS (*Home Subscriber Server*)** – Base de dados com os dados de todos os utilizadores (perfil, localização...), podendo ser anexado no mesmo o centro de autenticação (AuC – *Authentication Center*) responsável pela autenticação e segurança dos utilizadores na rede;
- **S-GW** – O S-GW recebe e encaminha os vários pacotes IP e serve de âncora quando o UE necessita realizar um *handover* (troca) entre eNodeB's ou uma transição entre o LTE e outro RAT, para caso seja necessário haver uma retransmissão de informação entre o antigo e o novo eNodeB ou outro RAT. Serve também de plataforma para recolha de informações estatísticas da rede como consumos de tráfego. Encontra-se ligado ao *Packet Data Network* (P-GW) pela interface S5/S8, baseada em *Proxy Internet Protocol* (PMIP) ou *GPRS Tunneling Protocol* (GTP) [5];
- **P-GW** – O P-GW é responsável pela atribuição de endereços de IP ao UE, ligações com as redes de pacotes de dados como a Internet, cuja origem seja em rede fixa ou móvel se baseia em *Session Initiation Protocol* (SIP) ou em *IP Multimedia Subsystem* (IMS), e filtragem de pacotes em *downlink* consoante a sua prioridade, definida previamente pelo QoS [5];
- **PCRF (*Policy and Charging Resource Function*)** – O PCRF permite ou rejeita os pedidos multimédia que chegam à rede móvel. É responsável pela tarifação dos utilizadores e pelo controlo de recursos, ajustando o débito binário em função do QoS necessário [6];
- **Interfaces da arquitectura LTE [7]:**
 - Interface X2: Interface que permite a conexão entre os diferentes eNodeB's de maneira a permitir uma fluidez de tráfego entre os mesmo através de declaração de vizinhas de modo a permitir *handover* entre diferentes estações rádio base derivado a situações de perda de sinal, aumento da carga na célula ou zonas de interferência. A declaração de vizinhas é realizada pelo ANR (*Automatic Neighbour Relation*), sendo implementado em cada eNodeB, reduzindo o aumento do *call drop rate* (CDR) devido a má definição de vizinhas ou ausência destas. Nas tecnologias anteriores o planeamento de vizinhas era feito por *tools* de planeamento, estimando através da propagação do sinal as vizinhas

necessárias para o *handover* ser executado. A função ANR permite uma constante medição do nível de sinal das vizinhas, através de relatórios de medidas enviados pelo UE, de modo a adicionar ou remover as mesmas automaticamente sempre que se justifique. A interface encontra-se estruturada em X2-CP (*Control Plane*) e X2-UP (*User Plane*), sendo que o primeiro está relacionada com a sinalização e o segundo com a camada rádio;

- Interface S1: Interface que estabelece a ligação entre o eNodeB e o MME. Semelhante à interface X2, a interface S1 encontra-se também dividida em S1-UP e S1-CP, o primeiro relacionado à transferência de dados entre o eNodeB e o S-GW e o segundo com sinalização. A interface é responsável pela fase de *setup* e *release* da sessão de dados, sinalização de *handover* e *paging*, entre outros;
- Interface S1-U: Interface que realiza a ligação entre os eNodeB's e o S-GW, permitindo o fluxo de dados dos subscritores;
- Interface S11: Interface entre o S-GW e o MME, utilizado para troca de sinalização;
- Interface S6A: Interface que faz a conexão entre o MME e o HSS de modo realizar a transferência dos dados de subscrição e autenticação dos utilizadores da rede;
- Interface S5/S8: Interface que estabelece a ligação entre o S-GW e o P-GW. A principal diferença entre o S5 e o S8 reside no facto de que o S8 é utilizado em *roaming* (entre diferentes operadores), enquanto o S5 é utilizado na rede interna.
- Interface Gx: Interface que estabelece a ligação entre o P-GW e o PCRF, permitindo a conhecer as políticas de qualidade de serviço e das tarifas a serem aplicadas;
- Interface SGI: Interface entre o P-GW e as redes externas de pacotes, garantindo assim o acesso à internet;
- Interface Rx: interface responsável pela ligação entre o PCRF e as redes externas.

2.1.3 Mobilidade

De modo a ser possível haver comunicações móveis é necessário que uma rede móvel seja constituída por um ou mais equipamentos móveis (*smartphones, tablets...*) conectados a uma estação rádio base (ERB). Cada ERB pode ser constituída por uma ou mais células, sendo que o equipamento móvel decide a qual se conectar através de vários factores como potência recebida ou níveis de interferência, estando constantemente a medir os diferentes níveis de sinal no *downlink* que recebe e reportando de volta ao eNodeB de maneira a trocar de célula (*handover*) caso exista, por exemplo, uma degradação nos valores de potência ou uma carga de utilizadores excessiva na célula. Com esta informação, o eNodeB envia a ordem de *handover* para o UE mudar de célula.

Tipos de *handover*:

- **Intra eNodeB handover** – *handover* entre células pertencentes ao mesmo eNodeB, sendo que neste caso não são necessárias as interfaces X2 ou S1 [5]. Processo ilustrado na Figura 2.3;

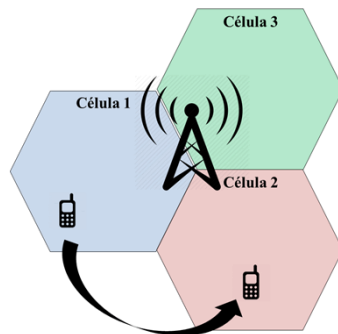


Figura 2.3: *Handover* entre células do mesmo eNodeB.

- **Inter eNodeB handover (Intra MME/S-GW)** – este tipo de *handover* utiliza uma das interfaces X2 ou S1 quando os eNodeB's de origem e destino pertencem ao mesmo MME/SGW. A interface X2 faz a ligação entre duas eNodeB's vizinhas de modo a coordenar os recursos rádio e a realizar correctamente o *handover*. A interface S1 é utilizada quando o UE necessita de realizar um *handover* para uma zona pertencente a outro MME/SGW, quando falha a tentativa de *handover* pela interface X2 ou este não se encontra configurado [5].
- **Inter eNodeB handover (Intra MME e intra S-GW)** – este tipo de *handover* acontece quando o UE necessita de trocar para uma célula com o mesmo S-GW mas diferente MME, utilizando a interface S1 [10];
- **Inter eNodeB handover (Inter MME/S-GW)** – como mencionado, este tipo de *handover* é despoletado quando o UE necessita de trocar de MME e SGW, sendo o *handover* efectuado pela interface S1 [10];
- **Inter RAT Handover** – o inter RAT *handover* ocorre quando o UE necessita realizar uma troca de tecnologia de acesso rádio (RAT), neste caso, de LTE para GSM ou UMTS [5]. Processo ilustrado na Figura 2.4.

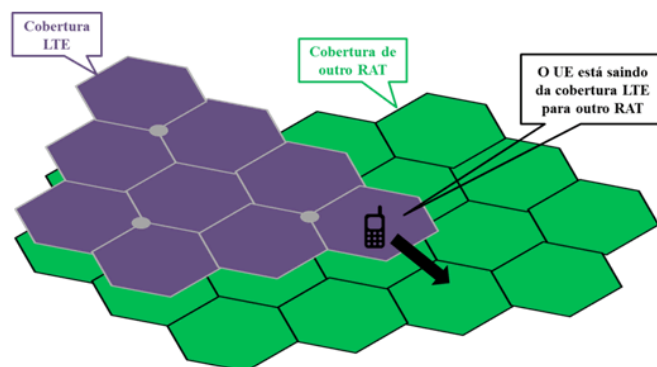


Figura 2.4: Inter RAT *handover*.

2.1.4 VoLTE

Inicialmente o LTE foi concebido com o objectivo de melhorar o tráfego de dados, mas a tecnologia suporta tráfego de voz através do VoLTE (*Voice over LTE*). A chamada é feita por meio de protocolo IP e como a ligação não sai da rede LTE a mesma é tratada como tráfego de dados permitindo melhor qualidade na voz, tempos de *call setup success rate* (taxa de sucesso de estabelecimento de chamada) reduzidos e tráfego de dados mais rápidos enquanto em chamada de voz e vídeo.

Uma vez que o VoLTE está limitado a dispositivos que suportem LTE surgiu o CSFB (*Circuit-Switched Fall-Back*). As gerações anteriores (2G e 3G) operam em dois domínios: CS (*Circuit Switch*) para tráfego de voz e PS (*Packet Switching*) para tráfego de dados. O CSFB permite que o equipamento móvel possa ser transferido para a camada CS de uma das gerações anteriores de modo a poder efectuar a chamada, realizando antes medições nas redes 2G e 3G de modo a actualizar o MME que gere as ligações entre o LTE e as gerações anteriores e verificando qual a mais adequada para receber o equipamento móvel, transmitindo posteriormente ao mesmo que altere o seu RAT (*Radio Access Technology*) para a tecnologia seleccionada.

Dado que a implementação do LTE ainda não é uniforme em todas as redes e que podem existir zonas onde o LTE não está ainda disponível, surgiu o SRVCC (*Single Radio Voice Call Continuity*) de maneira a manter as chamadas de voz caso os utilizadores passem de uma zona com cobertura LTE para uma sem LTE, evitando assim uma queda na chamada uma vez que as gerações anteriores não suportam chamadas em VoIP (*Voice over Internet Protocol*) [3].

2.1.5 Esquemas de alocação espectral

As transmissões radio estão organizadas em *radio frames* de 10ms, podendo operar em dois modos, o tipo 1 denominado FDD (*Frequency Division Duplexing*) e o tipo 2 denominado TDD (*Time Division Duplexing*) [17].

As principais diferenças entre os dois modos baseiam-se no facto de que no FDD, ilustrado na Figura 2.5, cada *radio frame* divide-se em 10 TTI's (*Transmission Time Interval*) de 1 ms que por seu lado se dividem em dois *timeslots* com duração de 0,5ms (totalizando 20 *timeslots*) e necessita de duas frequências para conseguir emitir, uma em *downlink* e outra em *uplink*, dado que o transmissor e receptor operam em frequências diferentes (Figura 2.7). As bandas LTE utilizadas pelo modo FDD encontram-se descritas na Tabela 2.1.

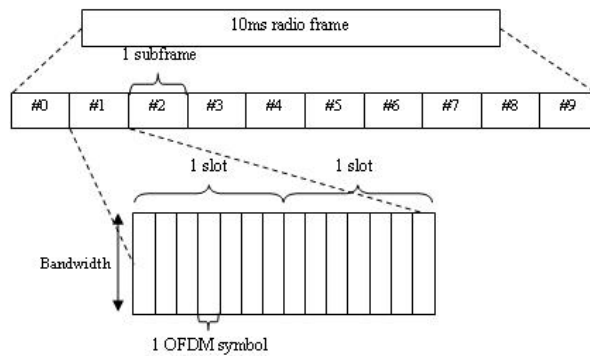


Figura 2.5: Frame structure do tipo 1 - FDD [17].

Número de Banda LTE	Frequências UL / DL [MHz]	Largura de Banda [MHz]
1	1920 – 1980 / 2110 – 2170	60
2	1850 – 1910 / 1930 – 1990	60
3	1710 – 1785 / 1805 – 1880	75
4	1710 – 1785 / 2110 – 2155	45
5	824 – 849 / 869 – 894	25
6	830 – 840 / 875 – 885	10
7	2500 – 2570 / 2620 – 2690	70
8	880 – 915 / 925 – 960	35
9	1750 – 1785 / 1845 – 1880	35
10	1710 – 1770 / 2110 – 2170	60
12	698 – 716 / 728 – 746	18
13	746 – 758 / 776 – 788	10
14	758 – 768 / 788 – 798	10
17	704 – 716 / 734 – 746	12
18	815 – 830 / 860 – 875	15
19	830 – 845 / 875 – 890	15
20	832 – 862 / 791 – 821	30

Tabela 2.1: Bandas LTE FDD (adaptado de [46]).

Por outro lado, no modo TDD, ilustrado na Figura 2.6, cada *radio frame* se divide em duas *half-frames* com 5 ms que por sua vez se dividem em *subframes* de 1ms e utiliza sempre a mesma frequência para a transmissão no *downlink* e *uplink* [18]. Dentro do *radio frame* TDD existem *subframes* especiais com um período de guarda GP (*guard period*) entre os campos DwPTS (*Downlink Pilot Time Slots*) e UpPTS (*Uplink Pilot Time Slots*). Este período de guarda serve para evitar conflitos entre as ligações de *downlink* e *uplink*, uma vez que devido à distância que o sinal percorre poderá existir um atraso e, desta maneira, o período de guarda fornece o tempo suficiente para que o sinal atrasado chegue ao UE e não haja colisão no canal. As bandas LTE utilizadas no modo TDD encontram-se descritas na Tabela 2.2.

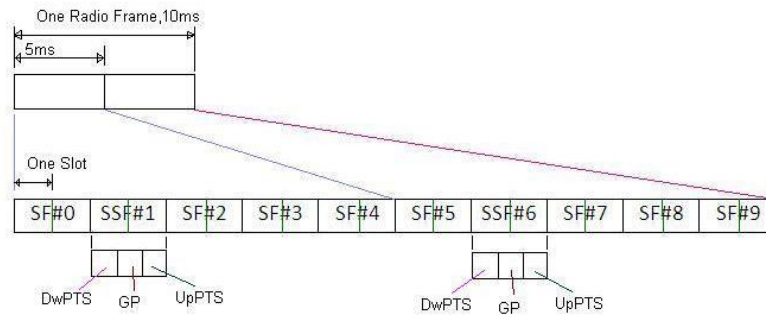


Figura 2.6: Frame structure do tipo 2 - TDD [18].

Número de Banda LTE	Frequências UL & DL [MHz]	Largura de Banda [MHz]
33	1900 – 1920	20
34	2010 – 2025	15
35	1850 – 1910	60
36	1930 – 1990	60
37	1910 – 1930	20
38	2570 – 2620	50
39	1880 – 1920	40
40	2300 – 2400	100

Tabela 2.2: Bandas LTE TDD (adaptado de [46]).

O modo FDD tem como vantagens o facto de não existir interferência entre os eNodeB's e de conseguir assegurar com eficiência tráfegos com quantidades de informação semelhante no *downlink* e *uplink*, como por exemplo chamadas de voz. O TDD, contrariamente, apresenta uma maior eficiência em tráfego com diferentes pesos no *downlink* e *uplink*, como por exemplo serviços multimédia, uma vez que sempre que exista um *slot* temporal sem utilização, este poderá ser usado por outro canal. Contudo, dado que os eNodeB's usam todos a mesma frequência no *downlink* e *uplink*, irá existir uma colisão entre as estações base, interferindo umas com as outras.

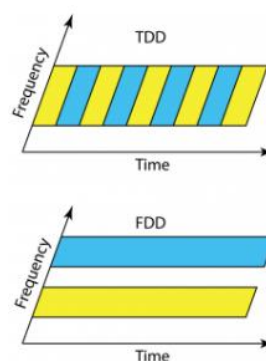


Figura 2.7: Modos FDD e TDD [19].

Com as diferentes larguras de banda possíveis de utilizar no LTE (1,4 MHz até 20 MHz) consegue-se um sistema adaptável ao volume de dados ou à qualidade de rede que se quer garantir, sendo que com larguras de bandas superiores a eficiência espectral melhora e consegue-se também maiores débitos binários, como se pode constatar pelos dados da Figura 2.8.

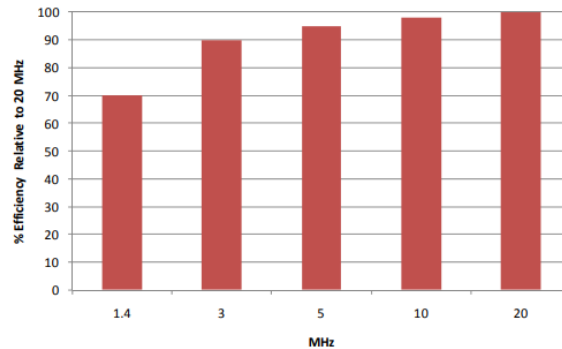


Figura 2.8: Eficiência espectral em função da largura de banda [26].

2.1.6 Técnicas de Acesso Múltiplo

No LTE o esquema de acesso múltiplo em *downlink* baseia-se em OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Acces*), ilustrado na Figura 2.9, e em *uplink* em SC-FDMA (*Single-Carrier Frequency Division Multiple Access*), ilustrado na Figura 2.11.

No esquema OFDMA a transmissão é feita digitalmente sendo o espectro dividido em subcanais estreitos onde cada um transporta parte do sinal, sendo depois combinados para obter os dados transmitidos. O OFDMA utiliza um conjunto de subportadoras sobrepostas no domínio da frequência, sendo moduladas com um dos esquemas utilizados em LTE (QPSK, 16QAM ou 64QAM), onde cada utilizador pode usar uma portadora diferente.

No LTE utiliza-se um espaçamento de 15 kHz entre portadoras, estando estas divididas em grupos de doze subportadoras com duração de 0,5 ms, constituindo assim um *resource block (RB)*, com largura de banda de 180 kHz, que é o recurso mais pequeno que pode ser alocado a um utilizado, estando o número de RB's dependente da largura de banda do canal usada [24]. Na Tabela 2.3 estão descritos o número de subportadores consoante a largura de banda de transmissão utilizada.

O número total de subportadoras em função dos RB's pode ser calculado através de (2.3), estando os valores disponibilizados na Tabela 2.4.

$$N_{SP} = 12RB + 1 \quad (2.3)$$

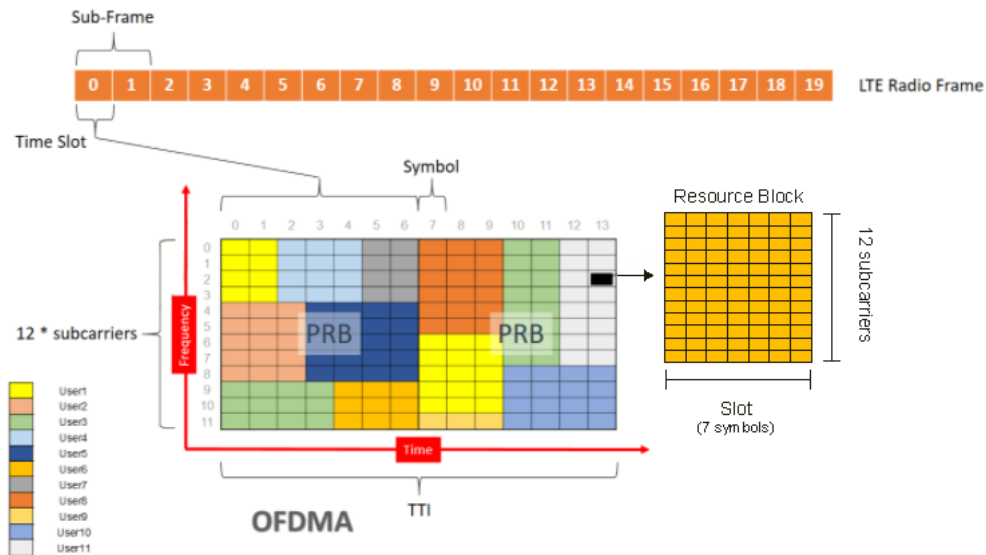


Figura 2.9: Esquema OFDMA (adaptado de [23]).

Parâmetro	Valor					
Largura de banda [MHz]	1.25	2.5	5	10	15	20
Subportadoras	75	150	300	600	900	1200

Tabela 2.3: Subportadoras consoante cada largura de banda de transmissão [25].

Parâmetro	Valor					
Largura do canal [MHz]	1.4	3	5	10	15	20
Resource Blocks	6	15	25	50	75	100
Subportadoras	72	180	300	600	900	1200

Tabela 2.4: Resource Blocks e subportadoras em função da largura de canal [25].

De maneira a reduzir a interferência inter-simbólica, é introduzido um tempo de guarda entre cada símbolo emitido, de modo a compensar o atraso na propagação no canal, como é possível verificar na Figura 2.10.

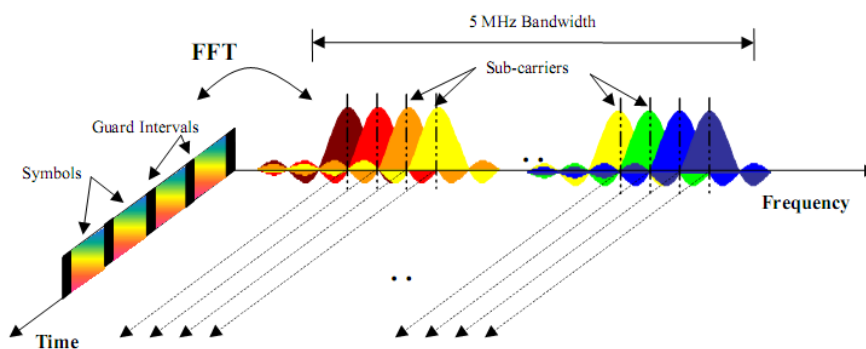


Figura 2.10: Representação OFDMA no domínio do tempo e frequência [24].

Com esta técnica é possível garantir uma melhor eficiência espectral, permitindo atingir maiores débitos binários, uma vez que não necessita de uma banda de guarda, podendo assim enviar-se uma maior quantidade de informação no mesmo tempo, mas em contrapartida apresenta um PAPR (*Peak to Average Power Ratio*) elevado, limitando a potência de transmissão em UL e reduzindo a cobertura. O PAPR está também relacionado com a eficiência do amplificador de potência, alcançado o máximo quando este trabalha perto de valores de saturação, necessitando de melhores amplificadores de potência nos dispositivos móveis. Com valores de PAPR altos, a potência do amplificar tem de ser reduzida de modo a evitar distorção no sinal, e com um PAPR baixo o amplificador pode trabalhar mais perto da zona de saturação.

No esquema de multiplexagem SC-FDMA a diferença reside que ao invés de 12 subportadoras num RB, o próprio RB é uma portadora única apenas, o que leva a uma transmissão individual com uma duração inferior no tempo, mas superior em frequência.

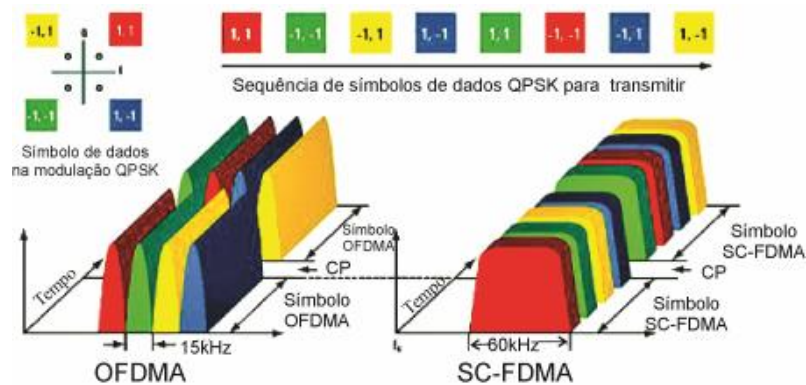


Figura 2.11: Transmissão OFDMA e SC-FDMA com modulação QPSK [25].

Analisando o modo de transmissão entre o OFDMA e o SC-FDMA, verifica-se que o OFDMA transmite, neste caso, os quatro símbolos QPSK em simultâneo, enquanto que o SC-FDMA efectua a transmissão em série, onde cada símbolo ocupa uma largura de banda de $M \times 15$ kHz, sendo M o número de subportadoras adjacentes.

A principal vantagem do SC-FDMA é que ao utilizar apenas uma portadora, apresenta um PAPR inferior em comparação com o OFDMA utilizado no *downlink*, o que leva a transmissores mais eficientes e conseqüentemente a vida útil da bateria e dispositivos móveis mais económicos uma vez que não necessitam de amplificadores de potência tão dispendiosos.

2.1.7 Modulação

Dado que os sinais de dados são emitidos em baixas frequências necessitam sempre de serem “transportados” por uma frequência alta, denominado portadora, para ser possível serem enviados até um receptor distante, onde são posteriormente desmodulados. Esta junção é denominada de modulação. Desta maneira, a informação é modulada no transmissor, enviada pelo canal próprio até ao receptor, onde é feita a desmodulação, como é ilustrado na Figura 2.12.



Figura 2.12: Processo de transmissão do sinal [13]

Durante o processo de modulação, é possível modular o sinal em frequência (FM), amplitude (AM), em fase (PM), entre outros. Cada tipo de modulação apresenta as suas características, sendo que se tenta sempre reduzir ao máximo o ruído, conseguir uma taxa de codificação superior e em diminuir a probabilidade de erros no envio, melhorando o *throughput*.

Com o LTE é possível utilizar modulações de ordem superior (mais bits de dados por símbolo de modulação), nomeadamente, QPSK, 16-QAM, 64-QAM e 256-QAM, contrariamente às utilizadas até então nas gerações anteriores, com o objectivo de aumentar os ritmos de transmissão. Através do QPSK é possível garantir uma transmissão de 2 bits por símbolo, com 16-QAM 4 bits por símbolo, com 64-QAM 6 bits por símbolo e com 256-QAM 8 bits por símbolo. Com modulações inferiores é possível garantir uma ligação mais robusta que aguenta maiores níveis de interferência sem que se perca a ligação, mas apresentando um débito binário menor do que com modulações superiores que para conseguir débitos binários superiores é sensível a erros devido a ruído e interferência [12].

As adaptações e modificações nas ligações são efectuadas através da técnica AMC (*Adaptive Modulation and Coding*) seleccionando a modulação a utilizar através do valor da relação sinal ruído (SINR – *Signal to Interference plus Noise Ratio*), calculada através da razão entre a potência média do sinal e a soma da potência da interferência e ruído existentes. Como representado na Figura 2.13, quanto maior for o valor do SINR, melhor o nível de sinal e das condições de transmissão, podendo ser utilizado uma modulação mais elevada como o 64-QAM ou 256-QAM, contrariamente, com SINR baixo é indicação de condições de propagação adversas ou elevadas distâncias entre o transmissor e emissor, podendo mesmo este último estar no limite da célula, o que leva a utilizar uma modulação inferior como o QPSK que suporta menos bits por símbolo de modo a garantir uma ligação estável com menor taxa de erro [6].

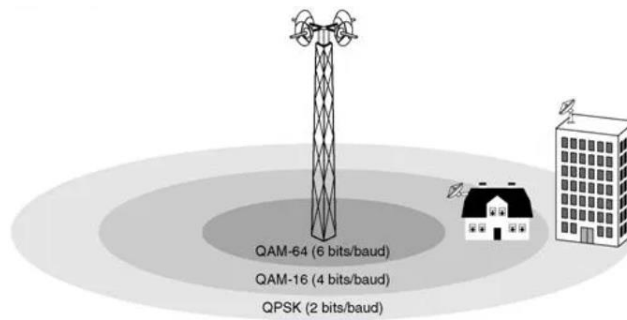


Figura 2.13: Modulação consoante distância entre transmissor e receptor [13].

A taxa de codificação representa a razão entre o número de bits de informação e o número de bits codificados. As taxas inferiores são utilizadas com SINR baixo enquanto que as taxas de codificações superiores são usadas com boas condições de rádio (SINR elevado).

Através dos dados de indicador de qualidade do canal (CQI – *Channel Quality Indicator*) que pode variar entre 0 a 15 (sendo tanto mais baixo quanto a qualidade de transmissão seja menor no canal de *downlink*, como é possível verificar na Figura 2.14), enviados pelo UE para o eNodeB, este consegue determinar qual taxa de codificação apropriada a utilizar para que o dispositivo móvel possa decodificar o sinal com uma probabilidade de taxa de erros de blocos transportados (BLER – *Block Error Rate*) inferior a 10%.

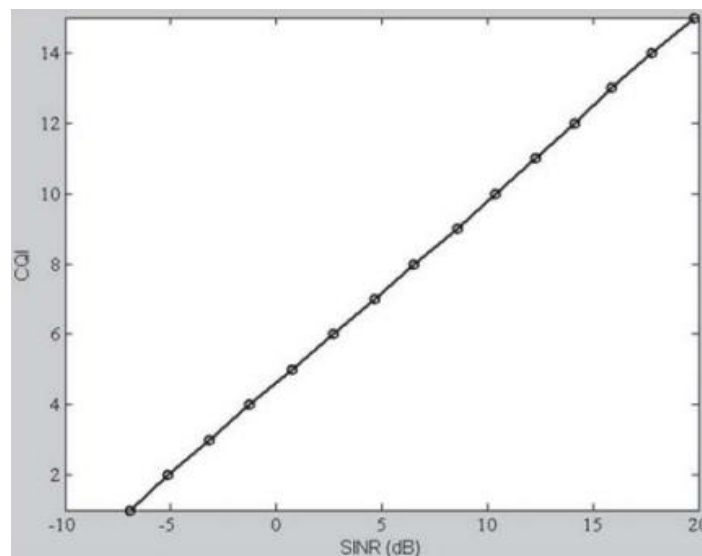


Figura 2.14: Mapeamento entre os valores de CQI e SINR [21].

Desta maneira, o UE consegue informar se tem uma qualidade de sinal elevada, podendo assim receber um débito binário superior. Ligações com BLER superior a 10% indicam um aumento de pacotes com erros, levando a retransmissões de informação que originam débitos finais menores [15].

Índice CQI	Modulação	Rácio de Código	Bits/Símbolo	Eficiência (Rácio de Código x Bits/Símbolo)
0	"Fora de alcance"	-	-	-
1	QPSK	0,076	2	0,1523
2	QPSK	0,188	2	0,377
3	QPSK	0,438	2	0,877
4	16QAM	0,369	4	1,4766
5	16QAM	0,479	4	1,9141
6	16QAM	0,602	4	2,4063
7	64QAM	0,455	6	2,7305
8	64QAM	0,554	6	3,3223
9	64QAM	0,650	6	3,9023
10	64QAM	0,754	6	4,5234
11	64QAM	0,853	6	5,1152
12	256QAM	0,694	8	5,5547
13	256QAM	0,778	8	6,2266
14	256QAM	0,864	8	6,9141
15	256QAM	0,926	8	7,4063

Tabela 2.5: Tabela CQI com respectiva modulação [66].

Considerando então os diferentes tipo de modulação e respectivas taxas de codificação, descritas na Tabela 2.5, a cada um destes irá corresponder um valor de débito binário espectável, sendo o valor de SINR reportado pelo UE que faz a seleção sobre qual a modulação a utilizar. A relação entre o débito binário e o SINR pode ser então estabelecido como [52]:

$$R_b = \frac{B}{N} \times \log_2(1 + SINR) \quad (2.4)$$

Através de (2.4) foram calculados os valores de débito binário para em função do SINR para uma largura de banda (B) de 20 MHz e o respectivo número de subportadoras (N), estando ilustrados na Figura 2.15 e onde é possível verificar que quanto maior for o valor de SINR reportado, maior será o valor de débito binário oferecido ao utilizador.

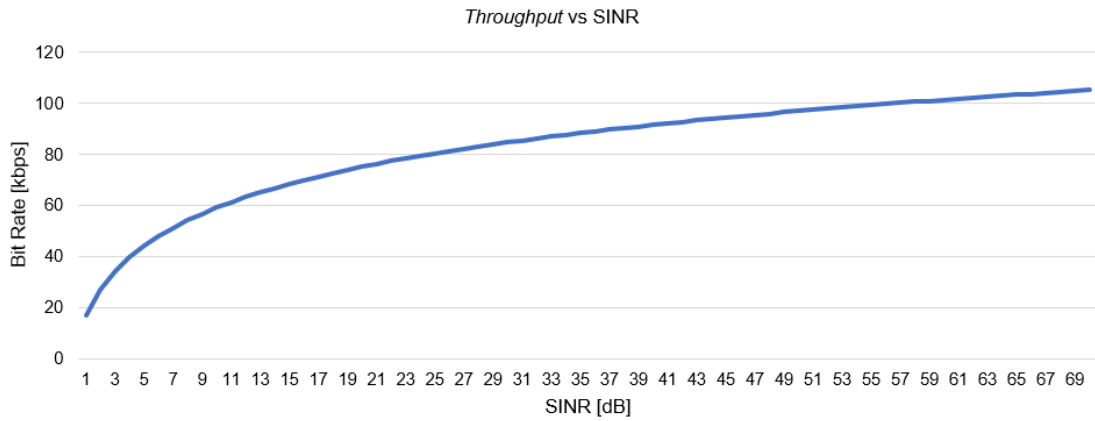


Figura 2.15: Débito binário em função do valor de SINR do UE.

Por outro lado, o débito binário das estações rádio base varia consoante a largura de banda e a modulação utilizada, sendo que se consegue valores de débito binário superiores com larguras de banda elevadas e modulações de ordem superior, como é possível verificar nos dados da Figura 2.16 calculados através de (2.1).

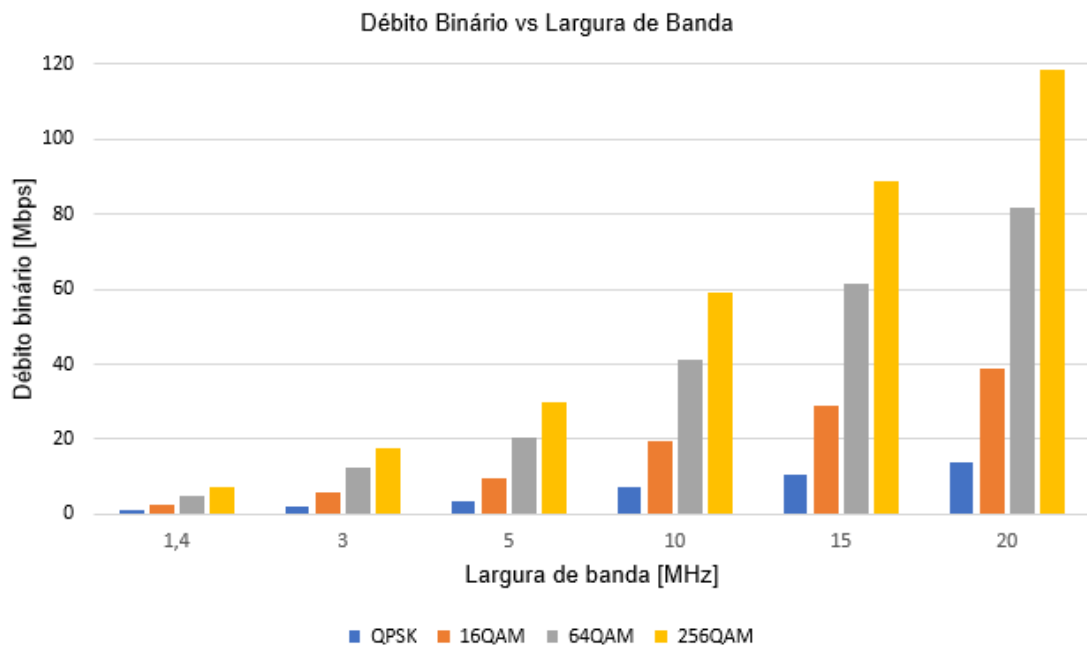


Figura 2.16: Débito binário em função da largura de banda e da modulação.

2.1.8 Interface LTE

Neste capítulo serão abordados os protocolos rádio utilizados em LTE, assim como os tipos de canais utilizados.

2.1.8.1 Protocolos de rádio

Em todas as tecnologias, cada interface se divide em plano de utilizador (*user plane*), que transporta informação como tráfego de voz e dados e sinalização ao nível das aplicações usadas pelo UE, e plano de controlo (*control plane*), que suporta as mensagens de funcionamento da rede, como mensagens de *paging* ou de *handover*, estando estas representadas na Figura 2.17.

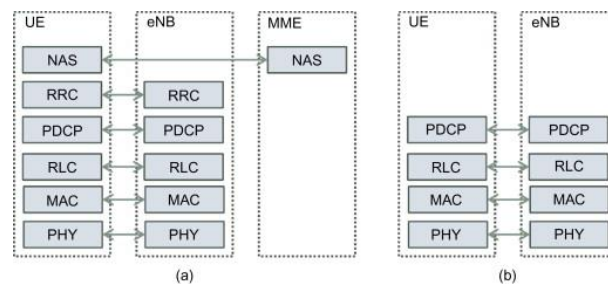


Figura 2.17: Pilha de protocolos. (a) Control plane, (b) User plane.

O protocolo para o plano de utilizador inclui:

- PDCP (*Packet Data Convergence Protocol*) – responsável pela compressão do cabeçalho IP através da técnica ROHC (*Robust Header Compression*), *cyphering* (proteção, integridade e confidencialidade dos dados transmitidos), ordenação de pacotes IP e retransmissão em caso de *handover*;
- RLC (*Radio Link Control*) – responsável pela segmentação e concatenação de pacotes IP, retransmissões em caso de erro (HARQ - Hybrid Automatic Repeat Request) e entrega de dados nas camadas superiores;
- MAC (*Medium Access Control*) – é utilizado para realizar a multiplexagem e desmultiplexagem dos dados na interface rádio;
- PHY (*Physical Layer*) – realiza modulação/demodulação, mapeamento multi-antenas entre outros.

O plano de controlo inclui, adicionalmente:

- RRC (*Radio Resource Control*) – as funções do protocolo RRC incluem o estabelecimento da conexão, *release* da sessão, transmissão de informações do sistema, gestão de mobilidade e *handover* e *paging*;
- NAS (*Non-Access Stratum*) – responsável pela autenticação, registo, conexão e gestão da ligação entre o UE e o *core*.

2.1.8.2 Canais lógicos, de transporte e físicos

A interface LTE é constituída não só pelos protocolos, mas também por canais utilizados para comunicação entre BTS e UE, em *downlink* e *uplink*, estando a camada de acesso ao meio responsável por realizar o mapeamento entre canais lógicos e canais de transporte (Figura 2.18).

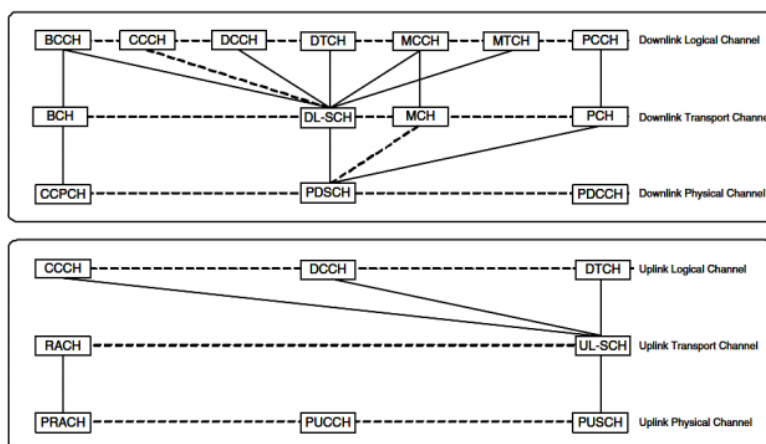


Figura 2.18: Mapeamento de canais em *downlink* e *uplink* [32].

Os canais lógicos são utilizados para troca de informação entre a interface MAC e a camada RLC, dividindo-se em canais de controlo, utilizados para sinalização, e canais de tráfego, para tráfego de dados entre a rede e o dispositivo móvel.

Os canais lógicos de controlo são:

- **BCCH (Broadcast Control Channel)** – canal utilizado para emissão no *downlink* das informações da célula e da aos dispositivos móveis, de maneira a que estes consigam acesso à mesma;
- **CCCH (Common Control Channel)** – canal utilizado para transmissão de mensagens de controlo quando não existe uma ligação RRC entre o UE e a rede;
- **DCCH (Dedicated Control Channel)** – quando em modo dedicado (o UE possui uma ligação RRC com a rede), este canal é utilizado para transmitir as mensagens de controlo;
- **MCCH (Multicast Control Channel)** – canal utilizado no *downlink* para transmissão das mensagens de controlo em modo *multicast* para os dispositivos móveis que o suportem.

Por outro lado, temos os canais lógicos de tráfego:

- **DTCH (Dedicated Traffic Channel)** – canal utilizado em modo dedicado para transporte de dados dos utilizadores;
- **MTCH (Multicast Traffic Channel)** – canal utilizado em *downlink* para transporte de dados do utilizador para serviços multimédia *multicast*.

Os canais de transporte operam como interface entre a camada MAC e a camada física, transportando dados das camadas superiores. Os canais de transporte são:

- **BCH (Broadcast Channel)** – canal de *broadcast* utilizado, em *downlink*, para envio de informações de rede, como a identificação da operadora, e sinalização, de maneira a que os dispositivos móveis se consigam conectar e sincronizar com a rede em tempo e frequência;
- **DL-SCH (Downlink Shared Channel)** – canal utilizado em *connected mode* para retransmissões, rápidas adaptações da ligação ou DRX (*discontinuous reception*) para poupança de energia, em *downlink*;
- **MCH (Multicast Channel)** – canal utilizado para transmitir dos utilizadores ou mensagens de controlo em *multicast*;
- **PCH (Paging Channel)** – canal utilizado em *downlink* para transmitir mensagens de *paging*, quando é necessário estabelecer uma ligação RRC de modo a se iniciar as comunicações entre a rede e o dispositivo móvel;
- **UL-SCH (Uplink Shared Channel)** – canal utilizado para transportar os dados do utilizador e mensagens de controlo com origem no dispositivo móvel, em *uplink*;
- **RACH (Random Access Channel)** – canal utilizado para transportar informações de controlo, em *uplink*, como respostas a mensagens de *paging* da rede ou quando é desejado estabelecer um canal de tráfego pelo utilizador, para chamada ou sessão de dados, permitindo que o UE e a rede sincronizem.

Os canais físicos transportam os dados das camadas superiores, sendo mapeados em canais de transporte. Na camada física são efectuadas as ligações à célula, adaptação da ligação e controlo de potência. Em cada canal físico é agregado um conjunto de subportadoras OFDM, transportando informação das camadas superiores. Os canais físicos são:

- **PBCH (Physical Broadcast Channel)** – canal utilizado para transportar informações de rede, em *downlink*, para utilizadores que solicitem o acesso à mesma. Canal com baixo débito binário, localizado na *subframe* 0 de cada *radioframe*, tendo um TTI de 40 ms e utiliza uma modulação inferior (QPSK), de modo a garantir uma codificação robusta, com a finalidade de conseguir uma melhor cobertura;
- **PDCCH (Physical Downlink Control Channel)** – canal utilizado em *downlink* para transporte de informações de controlo de sinalização na camada física;
- **PDSCH (Physical Downlink Shared Channel)** – canal utilizado em *downlink* para transporte dos canais de sincronização e mensagens de *paging*;
- **PMCH (Physical Multicast Channel)** – canal físico utilizado para transporte de informações de sistema em transmissões *multicast*, em *downlink*;
- **PRACH (Physical Random Access Channel)** – canal utilizado para acesso aleatório, em *uplink*, transportando os préambulos de acesso aleatório enviados pelo UE;
- **PUCCH (Physical Uplink Control Channel)** – canal utilizado em *uplink* com informações de controlo como valores de CQI's ou em resposta a retransmissões enviadas em *downlink*;
- **PUSCH (Physical Uplink Shared Channel)** – canal que transporta os dados dos utilizadores, mapeado no canal de transporte UL-SCH, utilizado em *uplink*.

2.1.9 Qualidade de Serviço (QoS - *Quality of Service*)

O QoS é um factor muito importante ao gerir uma rede de telecomunicações, permitindo definir prioridades diferentes para diferentes serviços, utilizadores ou fluxo de dados. Através de diferentes QoS é possível a rede definir quantas portadoras deve atribuir ao dispositivo móvel, assim como os parâmetros adequados para estabelecer a ligação, de acordo com o tipo de serviço que o mesmo pretende, uma vez que para serviços mais exigentes em termos de débito binário é necessário alocar mais portadoras dedicadas ao utilizador.

Durante a ligação, o *bearer* permite fazer a conexão entre o UE e o P-GW, sendo cada *bearer* associado a um identificador de classe QoS (QCI – *QoS Classe Identifier*) que, consoante as características do serviço pretendido, garante a prioridade do serviço (definindo a ordenação dos pacotes na interface rádio), atrasos mínimos assegurados para manter um fluxo de dados adequado à ligação (PDB – *Packet Delay Budget*) e taxas de erro configuradas através do número de retransmissões (PER – *Packet Error Rate*) [33].

QCI	Tipo de Serviço	Prioridade	PDB (ms)	PER	Exemplo do serviço
1	GBR	2	100	10^{-2}	Chamadas de voz (VoIP)
2	GBR	4	150	10^{-3}	Chamadas de vídeo
3	GBR	5	300	10^{-6}	<i>Streaming</i> vídeo
4	GBR	3	50	10^{-3}	Jogos em tempo real
5	Non-GBR	1	100	10^{-6}	Sinalização IMS
6	Non-GBR	7	100	10^{-3}	Voz, vídeo, jogos (<i>non-real time</i>)
7	Non-GBR	6	300	10^{-6}	Web, e-mail, download de ficheiros
8	Non-GBR	8	300	10^{-6}	
9	Non-GBR	9	300	10^{-6}	

Tabela 2.6: Indicadores de classe do QoS [33].

Os QCI's estão organizados em dois tipos de *beares*, débito binário garantido (GBR – *Guaranteed Bit-Rate*) e débito binário não garantido (Non-GBR – *Non-Guaranteed Bit-Rate*), como descrito na Tabela 2.6, sendo que no primeiro, ao contrário do segundo, os serviços assumem não ter problemas com perdas de pacotes durante a ligação rádio, em situações de congestionamento da rede.

O GBR é utilizado em serviços que garantem um bom desempenho da rede enquanto o utilizador estiver em *connected mode*, sendo preferível negar o acesso a novos utilizadores ao invés de provocar uma degradação da *performance* da rede devido a congestão na mesma.

Para além do QCI, que define a configuração de *User Plane* que os *beares* devem possuir, o ARP (*Allocation and Retention Priority*) define a configuração de *Control Plane*, permitindo que a aceitação ou modificação de portadoras seja feito consoante os recursos disponíveis na rede, de modo a assegurar que não o sistema não chegue a um ponto de congestão e a prioridade de um

bearer quando comparado com outro. Por outro lado, o MBR (*Maximum Bit Rate*) assegura o débito máximo disponível numa portadora, para portadoras GBR.

Para portadoras Non-GBR, temos o parâmetro AMBR (*Aggregate Maximum Bit Rate*) que identifica o débito máximo, para um utilizador, por agregado de portadoras.

Por fim, a latência define-se como o tempo necessário para transmitir um pacote IP (ida e volta) entre o equipamento móvel (terminal) e a estação rádio base, sendo este valor medido pelo RRT (*Round Trip Time*). Com baixas latências, é possível assegurar o correcto desempenho de muitas aplicações. Um exemplo, é o mundo dos videojogos online que requer baixos atrasos na receção e envio de dados, onde videojogos mais simples podem não necessitar de grandes débitos binários, mas uma baixa latência, por norma, é essencial.

Para além do QoS que está direccionado para fornecer um serviço com um determinado nível de desempenho baseando-se em valores técnicos, na perspectiva da rede, outra base de medida do serviço é a qualidade de experiência (QoE – *Quality of Experience*) que se está enquadrado na perspectiva do utilizador, sendo tanto mais elevado como a satisfação do cliente para com o serviço da rede que utiliza, como descrito na Tabela 2.7, tendo como indicadores de satisfação a velocidade da ligação, latência ou tempo de resposta da rede [43].

Nível QoE	Classificação
1	Má
2	Fraca
3	Razoável
4	Boa
5	Excelente

Tabela 2.7: Níveis de QoE [44].

O QoE está assim directamente relacionado com o QoS, sendo que se o último apresentar bons valores, o primeiro tipicamente também estará dentro dos valores desejados. Contudo, valores de QoS dentro do esperado não implica necessariamente que o utilizador esteja satisfeito com o serviço, podendo ser necessário um ajuste de parametrização na rede para ir de encontro com as expectativas e exigências do utilizador.

2.1.10 LTE-Advanced e LTE-Advanced Pro

Com o objectivo de melhorar os actuais débitos binários existentes no LTE surgiu o LTE-Advanced, conseguindo utilizar larguras de banda de 100 MHz, MIMO até 8x8, agregação de portadoras (CA - *Carrier Aggregation*) e ComP (*Coordinated Multi Point*) [8]. Posteriormente com o LTE-Advanced Pro, foi possível introduzir o esquema de modulação 256 QAM, transportando mais bits por símbolo, e combinar mais *componente carriers*. Com estas novas características é possível uma melhor utilização do espectro, alcançando débitos superiores de 1 Gbps, valores muito superiores ao LTE-Advanced com valores de 300 Mbps [27].

2.1.10.1 MIMO

De modo a conseguir assegurar débitos binários mais elevados, as funcionalidades de MIMO foram projectadas, sendo um método para aumentar a capacidade de uma ligação rádio ao utilizar múltiplos transmissores (Tx) e receptores (Rx) de sinais com o objectivo de obter ganhos de diversidade espacial ao explorar a propagação do sinal em múltiplos caminhos, ao contrário da tecnologia inicial onde existia apenas um transmissor e um receptor (1x1), como ilustrado na Figura 2.19. Cada transmissor envia o sinal, usando os mesmos recursos de tempo e frequência, para todas as antenas receptoras que desmodulam a informação recebida para obter correctamente a mensagem original. Desta maneira, num ambiente com múltiplos obstáculos entre o transmissor e o receptor, é possível criar múltiplos percursos independentes entre ambos conseguindo uma taxa de transmissão de informação mais elevada, contornando assim possíveis problemas de canais com baixas características de propagação, interferência e multipercurso, sem necessidade de aumentar a largura de banda e/ou potência de transmissão. O débito binário está dependente do sistema MIMO utilizado, sendo linearmente proporcional ao número mínimo de antenas utilizadas para transmissão ou recepção.

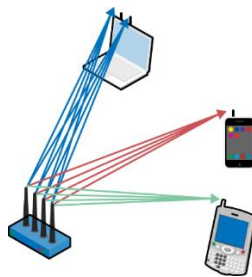


Figura 2.19: MIMO [9].

Existem 4 soluções possíveis de transmissão e recepção de sinal (representadas na Figura 2.20):

- **SISO (Single Input Single Output)** – solução inicial e mais básica onde existe apenas uma antena de transmissão e uma de recepção;
- **SIMO (Single Input Multiple Output)** – solução com um transmissor e dois ou mais receptores. Devido a existir apenas um transmissor não existe nenhuma alteração no débito binário, contudo a cobertura é melhorada;
- **MISO (Multiple Input Single Output)** – solução com dois ou mais transmissores e um receptor. Uma vez que o sinal é enviado por todas as antenas de transmissão a diversidade de transmissão aumenta assim como a qualidade em más condições rádio. Apesar de não aumentar o débito binário, consegue suportar o mesmo débito binário com uma potência inferior;
- **MIMO (Multiple Input Multiple Output)** – solução que em LTE tem como configuração básica MIMO 2x2 (2 transmissores e 2 receptores), contudo consegue chegar ao MIMO 8x8, sendo o sinal emitido por duas ou mais antenas e desmultiplexador no receptor,

aumentando o débito binário para o dobro, quádruplo ou óctuplo, consoante a configuração utilizada.

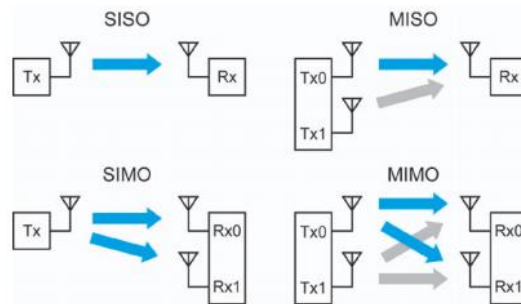


Figura 2.20: Soluções transmissão [16].

Para o UE manter uma ligação robusta e com qualidade, necessita conhecer previamente o tipo de transmissão que irá ser ocorrer, evitando assim um aumento do número de erros na decodificação. Por outro lado, também o CQI necessita de saber o modo de transmissão já que o valor reportado depende do modo utilizado. Na Tabela 2.8 encontram-se descritos os modelos de transmissão utilizados em LTE.

Modo	Nome	Descrição
1	Antena de transmissão única	Modo que utiliza apenas uma antena de transmissão.
2	Diversidade de transmissão	Modo que utiliza várias antenas de transmissão, enviando em cada uma a mesma informação mas com codificações e recursos de frequência diferentes. Com este modo o débito binário não aumenta (uma vez que a informação enviada pelas antenas é a mesma) mas a ligação torna-se mais robusta, conseguindo o UE descodificar o sinal mesmo com valores de SINR mais baixos.
3	Multiplexação espacial <i>open-loop</i>	Modo que transmite dois fluxos de informação utilizando duas ou mais antenas, conseguindo assim melhores débitos binários.
4	Multiplexação espacial <i>closed-loop</i>	A diferença deste modo para o modo 3 é que o UE reporta uma mensagem (PMI – <i>Precoding Matrix Indicator</i>) para o eNodeB, informando qual a codificação preferida de modo a facilitar a descodificação no receptor.
5	MIMO multi-utilizador	Modo semelhante ao modo 4, contudo neste modo as mensagens transmitidas são para diferentes utilizadores.
6	Multiplexação espacial <i>closed-loop</i> com apenas uma <i>layer</i>	Modo semelhante ao modo 4, contudo neste modo apenas uma <i>layer</i> é utilizada em transmissão.
7	<i>Beamforming</i>	Modo onde a mesma informação é transmitida e enviada por uma única <i>layer</i> . Este modo necessita de uma porta adicional na antena (porta 5) para um sinal de referência, necessário para estimar a qualidade do canal.
8	<i>Beamforming</i> com duas <i>layers</i>	Modo semelhante ao modo 7, contudo neste modo são utilizadas duas <i>layers</i> , sendo que estas podem ser assignadas ambas a um UE específico ou cada uma delas a um UE diferente.
9	Transmissão com oito <i>layers</i>	Comparativamente com o modo 8, neste modo podem ser utilizadas até oito <i>layers</i> em simultâneo, podendo ser assignadas a apenas um utilizador ou em vários utilizadores em simultâneo.
10	Transmissão com oito <i>layers</i>	Semelhante ao modo 9, contudo neste modo é possível utilizar a técnica CoMP (descrita no subcapítulo 2.1.10.3).

Tabela 2.8: Modos de transmissão no LTE [14].

Uma vez que ao utilizar a técnica de MIMO o seu desempenho varia devido a vários factores como a qualidade do sinal (SINR) ou a velocidade do UE, alguns modos MIMO irão ser mais

eficientes de implementar do que outros, sendo assim necessário analisar o ambiente em estudo e as prováveis condições rádio.

2.1.10.2 Carrier Aggregation

Com o CA é possível fazer uma agregação até cinco portadoras em *downlink*, aumentando assim a largura de banda, até um máximo de 100 MHz, o que leva a um aumento do *throughput* disponível para o utilizador final. Cada portadora agregada é denominada *component carrier* (CC), podendo ter uma largura de banda de 1.4, 3, 5, 10, 15, 20 MHz e, em caso de *LTE-Advance Pro*, 100 MHz.

As ligações RRC são geridas pela componente primária (*pcell – primary cell*) e todas as outras CC's são consideradas componentes secundárias (*secondary cells*), tendo como objectivo o aumento de débito binário e utilizadas apenas para tráfego, como representado na Figura 2.21. Quando for necessário existir uma troca de componente primária, é efectuado um *pcell swap* (troca de componente primária), ou seja, um *handover* para outra célula de maneira a manter uma ligação estável.

Na Tabela 2.9 estão descritos os valores débito binário consoante o número de CC's utilizadas em *downlink* e o tipo de modulação e MIMO.

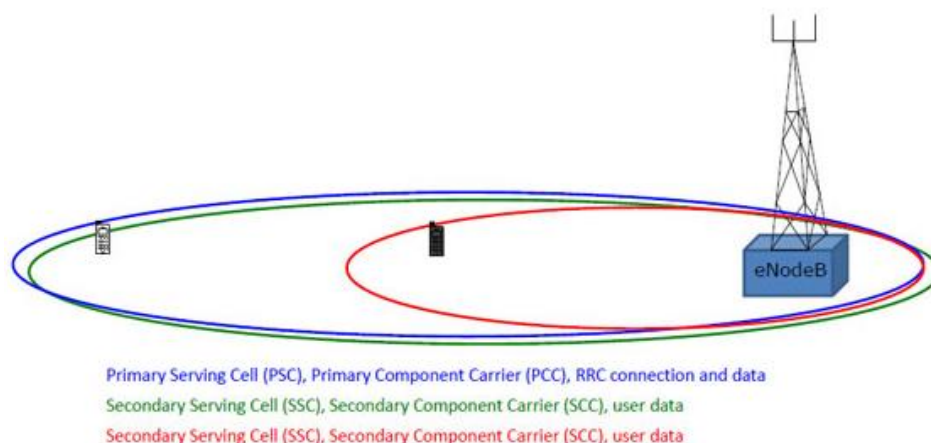


Figura 2.21: Carrier Aggregation - serving cells [8].

		Classes do UE									
		1	2	3	4	5	9	11	12	16	
Data rate [Mbps]	DL	10	50	100	150	300	450	600	600	1000	
	UL	5	25	50	50	75	50	75	150	150	
Largura de banda		20 MHz									
Modulação		QPSK, 16 QAM			64 QAM				256 QAM		
MIMO		Opcional	2x2		4x4		2x2 ou 4x4			4x4	
DL CC's		1					2 ou 3		2, 3 ou 4		3 ou 4

Tabela 2.9: Classes do UE em LTE (adaptado de [28]).

2.1.10.3 CoMP

De maneira a melhorar a cobertura nas zonas limite de cobertura dos eNodeB's (*cell edge*) surgiu o CoMP. Tem como objectivo a transmissão e recepção de sinal entre diferentes TX/RX (transmissor/receptor) pertencentes ao mesmo ou de diferentes eNodeB's de modo a fornecer a melhor cobertura possível entre os diferentes sectores e células ao UE. Como demonstrado na Figura 2.22 e na Figura 2.23, existem duas maneiras de implementar a *feature* CoMP, a primeira denominada "*joint transmission*" onde os TX's transmitem na mesma frequência e *subframe* (Figura 2.22) e a segunda, "*dynamic point selection*" onde cada TX transmite na sua própria *subframe* (Figura 2.23).

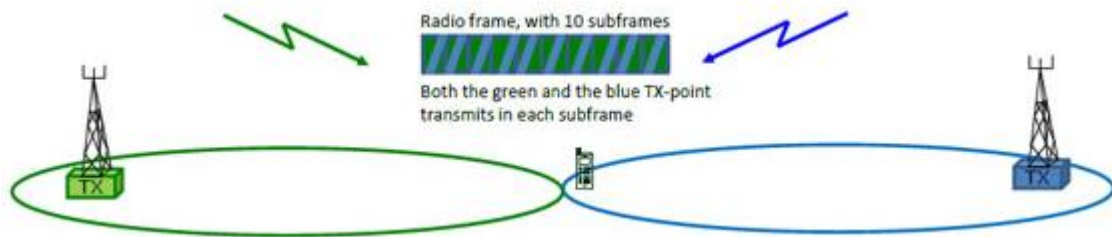


Figura 2.22: DL CoMP em transmissão conjunta entre dois transmissores de diferentes eNodeB's para o mesmo UE [8].

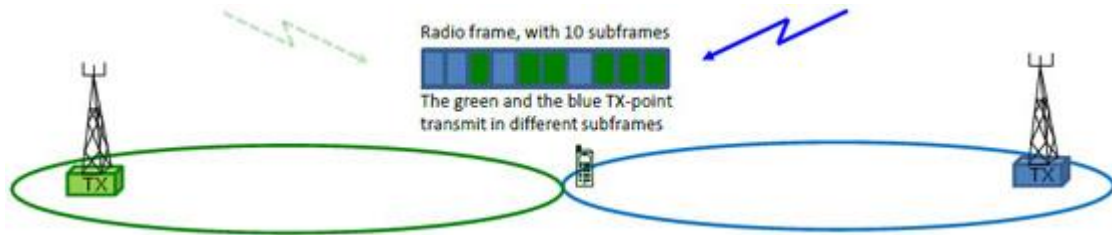


Figura 2.23: DL CoMP em transmissão dinâmica onde cada transmissor emite em diferentes *subframes* para o mesmo UE [8].

2.2 Soluções de Predição e Planeamento de Rede

Para fazer o planeamento de uma rede móvel, é necessário ter em conta inúmeros factores como frequências, perfil do terreno em estudo, antenas a serem instaladas, entre outros. Desta maneira foram desenvolvidos vários *softwares* como o Atoll da Forsk (ilustrado na Figura 2.24) ou o 9955 RNP da Alcatel-Lucent, onde se conseguem configurar todos estes aspectos, assim como a parametrização a utilizar na rede, que necessita ser planeada previamente (frequências, potências...). Com este tipo de *software* é possível uma simulação precisa, para todas as tecnologias (GSM, UMTS, LTE...), do número de estações rádio base necessárias para garantir uma correcta cobertura e capacidade da rede, duma determinada zona, assim como as suas características (altura, localização, antenas...), relações de vizinhança, etc.

O planeamento de rede pode ser feito para expandir, reforçar ou projectar uma rede totalmente nova. Para além do planeamento, o *software* pode ser utilizado para tarefas de otimização de rede, analisando as frequências utilizadas, relações de vizinhança, *tilts* eléctricos ou mecânicos, etc.

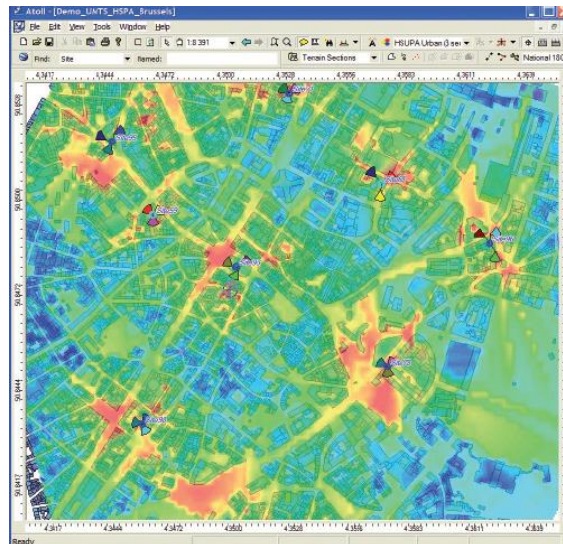


Figura 2.24: Interface Atoll [22].

2.2.1 Link Budget

O *Link Budget* baseia-se no cálculo da atenuação de propagação entre o transmissor e receptor, sendo necessário conhecer as características diferentes entre as tecnologias existentes e variáveis que possam influenciar a cobertura das células, como por exemplo, zonas montanhosas ou hídricas, perdas em equipamentos, ganhos de antenas ou amplificadores e potências de transmissão.

Ao fazer um planeamento de rede é essencial saber a área de cobertura de cada estação rádio base e quantas destas são necessárias para garantir uma boa qualidade de sinal e cobertura da zona em análise. Para conseguir determinar a área individual de cada estação rádio base e a distância entre si, é feita uma simulação através de modelos propagação, tanto para *downlink* como para *uplink*, sabendo previamente os valores de atenuação máxima (MAPL – *Maximum Allowable Path Loss*) [29].

$$MAPL = P_{TX} - L_{TX} - L_{RX} - S_{RX} - L_{Prop} + G_{Ant} \quad (2.5)$$

Onde:

- P_{TX} – Potência de transmissão;
- L_{TX} – Perdas na transmissão;
- L_{RX} – Perdas na recepção;
- S_{RX} – Sensibilidade do receptor;
- L_{Prop} – Perdas na propagação do sinal;
- G_{Ant} – Ganho da antena de transmissão.

Na Figura 2.25 encontra-se uma fluxograma com as diferentes fases dum planeamento de cobertura de rede móvel.

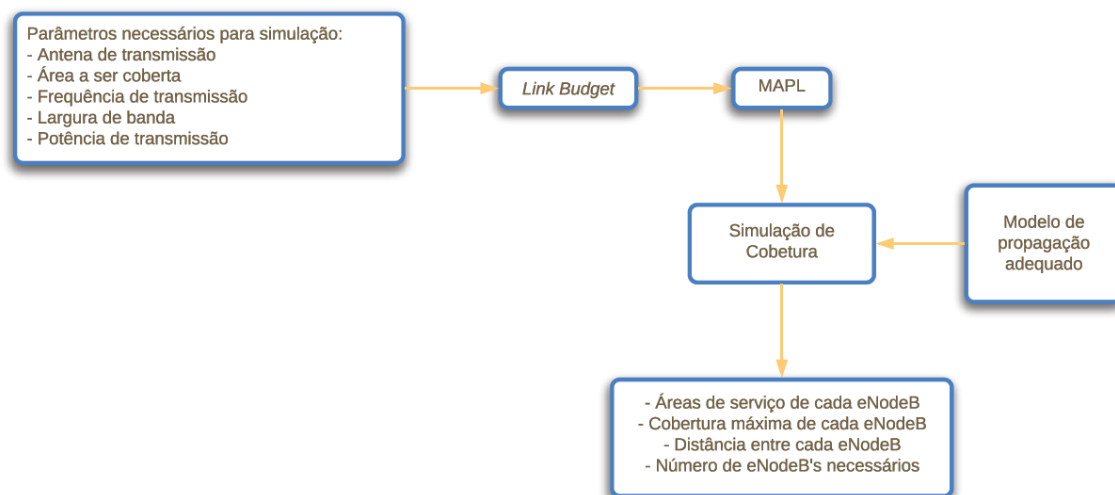


Figura 2.25: Fluxograma do planeamento de cobertura da rede.

Alguns dos parâmetros que influenciam a cobertura da célula são:

- **Body Loss** – perdas inseridas pelo corpo humano junto ao dispositivo móvel;
- **Cable Loss** – perdas inseridas pelos cabos, conectores e *jumpers*;
- **EIRP (Equivalent Isotropically Radiated Power)** – potência transmitida por uma antena isotrópica (antena que radia uniformemente em todas as direções) para alcançar o mesmo nível de sinal na direcção de radiação máxima de uma antena, i.e., a potência radiada por uma antena, somando o seu ganho e as atenuações inseridas por cabos e conectores, não deve ser superior à potência máxima legislada;
- **Fast Fading Margin** – valor dado em dB, sendo maior em zonas com grande mobilidade como autoestradas ou linhas férreas, onde os dispositivos móveis estão em movimento;
- **Fator de carga** – parâmetro que indica a carga actual do sistema, em %;
- **Margem de interferência** – valores de interferência inseridos na rede pelos outros utilizadores (em dB), variando consoante o factor de carga;
- **Max. Tx power** – potência máxima de transmissão, em dBm, do dispositivo móvel ou da célula. Valores tipicamente definidos aquando do planeamento da rede;
- **Noise Figure** – parâmetro que faz a medição da degradação do SINR devido a factores externos de ruído e de *hardware*, em dB;
- **SINR** – relação sinal ruído, em dB;
- **Thermal Noise** – ruído inserido no sistema pelo movimento dos electrões nos condutores, em dB;
- **Tx antenna gain** – ganho da antena transmissora, em dBi;

Ao fazer o planeamento da rede e cálculo do *link budget* é necessário ter em conta que quantos mais utilizadores a rede possuir maior serão os valores de interferência devido às múltiplas conexões à mesma e consequentemente, a qualidade e performance da rede diminui para os utilizadores. Uma vez que a potência de transmissão é dividida pelo número total de RBs, poderia equacionar-se um aumento de potência, no entanto, não é uma solução viável, uma vez que ainda inseriria mais interferência na rede.

Uma forma de diminuir a interferência inserida na rede pelos utilizadores é utilizando a técnica de *cell breathing*, ilustrada na Figura 2.26, que permite fazer um balanceamento da carga entre as células, onde células sobrecarregadas têm a possibilidade de transferir utilizadores para células vizinhas, fazendo com que a sua área de serviço diminua e a das células vizinhas aumente [30].

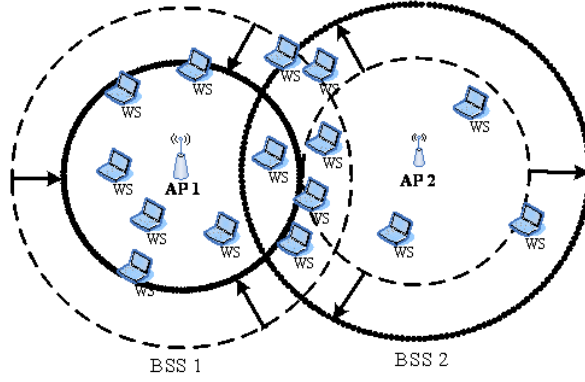


Figura 2.26: Técnica de *cell breathing* [30].

De maneira a representar o valor de interferência inserido pelos utilizadores em *uplink*, é possível inserir uma margem de interferência (MI) nos cálculos efectuados:

$$MI_{UL} = 10 \log \left(\frac{1}{1 - SINR_{min} \times Q_{UL} \times F_c} \right) \quad (2.6)$$

Por outro lado, para a margem de interferência em *downlink* temos:

$$MI_{DL} = 1 + \frac{P_{tx/RB} \times Q_{DL} \times F_c}{TN \times L_{prop}} \quad (2.7)$$

Onde:

- $SINR_{min}$ – SINR mínimo necessário para a ligação;
- Q_{UL} – Carga do sistema em *uplink*;
- F_c – Ganho resultante da variação dos *tilts* eléctricos da antena;
- $P_{tx/RB}$ – Potência de transmissão por RB;
- Q_{DL} – Carga do sistema em *downlink*;
- TN – *Thermal noise*.

Para calcular o *Link Budget* (A) em *downlink* e *uplink* tem-se então:

$$A = P_{TX} - L_{TX} - S_{RX} - MI - L_{BL} - L_{CPL} - L_{BPL} + G_a \quad (2.8)$$

$$P_{TX} = P_{AMP} - 10 \log N_{RB} \quad (2.9)$$

$$S_{RX} = NF_{RX} + TN + SINR_{min} \quad (2.10)$$

$$TN = -174 + 10 \log B \quad (2.11)$$

Onde:

- L_{BL} – Perdas devido ao corpo humano (*body loss*);
- L_{CPL} – Perdas por penetração em carros (se aplicável);
- L_{BPL} – Perdas por penetração em edifícios (se aplicável);
- G_a – Somatório do ganho da antena de transmissão e de recepção;
- P_{AMP} – Potência do amplificador;
- N_{RB} – Número de *resource blocks*;
- NF_{RX} – *Noise figure* do receptor;
- B – Largura de banda.

Um valor importante para definir a qualidade da ligação é o SINR (*Signal to Interference plus Noise Ratio*), sendo a relação entre o nível de sinal e o nível de ruído (relação sinal-ruído), medido em dB. Quanto maior for o valor de SINR, melhor será a qualidade do sinal, sendo que com valores abaixo de 0 dB, a velocidade de ligação será muito baixa devido ao ruído existente no sinal recebido ou pela potência do sinal recebido ser muito baixa, como descrito na Tabela 2.10, levando a que a probabilidade da queda da ligação seja elevada.

Condições Rádio	SINR (dB)
Excelente	≥ 20
Boa	13 a 20
Razoável	0 a 13
Má	≤ 0

Tabela 2.10: Classificação de SINR consoante o seu valor [51].

O SINR pode ser então estimado por:

$$SINR = P_{RX} - \text{Ruído} - \text{Interferência} \quad (2.12)$$

Em condições normais, quanto mais próximo do eNodeB se encontra o UE melhor será os seus valores de SINR e, conseqüentemente uma melhor qualidade de serviço devido a um débito binário fornecido mais elevado, como é possível verificar nos dados da Figura 2.27, calculados através de (2.8) e (3.1).

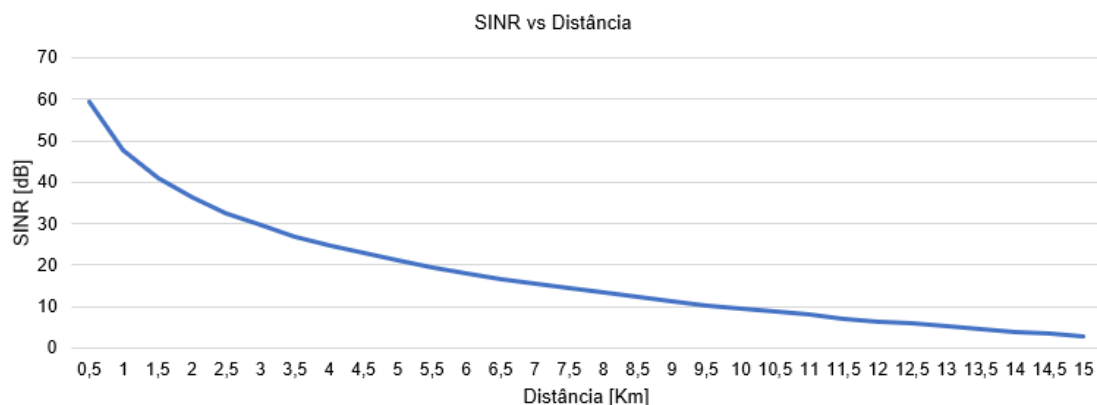


Figura 2.27: SINR em função da distância entre o eNodeB e o UE.

2.3 Análise da Rede Móvel

O sucesso de uma rede depende essencialmente de três factores:

- Cobertura – necessário assegurar bons níveis de sinal aos utilizadores;
- Capacidade – reduzir ao máximo a congestão e os *call blocks*, garantindo que todos os utilizadores se conseguem conectar à rede;
- Qualidade – reduzir ao máximo a interferência na rede, de modo a que, juntamente com um bom nível de sinal, se consiga garantir débitos binários elevados.

Para analisar e otimizar estes três factores é essencial conseguir medidas do terreno. Isto é possível através da realização de *drive tests* para coberturas *outdoor* e *walk tests* para coberturas indoor (soluções de cobertura para *shoppings*, escritórios, salas de espetáculos...).

Um *drive test* é um teste à rede móvel para coletar dados da mesma, independentemente da tecnologia que esteja a ser utilizada, através de um veículo em movimento por uma rota estrategicamente planeada, garantindo que passa em áreas de interesse. Para a coleta de dados, são utilizados dispositivos como *smartphones* ou computadores portáteis que durante todo o percurso estarão a efectuar tráfego de voz e de dados, de maneira a avaliar a performance da rede. Embora com a análise dos indicadores de desempenho da rede ou KPI's (*Key Performance Indicator*), seja possível identificar problemas como *call block's* ou quedas de chamadas, através do *drive test* conseguimos uma análise no terreno mais aprofundada, como a localização destes mesmo eventos ou áreas de cobertura de cada sector, assim como zonas de interferência.

Um *walk test* é no fundo um *drive test* mas para soluções *indoor*, onde o técnico com recurso a um dispositivo móvel com o *software* adequado, se movimenta pelo edifício recolhendo medidas pelo percurso que vai fazendo. É uma tarefa morosa e até cansativa, mas essencial para as operadoras de rede móvel recolherem dados de sinal e qualidade dentro de edifícios.

Aquando do planeamento de uma solução *indoor*, um *walk test* é também essencial, de modo a analisar o perfil do sinal existente no edifício para planejar estrategicamente o local onde instalar as futuras antenas. O percurso deve ser feito sempre junto às paredes exteriores e janelas dos edifícios dado que é onde o nível de sinal vindo das estações rádio base *outdoors* é maior, pois para uma solução *indoor* ser eficaz necessita sempre que o nível de sinal das antenas *indoor*

dentro do edifício seja sempre superior ao nível de sinal previamente existente das estações rádio base *outdoor*.

Ao realizar a coleta de dados através de *drive tests* e *walk tests*, os profissionais de telecomunicações necessitam de *software* capaz de analisar os dados (*logs*). Com ferramentas como o TEMS Discovery ou TEMS Investigation (Figura 2.28), é possível fazer upload dos *logs* no *software* e dessa maneira analisar zonas passíveis de melhoria em termos de força de sinal ou interferência, ou analisar eventos ocorridos no terreno durante os testes à rede, como quedas de chamada ou falhas *handover*. Desta maneira é possível otimizar as zonas onde ocorreram a coleta de dados, de modo a se garantir uma melhor performance da rede.

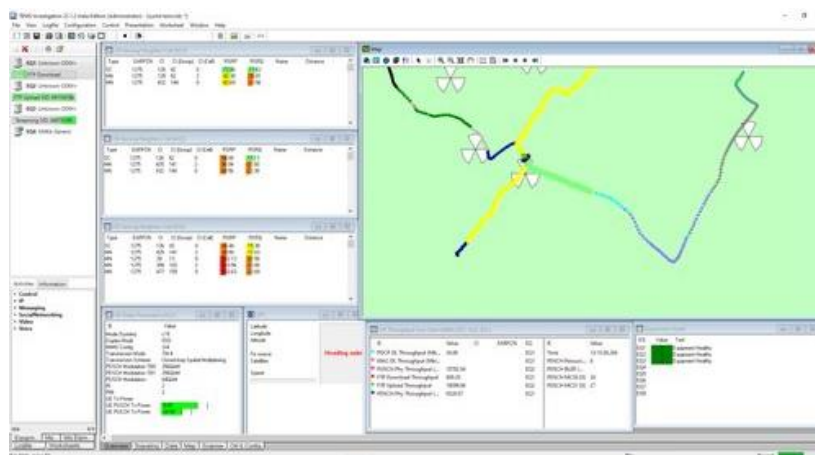


Figura 2.28: Interface TEMS Investigation.

2.3.1 Medições através de equipamentos móveis

De maneira a que as operadoras de telecomunicações possam gerir as suas redes e aumentar a qualidade do serviço prestado, é necessário que exista uma monitorização constante das informações, mensagens e relatórios enviados pelos dispositivos dos utilizadores, agregando estes mesmos dados em KPI's. Os KPI's existentes são inúmeros, destacando-se alguns como o *call setup success rate*, taxa de *throughput* existente em *downlink* e *uplink*, latência, *call drop rate* (taxa de queda de chamada), intensidade do sinal ou taxa de sucesso de *handover*.

Os custos inerentes aos *drive-tests* e a logística necessária para executar os mesmos, levou a que os *vendors* e parceiros dos operadores de telecomunicações desenvolvessem ferramentas de coleta de dados para servirem como análise da rede, sem a necessidade de enviar engenheiros ao terreno para efectuar a coleta de dados. Daí surgiram soluções de MDT (*Minimization Drive Test*) como o GeoSynthesis da Nokia [11].

Através de MDT é possível escolher os eNodeB's nos quais se pretende fazer a coleta de dados para análise, sendo que todos os dispositivos móveis, com GPS activo e que suportem relatórios de GPS de *Layer 3*, conectados a esses mesmo eNodeB's irão ser utilizados no processo, sem qualquer penalização para o utilizar no débito binário ou facturação. Para além disso é necessário um *data collector* para armazenar as mensagens e relatórios de medidas de *Layer 3* e *Layer 2* enviados pelo UE para os eNodeB's e uma plataforma de *Big Data* de modo a ser feito o

processamento e análise dos dados recebidos. O processo de coleta encontra-se representado na Figura 2.29.

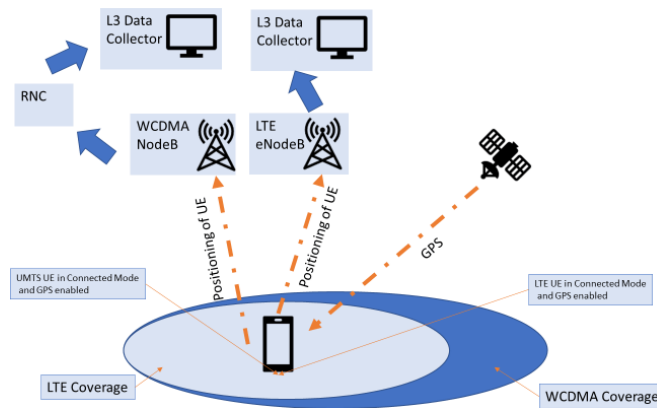


Figura 2.29: Processo de coleta de dados em MDT [20].

Através desta coleta de dados é possível posteriormente uma análise detalhada dos níveis de cobertura, interferência, tráfego (Figura 2.30), eventos (quedas de chamadas, chamadas bloqueadas...), níveis de qualidade (Figura 2.32), *throughput* (Figura 2.31), entre outros.

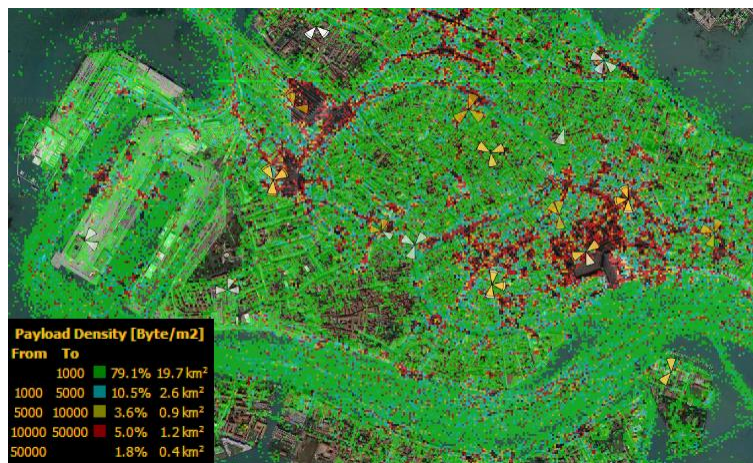


Figura 2.30: Interface do GeoSynthesis com tráfego por m².

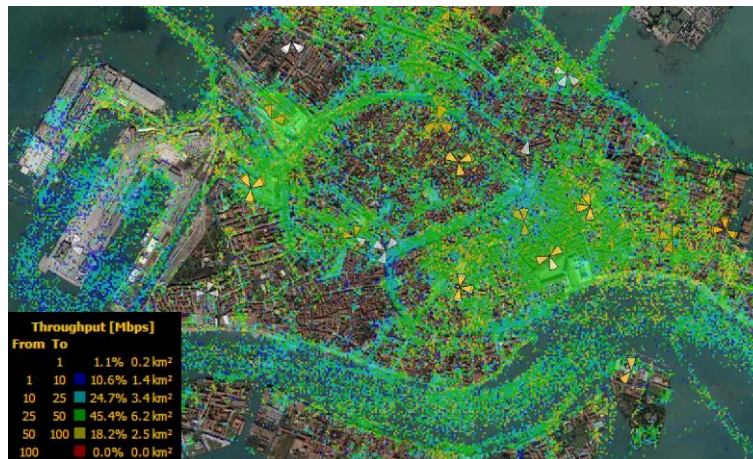


Figura 2.31: Interface do GeoSynthesis dados de *throughput*.

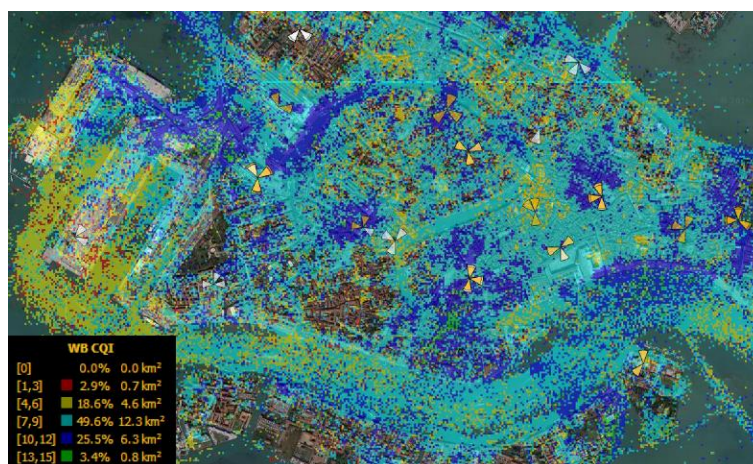


Figura 2.32: Interface do GeoSynthesis com valores de CQI.

As vantagens são então inúmeras, uma vez que é possível coletar de uma vez uma área superior a 20mil Km², por dia, comparativamente ao *drive test* (área inferior a 100 Km²/dia/pessoa), a qualquer hora e reduzir custos em mais de 60% dado que não são necessárias equipas de terreno nem *software* de análise de *drive tests*. Outra grande vantagem com o MDT é a de conseguir dados para análise de locais específicos onde possam existir queixas de cliente, assim como dados de coberturas *indoor* que apenas são possíveis de coletar dados com *walk tests* [11].

Capítulo 3

3. Planeamento de Rede

3.1 Planeamento de Cobertura

Neste capítulo serão abordados os factores e parâmetros a ter em conta aquando dum planeamento de cobertura.

3.1.1 Cenários de propagação

Ao efectuar um planeamento rádio é necessário definirmos as zonas em estudo, de maneira a obter valores estimados para SINR e débitos binários. No planeamento de cobertura essas zonas podem ser definidas em dois tipos: exteriores (*outdoor*) ou interiores (*indoor*), sendo que através das

Em redes móveis define-se uma célula como sendo a área delimitada, coberta por uma determinada estação rádio base, de maneira que a frequência utilizada possa ser reutilizada noutra célula, controlando assim possíveis interferências co-canal. Podemos dividir estas células em quatro tipos, representados na Figura 3.1:

- **Macrocell** – zonas de cobertura exclusivamente *outdoor* onde existe obstruções à linha de vista (LoS – *line of sight*) devido aos utilizadores se encontrarem em zonas de sombra, estando as antenas transmissoras posicionadas acima de obstáculos naturais ou edifícios, instaladas no topo destes ou em torres com alturas variáveis, de maneira a conseguir coberturas até 35Km. Células com altas potências de transmissão (superiores a 50W), conseguindo fornecer serviços a mais de 2 mil utilizadores em simultâneo;
- **Microcell** – células *outdoor* ou *indoor*, onde as antenas são instaladas abaixo do top dos edifícios para coberturas específicas como avenidas, ruas ou outras zonas urbanas, em cenários com linha de vista para com os utilizadores que possuem com pouca mobilidade, conseguindo coberturas até 2000 metros e capaz de fornecer serviços até 2 mil utilizadores em simultâneo;
- **Picocell** – células *outdoor* ou *indoor* instaladas para coberturas específicas como *shoppings* ou escritórios, onde as coberturas podem chegar a 200 metros, fornecendo serviço até 100 utilizadores em simultâneo;
- **Femtocell** – células unicamente dedicadas para coberturas *indoor*, com raio de célula até 100 metros, fornecendo serviço até 30 utilizadores em simultâneo.

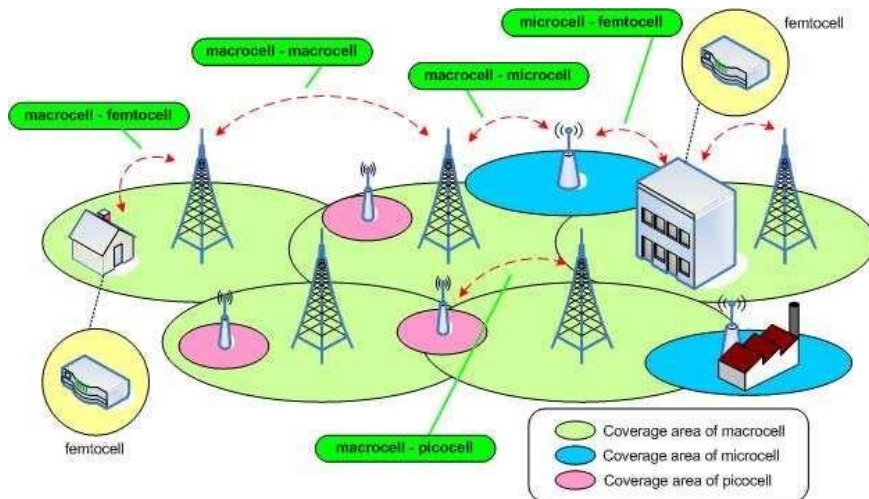


Figura 3.1: Tipos de células [34].

3.1.2 Modelos de Propagação

Um modelo de propagação rádio caracteriza-se por ser uma formulação empírica matemática, tendo em conta vários aspectos relacionados com a propagação de ondas rádio como frequência (Figura 3.2) ou altura do eNodeB (Figura 3.3), com a finalidade de prever as perdas resultantes do percurso do sinal entre o transmissor e o receptor. A propagação do sinal é afectada diretamente por condições atmosféricas e topografia do terreno, sendo por isso essencial utilizar o modelo de propagação adequado. Os modelos são utilizados conforme a área de estudo, dividindo-se assim em dois tipos, *outdoor* para espaços abertos com células macro ou micro e *indoor* para áreas de menor cobertura como edifícios.

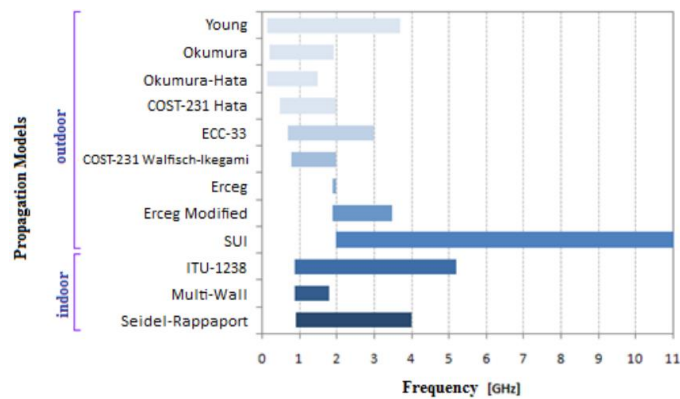


Figura 3.2: Modelos de propagação em função da frequência utilizada [36].

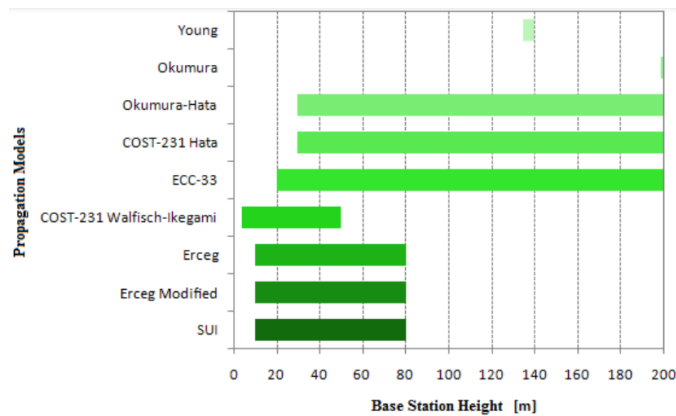


Figura 3.3: Modelos de propagação em função da altura da antena da estação rádio base [36].

É possível dividir os ambientes de propagação em três categorias:

- Rural;
- Suburbano;
- Urbano.

Em cada tipo de ambiente existe várias características necessárias de considerar aquando do planeamento, como:

- Altura e densidade dos edifícios;
- Densidade da vegetação;
- Perfil do terreno (planície, vale, montanhoso, aquoso...)

Para calcular o valor de perdas de percurso temos:

$$PL_{[dB]} = K_1 + K_2 \log d_{[km]} \quad (3.1)$$

Sendo K_1 e K_2 valores dependentes do modelo de propagação a utilizar e $d_{[km]}$ a distância entre emissor e receptor [37].

Consoante as frequências de transmissão temos os seguintes modelos de propagação, segundo a Figura 3.1:

- Para bandas baixas (700, 850 ou 900 MHz) é utilizado o modelo *Okumura-Hata*:

$$K_1 = 69,55 + 26,16 \log(F_{[MHz]}) - 13,82 \log(H_t) - a(H_r) + K_c \quad (3.2)$$

- Para frequências entre 1,5 GHz e 2,1 GHz é utilizado o modelo *COST-231 Hata*:

$$K_1 = 46,3 + 33,9 \log(F_{[MHz]}) - 13,82 \log(H_t) - a(H_r) + K_c \quad (3.3)$$

- Para 2,6 GHz é utilizado o modelo *COST-231 Hata* modificado, dado que este se encontra limitado a frequências superiores a 2,1 GHz:

$$K_1 = 46,3 + 33,9 \log(2000) + 20 \log\left(\frac{F_{[MHz]}}{2000}\right) - 13,82 \log(H_t) - a(H_r) + K_c \quad (3.4)$$

Sendo:

$$K_2 = 44,9 - 6,55 \log(H_t) \quad (3.5)$$

$$a(H_r) = 3,2(\log 11,75H_r)^2 - 4,97, \quad K_c > -5 \quad (3.6)$$

$$a(H_r) = [1,1 \log(F_{[MHz]}) - 0,7]H_r - [1,56 \log(F_{[MHz]}) - 0,8], \quad K_c \leq -5 \quad (3.7)$$

$$K_c = 0, \quad \textit{urbano} \quad (3.8)$$

$$K_c = -2 \left(\log \frac{F_{[MHz]}}{28} \right)^2, \quad \textit{suburbano} \quad (3.9)$$

$$K_c = -4,78(\log F_{[MHz]})^2 + 18,33 \log F_{[MHz]}, \quad \textit{rural} \quad (3.10)$$

Onde:

- $F_{[MHz]}$ – Frequência de transmissão em MHz;
- H_t – Altura da antena de transmissão (eNodeB);
- H_r – Altura da antena de recepção (UE);
- K_c – Factor de correcção morfológico (valor dependente do ambiente de propagação).

Uma vez que os valores de débito binário e SINR estão dependentes também do raio da célula, manipulando (3.1), é possível determinar o raio de cobertura:

$$d_{[Km]} = 10^{\frac{PL_{[dB]} - K_1}{K_2}} \quad (3.11)$$

3.1.3 Interferência

O nível de interferência afecta todos os sistemas de comunicação assim como os sistemas de comunicações móveis. A interferência pode ser originada por outro dispositivo móvel na mesma célula, outro dispositivo móvel a efectuar tráfego numa célula vizinha, células vizinhas a operarem na mesma faixa de frequência ou interferência externa, causada por objectos ou estruturas não relacionadas com as comunicações móveis. Valores de interferência podem afectar o desempenho da rede causando problemas na sinalização levando a falhas no *call setup success rate* ou a quedas de chamadas de voz ou sessões de dados já estabelecidas. O valor total de interferência numa célula é calculado pela razão entre a potência da portadora recebida e a soma dos principais tipos de interferência no sistema de comunicação móvel, a interferência de canal adjacente (I_{ca}) e a interferência co-canal (I_{cc}).

$$I_T = \frac{P_{TX}}{I_{ca} + I_{cc}} \quad (3.12)$$

3.1.3.1 Interferência de Canal Adjacente

A interferência de canal adjacente resulta do facto de existirem canais de rádio com frequências contíguas na mesma célula ou nas células adjacentes à frequência do sinal desejado, sendo que o pior caso acontece quando o dispositivo móvel se encontra na fronteira da célula onde o sinal da célula servidora é menor [60].

$$I_{ca} = -10 \log \left[\left(\frac{d_i}{d_c} \right)^{\gamma} \right] - ICA \quad (3.13)$$

Onde:

- d_i – Distância entre a célula que contém o canal adjacente e o dispositivo móvel;
- d_c – Distância entre a célula servidora e o dispositivo móvel;
- ICA – Isolamento de canal adjacente.

Este tipo de interferência piora também quando existe alguma imperfeição no filtro do receptor, deixando captar frequências muito próximas à frequência desejada da célula servidora que podem até nem pertencer ao sistema.

A interferência de canal adjacente pode ser melhorada através de [60]:

- Uma correcta alocação de frequências nos canais entre células vizinhas, de modo a evitar colisão de frequências, garantindo o espaçamento necessário entre as frequências alocadas;
- Filtragem adequada de modo a não captar frequências interferentes;
- Utilizar técnicas de controlo de potência para que a potência emitida, tanto na antena de transmissão como na de recepção, seja a essencial para garantir uma ligação estável e com bom desempenho.

3.1.3.2 Interferência Co-canal

A interferência co-canal surge quando células próximas utilizam a mesma frequência. Para evitar este tipo de interferência é essencial garantir uma distância mínima entre células com a mesma frequência, com o objectivo de assegurar um isolamento entre as mesmas. A interferência co-canal é calculada pela razão entre a potência da portadora recebida e o ruído térmico somado à potência associada aos diversos sinais interferentes, contudo em comunicações móveis o ruído térmico pode ser desprezado e considerando apenas os sinais interferentes co-canal do primeiro anel de vizinhas, desprezando os anéis superiores, resultando assim [60]:

$$I_{cc} = \frac{P_{TX}}{TN + I} \cong \frac{P_{TX}}{I} = \frac{P_{TX}}{\sum_{n=1}^k I_n} \quad (3.14)$$

Como ilustrado na Figura 3.4, duas células próximas (A e B) com a mesma frequência inserem uma determinada interferência no utilizador "X" consoante a potência de cada uma que alcança o móvel, sendo que este caso é agravado quando o utilizador se encontra na borda da célula.

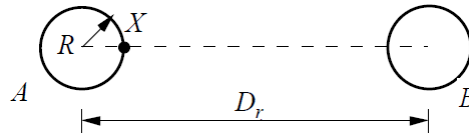


Figura 3.4: Interferência co-canal entre duas células [60].

A razão de reutilização co-canal pode ser então calculada por:

$$r_{cc} = \frac{D}{R} = \sqrt{3N_{cc}} \quad (3.15)$$

Onde:

- r_{cc} – Razão de reutilização co-canal;
- D – Distância entre células co-canal;
- R – Raio da célula;
- N_{cc} – Número de células por cluster (conjunto de ERB's).

Através de (3.13) é possível verificar que quanto maior o número de células num cluster maior será o valor da taxa de reutilização co-canal e conseqüentemente, menor a interferência co-canal. Desta maneira, é possível concluir que numa rede móvel com boa qualidade, é desejável que as células apresentem um raio pequeno assim como uma distância co-canal o maior possível.

Para reduzir a interferência co-canal existem algumas soluções como:

- Células sectorizadas, com antenas directivas, garantindo uma maior reutilização dos canais;
- Assegurar que as células cobrem a área para que foram projectadas, ao aplicar os *tilts* correctos, para se evitar *overlapping* em células vizinhas;
- Utilizar técnicas de controlo de potência.

3.1.4 Planeamento de Frequências

Através dum planeamento de frequências é possível calcular a largura de banda que será disponibilizada a cada célula. Uma vez que todos os operadores de redes móveis têm que dividir o espectro rádio entre si, tipicamente através de leilões regulados pela autoridade nacional de comunicações (ANACOM – Autoridade Nacional de Comunicações – no caso português), cada operadora irá ter à sua disposição um espectro limitado, e de modo a que todos os sectores do eNodeB utilize a mesma largura de banda é necessário utilizar um factor de reutilização igual a 1, procurando assim um melhor aproveitamento do espectro e do serviço prestado aos utilizadores [41]. O factor de reutilização é a taxa que indica a reutilização de uma frequência, sendo calculada por $1/K$, onde K é o número de células que não podem utilizar essa dada frequência. Na Figura 3.5 encontra-se uma representação de como a reutilização pode ser projectada. Contudo esta opção poderá não ser a mais viável de implementar, dado que por um lado se consegue evitar um planeamento de frequências, uma maior eficiência espectral e uma maior largura de banda por célula, por outro lado, com grandes cargas, aumenta-se o nível de interferência na rede, reduções de cobertura e baixos níveis de SINR nos limites de célula (devido a *downtilts* efectuados para mitigar situações de interferência).

Para reduzir efeitos de interferência co-canal, foram inseridos no LTE várias soluções para conseguir minimizar o CINR (*Carrier to Interference plus Noise Ratio*), parâmetro que mede a relação entre o sinal da célula servidora e os sinais das células interferentes:

- **FSS (*Frequency Selective Scheduling*)** – os RB's utilizados são os que oferecem melhor performance na transmissão de dados;
- **ICIC (*Inter-Cell Interference Coordination*)** – estratégias para lidar com interferência nos limites da célula devido a utilizações da mesma frequência entre células macro e pico ou femto células;
- **RBGA (*Resource Block Group Assignment*)** – diferentes RB's alocados para diferentes sectores de modo a reduzir a interferência.

Em LTE, devido à partilha de recursos rádio na camada física, é possível que para o mesmo UE estejam atribuídos RB's de células macro, pico ou femto, na mesma portadora ou em portadoras diferentes, conseguindo-se assim uma maneira no *downlink* de reduzir possíveis interferências na transmissão de dados.

Existem então três métodos ICIC de divisão de frequência [42]:

- **FFR (*Fractional Frequency Reuse*)** – a célula é dividida em segmentos onde a cada um deles é alocada uma secção da banda disponível, reduzindo assim a interferência;
- **HFR (*Hard Frequency Reuse*)** – o espectro disponível é dividido de maneira a que uma célula vizinha utilize zonas em comum do espectro, estando todos os utilizadores conectados à célula alocados na mesma banda. Com este método a banda utilizada por célula é reduzida, sendo que em momentos de cargas altas na rede o *throughput* pode ser reduzido, mas por outro lado consegue diminuir a interferência na rede;
- **SFR (*Soft Frequency Reuse*)** – a largura de banda total é utilizada por todas as células, sendo determinado um espectro de potência individual para cada célula. Com este

método a probabilidade das células vizinhas usarem os mesmos RB's não diminui, mas as colisões são reduzidas, aumentando a eficiência espectral e diminuindo a interferência tanto em *downlink* como em *uplink*.

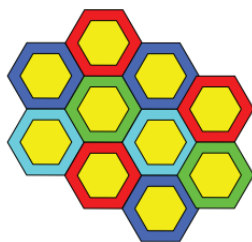


Figura 3.5: Planeamento de frequência para evitar interferência nos limites de célula. Sendo a largura de banda representada pela cor amarela e as restantes cores pelas frequências reutilizadas [43].

Para a zona de estudo deste projecto, ir-se-á considerar LTE FDD com a banda dos 800 MHz para necessidades de cobertura a grandes distâncias e a banda dos 1800 MHz em casos específicos para reforço de capacidade, como descrito na Tabela 3.1. As larguras de banda disponíveis nas bandas em causa, são de 30 MHz e 75 MHz, para o L800 e o L1800, respectivamente, sendo que as operadoras compram, através de leilões, à ANACOM o espectro que necessitam para satisfazer os seus clientes. Neste projecto iremos utilizar as bandas L800 e L1800 com uma largura de banda de 10 MHz e 20 MHz, respectivamente.

Número de Banda LTE	Banda LTE	Frequências UL / DL [MHz]	Largura de Banda Disponível	Largura de Banda Utilizada
20	800 MHz	832 – 862 / 791 – 821	30 MHz	10 MHz
3	1800 MHz	1710 – 1785 / 1805 – 1880	75 MHz	20 MHz

Tabela 3.1: Bandas e larguras de banda LTE consideradas no projecto (informação extraída da Tabela 2.1).

Definidas as larguras de banda a utilizar, é necessário fazer a divisão da mesma entre os sectores de cada estação rádio base que iremos ter na rede móvel neste projecto. Assumindo então que iremos utilizar os primeiros 10 MHz do L800 (832 – 862 em UL e 791 – 821 em DL) e os primeiros 20 MHz do L1800 (1710 – 1785 em UL e 1805 – 1880 em DL), obtém-se então os valores de frequência iniciais atribuídas em cada sector, descritas na Tabela 3.2:

Banda LTE	Sector	Frequência DL [MHz]	Frequência UL [MHz]
800 MHz	1	791	832
	2	795.95	836.95
1800 MHz	1	1805	1710

Tabela 3.2: Frequências atribuídas em cada sector.

3.2 Planeamento de Capacidade

O planeamento de capacidade permite fazer uma predição dos recursos necessários para suportar a procura de tráfego dos utilizadores, com um débito binário e QoS pré-determinado, satisfazendo as necessidades dos utilizadores, sem que se atinja níveis de congestão na rede, ou seja, não se alcance o limite máximo de utilizadores. Entre os parâmetros necessários de determinar, para garantir as necessidades de tráfego dos utilizadores, estão a largura de banda, tipo de MIMO, características da antena ou modulação.

A densidade populacional, o número total de utilizadores activos, conjugado com o tipo de densidade, distribuição e perfil de tráfego desses mesmos utilizadores, da zona em estudo, são elementos essenciais para um bom planeamento de capacidade de modo a conseguir assegurar uma boa qualidade de serviço durante os períodos de tráfego mais elevado ou “horas de ponta” (“*busy hour*”) e para se evitar uma sobrecarga na rede, permitindo dimensionar o tráfego oferecido na célula à procura existente efectuado pelos utilizadores, durante estes períodos.

A *busy hour* pode ser então caracterizada como a hora de maior tráfego na célula ou hora de ponta no sistema, influenciando directamente no número de estações rádio base e na qualidade do serviço prestado.

Como referido, numa rede móvel existem períodos do dia onde as cargas de tráfego são mais elevadas, como é possível verificar na Figura 3.6, onde as horas de maior tráfego são entre as 11h e as 17h, sendo processado cerca de 56% do tráfego de voz, mais de metade do tráfego total num dia em apenas 7h.

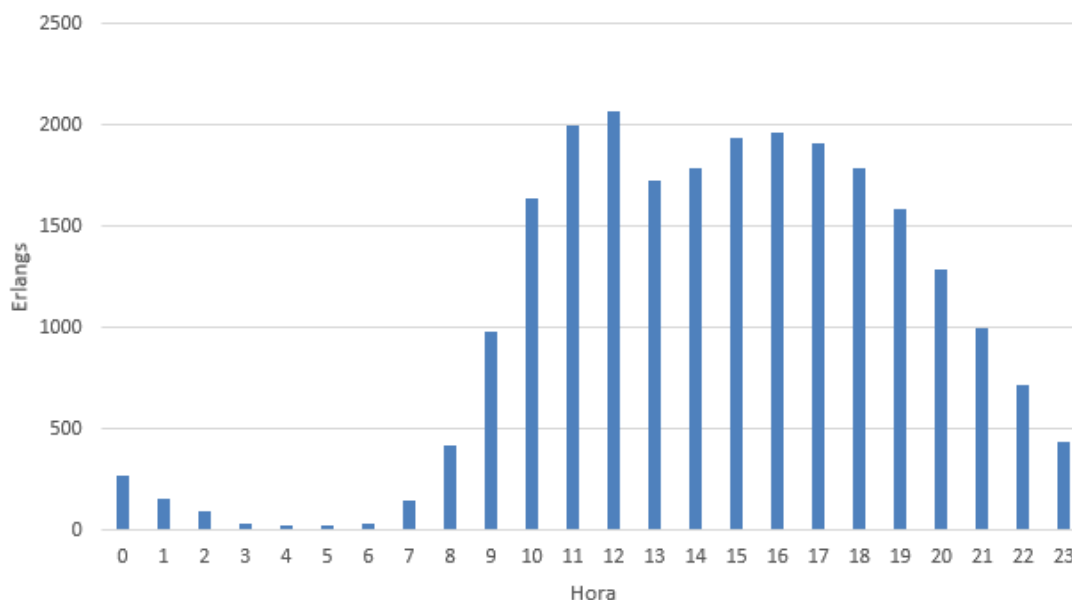


Figura 3.6: Distribuição diária de tráfego de voz (em erlangs) típica de uma rede movel.

Em termos de distribuição no tipo de aplicações utilizadas, a aplicação preferida dos utilizadores em tráfego móvel é o vídeo, com 66% do total de tráfego, como é possível verificar na Figura 3.7.

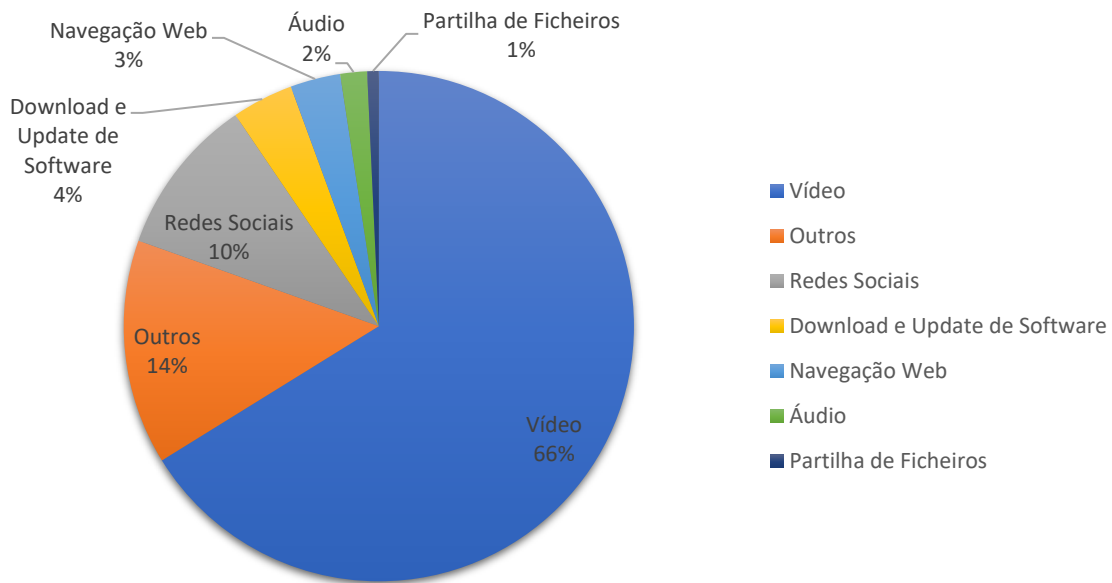


Figura 3.7: Perfil de tráfego da utilização das diferentes aplicações móveis no ano de 2020 [48].

Neste trabalho iremos estudar em detalhe a zona entre a localidade de Alandroal e Elvas, na região de Portugal, Alentejo Norte. Actualmente, nesta zona está a ser construída uma nova linha férrea com ligação a Espanha e que terá que ser tida em conta no planeamento. Dessa maneira, é necessário assegurar bons valores ao longo da zona 3 do troço da linha férrea entre Évora e Caia, como indicado na Figura 3.8, e tendo em conta a zonas próximas edificadas, localidades e a sua densidade populacional, teve-se em conta os seguintes dados da Tabela 3.3.



Figura 3.8: Troço entre Évora e Caia da nova linha férrea [38].

Parâmetro		Valor
Abertura Vertical Antenas [°]	LTE 800	15.4
	LTE 1800	6.6
Área [Km ²]		90
Densidade Populacional [hab/Km ²]		23
Frequências de Transmissão [MHz]		LTE 800 e LTE 1800
Largura de Banda [MHz]	LTE 800	10 MHz
	LTE 1800	20 MHz
Morfologia Terreno		Rural
População Total [hab]		2000
Sectores por eNB		2

Tabela 3.3: Características, parâmetros e equipamentos de rede utilizados no planeamento de cobertura da área em estudo.

3.2.1 Expansão de Capacidade do Sistema

Devido a variações ou alterações do perfil de tráfego dos utilizadores, pode crescer o número de utilizadores num curto espaço de tempo numa determinada área, o que leva a uma procura elevada pelos serviços móveis disponibilizados e originando uma degradação da *performance* da rede nessa mesma área. Para combater este tipo de problema é necessário recorrer a uma expansão do sistema para manter a qualidade de serviço desejável, podendo ser feita através da adição de novas portadoras ou bandas LTE ou pela sectorização das células, substituindo células omnidireccionais que transmitem a mesma potência em todas as direcções (Figura 3.10) por células sectorizadas, sendo que tipicamente são utilizadas três por ERB, com antenas directivas onde cada uma fica responsável por cobrir uma determinada área, conseguindo-se assim reutilizar mais vezes os canais e reduzir interferências co-canal, como representado na Figura 3.9.

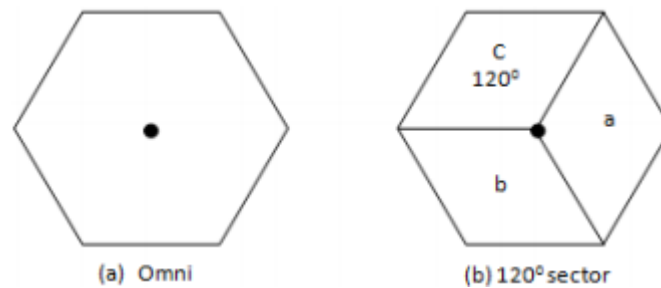


Figura 3.9: Sectorização de uma célula para três sectores de 120º [61].

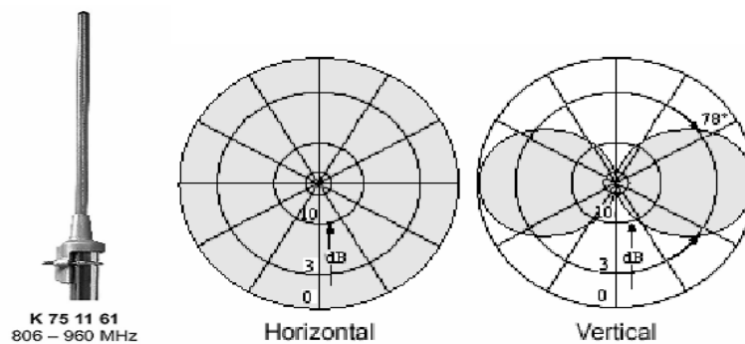


Figura 3.10: Exemplo de antena omnidireccional com os seus diagramas de radiação respectivos [62].

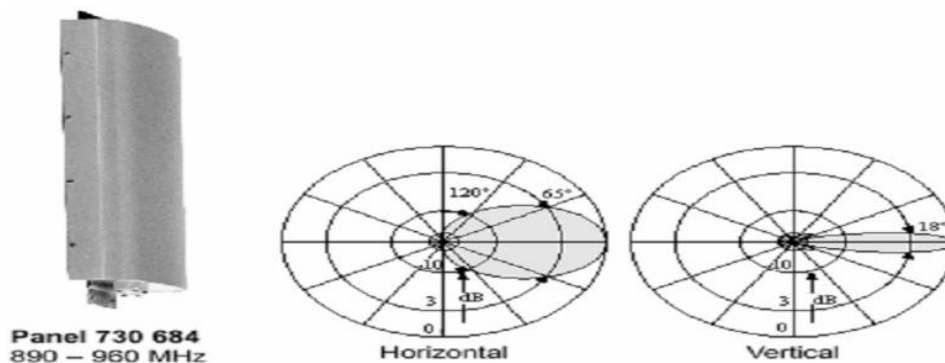


Figura 3.11: Exemplo de antena directiva com os seus diagramas de radiação respectivos [62].

3.3 Cálculo *Link Budget*

Com as informações reunidas nos capítulos 2.1.1, 2.2.1.1, 3.1.1 e 3.1.2 foi possível então fazer uma previsão dos valores de débito binário e SINR. Através dos parâmetros indicados na Tabela 3.4, foram calculados os valores teóricos para o débito binário, indicados na Tabela 3.5.

Parâmetro		Valor
Dispositivo Móvel		Huawei P30
Duração <i>Subframe</i> [ms]		1
MIMO	LTE 800	2x2
	LTE 1800	4x4
Número de Bits por Símbolo		8
Número de RB's por <i>Subframe</i>	LTE 800	50
	LTE 1800	100
Taxa de Codificação		0.926
Utilizadores		500

Tabela 3.4: Parâmetros utilizados nos cálculos teóricos do débito binário.

KPI	Sentido	CC's Utilizadas	Valor Teórico
Débito Binário Total [Mbps]	<i>Downlink</i>	L800	118.69
		L1800	474.76
		L800 e L1800	593.44
	<i>Uplink</i>	L800	118.69
		L1800	237.38

Tabela 3.5: Valores teóricos calculados para o débito binário total.

Após o cálculo dos valores de débito binário totais, tendo em conta os parâmetros da Tabela 3.4, sabendo os utilizadores que poderão estar conectados à rede em comum, foram calculados os débitos binários por utilizadores, indicados na Tabela 3.6.

KPI	Sentido	CC's Utilizadas	Valor Teórico
Débito Binário por Utilizador [Mbps]	<i>Downlink</i>	L800	0,24
		L1800	0,95
		L800 e L1800	1,19
	<i>Uplink</i>	L800	0,24
		L1800	0,47

Tabela 3.6: Valores teóricos calculados para o débito binário por utilizador.

Para o cálculo dos valores teóricos do SINR, indicados na Tabela 3.9, é necessário definir os valores de *path loss*, calculados pelos parâmetros indicados na Tabela 3.7. Uma vez que área

de estudo é uma zona rural, tipicamente com grandes distâncias entre sites (*inter-site distance*), foi considerada a utilização de um MHA (Mast Head Amplifier), amplificador colocado junto da antena com o objectivo de reduzir o ruído de sinal, para a banda L800, melhorando a sensibilidade, conseguindo receber sinais mais fracos.

Parâmetro		Valor
Altura do UE [m]		1.5
Desvanecimento log normal [dB]		6
Factor de Ruído [dB]	LTE 800	2.1 – 2.2
	LTE 1800	< 2.4
Ganho Antena eNB [dBi]	LTE 800	15.3
	LTE 1800	17.1
Ganho Antena UE [dBi]		3
Ganho MHA [dBi]		9.8
Margem de Interferência [dB]		1
Modelo Antenas		APXVBLL15H_43-C-I20
Modelo MHA		FLPMDK triple band 700/800/900 dual MHA
Perdas de Penetração (rural) [dB]	LTE 800	5
	LTE 1800	8
Perdas de Utilizador [dB]		1
Potência de Transmissão eNB [dBm]		43
Potência de Transmissão UE [dBm]		23
Ruído Térmico [dBm]		-121.45

Tabela 3.7: Parâmetros utilizados nos cálculos teóricos do SINR.

Utilizando então o modelo de *Okumura-Hata* para a banda L800 e o modelo *COST-231 Hata* para a banda L1800, indicados no subcapítulo 3.1.1.2, foi possível calcular os valores para as perdas de propagação (*path loss*) indicados na Tabela 3.8.

Parâmetro	L800	L1800
$PL_{[dB]}$	157.09	147.80
K_1	118.74	117.96
K_2	38.35	
$\alpha(H_r)$	0.01	
K_c	12.93	
$d_{[Km]}$	10	6

Tabela 3.8: Valores teóricos para o *path loss* em cada banda LTE.

KPI	Sentido	Banda LTE	Valor Teórico
SINR [dB]	Downlink	L800	20.31
		L1800	18.40
	Uplink	L800	14.30
		L1800	14.10

Tabela 3.9: Valores teóricos calculados do SINR na fronteira de célula.

3.4 Zonas de Sombra

As zonas de sombra são caracterizadas por serem zonas onde a potência recebida no dispositivo móvel é inferior à sensibilidade do mesmo, não sendo possível dessa maneira efectuar comunicações entre a rede e o UE. Tipicamente são zonas com obstrução do sinal como serras, vales ou edificação densa, levando a uma forte atenuação do sinal transmitido, como representado na Figura 3.12.

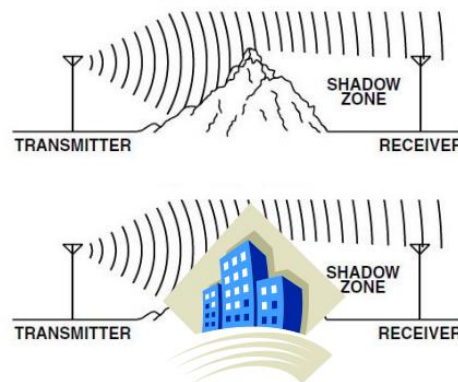


Figura 3.12: Zona de sombra [35].

Para contornar estes obstáculos ou tentar reduzir o seu impacto na rede, é possível instalar repetidores de sinal, estrategicamente posicionados para as zonas de sombra em questão ou direccionar o lobo principal das antenas de transmissão para as mesmas.

3.5 Planeamento de Parametrização

Neste capítulo serão abordados alguns dos parâmetros principais a ter em conta aquando dum planeamento de rede móvel.

3.5.1 PCI – *Physical Cell Identity*

O PCI é o valor identificador de uma célula na camada física LTE. O PCI pode tomar um valor de 504 PCI's definidos (0 a 503), sendo que numa rede densa é necessário reutilizar valores para diferentes células sem que estas sirvam coberturas em zonas próximas para evitar situações de:

- **Confusão de PCI (PCI Confusion)** – Situação onde uma célula servidora possui duas células vizinhas com o mesmo PCI, e uma vez que o dispositivo móvel utiliza o PCI para fazer medições das células vizinhas, este não consegue medir duas células com o mesmo PCI, originado que não consiga fazer *handover*;
- **Colisão de PCI (PCI Collision)** – Situação que ocorre quando uma célula servidora possui um PCI igual ao da célula vizinha, levando a que o dispositivo móvel não consiga identificar a qual célula se encontra conectado.

Assim, sempre que seja efectuado um planeamento de PCI é necessário garantir uma distância de reutilização de modo a garantir que o dispositivo móvel não detecta dois PCI's idênticos. Em cada eNodeB, entre cada sector, os PCI's devem ser diferente para se poder assegurar um desvio na frequência, garantido que os sinais de referência das diferentes células não se sobrepõem, diminuindo a interferência.

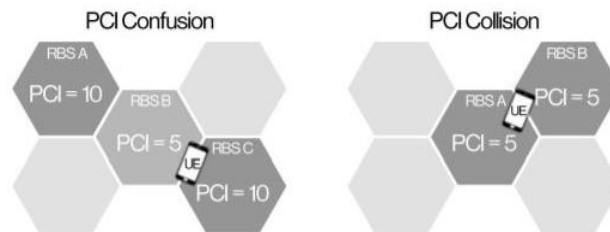


Figura 3.13: Ilustração de PCI *Confusion* (esquerda) e PCI *Collision* (direita) [39].

Situações de conflito de PCI, como identificadas na Figura 3.13, podem levar a quedas de chamadas devido a falhas de *handover* ou grandes valores de interferência no canal de transmissão.

3.5.2 RSI – Root Sequence Index

O UE realiza o procedimento de *random access* (acesso aleatório) para se conseguir conectar à rede LTE, através do PRACH, de modo sincronizar o fluxo de mensagens em *downlink* e *uplink*, realizar HO entre células LTE e estabelecer (ou restabelecer) uma conexão para determinado serviço [40].

O *random access* em LTE é realizado em dois modos, *non-contention based* (não baseado em contenção) e *contention based* (baseado em contenção), onde cada célula LTE utiliza 64 preâmbulos de PRACH, sendo 24 alocados ao eNodeB para *non-contention based* e 40 para serem alocados pelo dispositivo móvel em *based contention*. Os 40 preâmbulos alocados ao UE são calculados através do RSI que a célula possui e transmite aos utilizadores no PRACH. O RSI é então fundamental ser diferente, entre células que transmitem na mesma frequência, para que dois ou mais dispositivos móveis ligados à mesma célula consigam calcular preâmbulos diferentes entre si, de modo a evitar colisões de preâmbulos (colisão de RSI) que originam quedas de serviço ou falhas de HO. Na Tabela 3.10 estão descritos os valores de PCI e RSI planeados para a rede em estudo.

Código do eNodeB	Latitude [°]	Longitude [°]	Banda	Sector	PCI	RSI
ERB1	38.700476	-7.393485	L800	1	1	420
				2	5	430
			L1800	2	5	430
ERB2	38.81535	-7.206626	L800	1	9	440
				2	13	450

Tabela 3.10: PCI's e RSI's adoptados para as diferentes células utilizadas na zona em análise.

3.5.3 TA – Tracking Area

Em redes móveis, o sistema não conhece sempre a localização exacta do dispositivo móvel e, por esse motivo, é necessário que o mesmo envie actualizações da sua localização para a rede (LU – *Location Update*) sempre que a TA sofra alteração.

Na rede LTE, o UE actualiza a sua localização apenas no core PS, uma vez que tanto o tráfego de voz e de dados funcionam por pacotes. Em caso de CSFB, o core CS envia uma mensagem de *paging* para o UE e o MME mapeia a sua TA para os parâmetros equivalentes em 2G e 3G, LA ou RA, respectivamente.

Em *idle mode*, a rede envia uma mensagem de *paging* para todas as estações rádio base com o TA do UE de modo a saber a qual célula este se encontra conectado. O objectivo das *tracking areas* é reduzir ao número de *paging's* difundidos na rede, sendo que com *tracking areas* grandes advém um aumento da carga de mensagens de *paging*. Por outro lado, com *tracking áreas* pequenas aumenta o número de mensagens de LU enviadas pelos dispositivos móveis.

Em suma, de modo a conseguir um balanceamento na rede entre as mensagens de *paging* e LU deverá ser feito um planeamento de *tracking areas* correcto, aumentando as mesmas quando se

verifica um aumento anormal das mensagens de *paging* e por outro lado, reduzindo quando se verifica grandes cargas de mensagens de LU, por parte dos dispositivos móveis.

3.5.4 Tilt Eléctrico e Mecânico

O *tilt* é a inclinação, em graus, da antena em relação ao seu eixo referencial, podendo ser feito um *tilt* eléctrico ou mecânico com o objectivo de direccionar o lobo principal da antena para as zonas que se pretende servir, como ilustrado na Figura 3.14, garantindo assim um sinal mais forte nas áreas de interesse, ou como acção perante situações de interferência ou sobreposição de cobertura com células vizinhas. Em caso de inclinação da antena para baixo (em direcção ao solo), é feito um *downtilt*, no caso contrário é feito um *uptilt*.

- **Tilt eléctrico (TE)** – *tilt* feito ao se alterar as características dos sinais de entrada na antena, mais propriamente a sua fase, fazendo com que o diagrama de radiação se altere e consequentemente todos os lóbulos da radiação sofram alterações. O *tilt* pode ter um valor fixo ou variável, sendo que no caso deste último, pode ser feito directamente na antena no terreno, ajustando manualmente para o valor pretendido a haste ou parafuso que regula o valor do *tilt*, dentre uma gama de valores predefinidos pelo fabricante, ou pode ser feito remotamente através dum *tilt* eléctrico remoto (RET – *Remote Electrical Tilt*), no qual a alteração é feita pelo engenheiro remotamente, através de um motor que controla a haste ou parafuso, podendo o RET estar instalado no exterior da antena ou no interior da mesma;
- **Tilt mecânico (TM)** – o *tilt* mecânico é uma alteração física efectuada directamente na antena, inclinando esta para a inclinação desejada com acessórios próprios para o suporte da mesma, sem alterar o sinal de entrada, fazendo com que os lóbulos de radiação mantenham o mesmo perfil, mas apontando em direcções diferentes. Os valores de TM estão limitados pelos suportes extensíveis colocados entre a antena e o mastro que a suporta, podendo o suporte ser colocado no topo da antena para *downtilt* ou na parte inferior para *uptilt*.

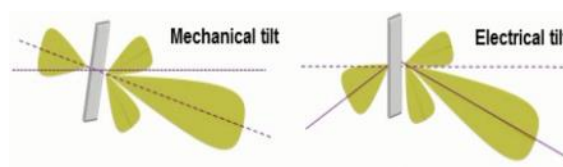


Figura 3.14: Esquema de radiação com *tilt* mecânico e eléctrico (adaptado de [45]).

Em planeamento e optimização de rede, tipicamente é preferível recorrer ao *tilt* eléctrico em detrimento do *tilt* mecânico, uma vez que este último ao ser aplicado, por exemplo em *downtilt*, pode provocar um impacto negativo dos lóbulos traseiros na rede, podendo originar um aumento de interferência, o que não se verifica num *tilt* eléctrico onde todo o sinal é concentrado para mais próximo da antena. Desta maneira, sempre que possível, utiliza-se o *tilt* eléctrico e apenas

quando este atinge o seu valor máximo ou mínimo, pré-definido nas especificações descritas na ficha técnica da antena, é considerado efectuar-se um *tilt* mecânico.

O valor final de *tilt* de uma antena é então o valor somado entre o *tilt eléctrico* e o *tilt* mecânico:

$$\alpha_{tilt} = \alpha_{elec} + \alpha_{mech} \quad (3.16)$$

A localização e orientação dos sectores de ambas as estações rádio base foram planeadas especificamente para cobrirem toda a extensão da área em estudo e de maneira a reduzir custos de estruturas de suporte (como torres de telecomunicações que quanto mais altas maiores são os seus custos de instalação) ao fazer a instalação em locais com grandes elevações como colinas ou montes, para se retirar o maior proveito do terreno em análise.

Para uma correcta estimativa dos valores de *tilts* é necessário então conhecer os valores das altitudes do terreno do emissor e receptor e distância entre os mesmos, assim como a altura em que será instalada a antena (altura da torre de telecomunicações ou altura do edifício, em caso de instalação no topo do mesmo – *rooftop*), como ilustrado na Figura 3.15.

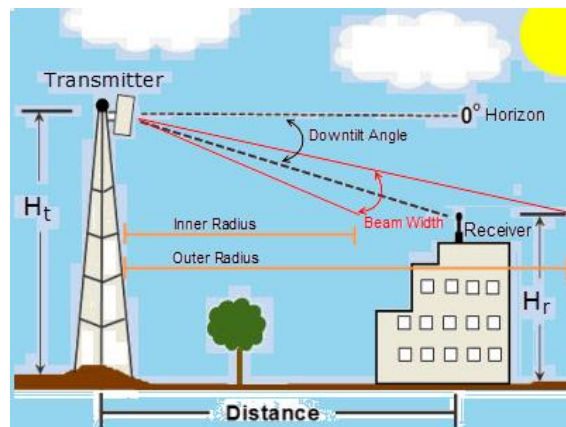


Figura 3.15: Esquemático entre os vários intervenientes no cálculo do *tilt* [50].

$$\alpha_{tilt} = \tan^{-1} \left(\frac{H_t - H_r}{d} \right) + \frac{\alpha_{av}}{2} \quad (3.17)$$

Através de (3.17), calcularam-se então os valores para os *tilts* a utilizar, descritos na Tabela 3.11, tendo sido ajustados consoante a área em análise e as localizações das estações rádio base, representadas na Figura 3.16:

Código do eNodeB	Banda	Sector	Azimute [°]	Altura Antena [m]	TM [°]	TE [°]
ERB1	L800	1	65	10	0	5
		2	260	10	0	5
	L1800	2	260	10	0	3
ERB2	L800	1	50	10	0	5
		2	210	10	0	5

Tabela 3.11: Valores de *tilts* para as diferentes células utilizadas na zona em análise.

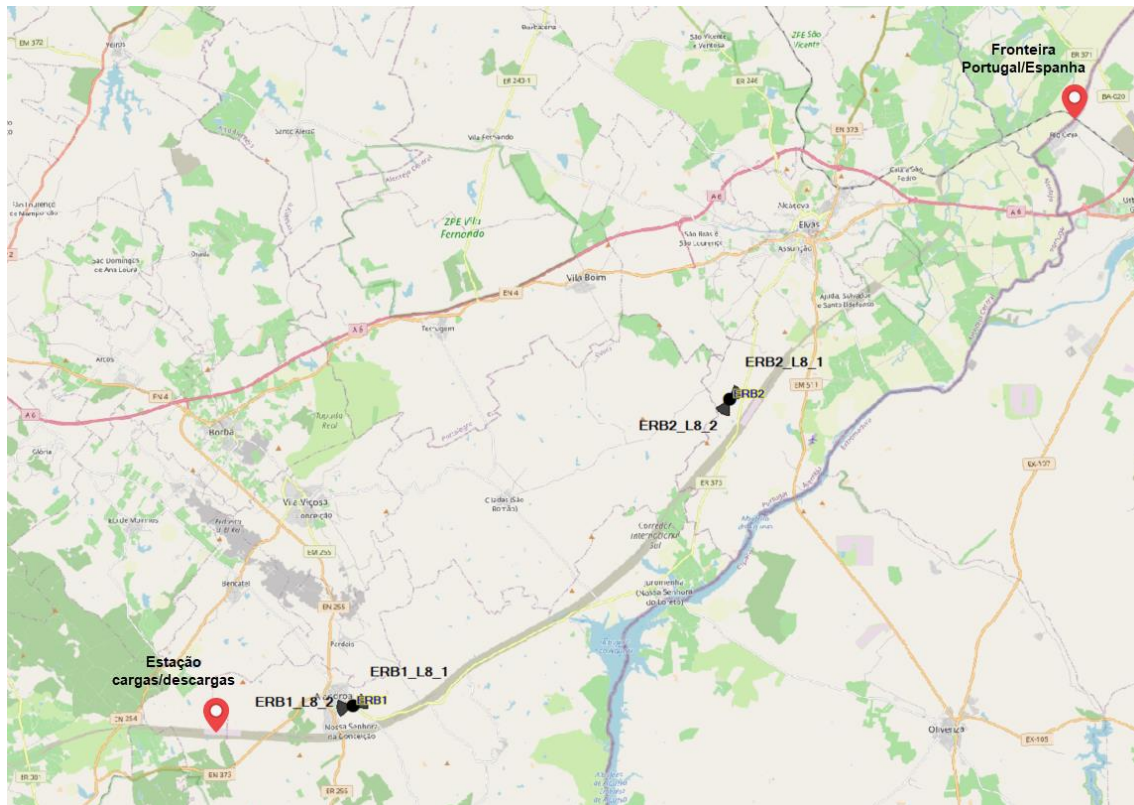


Figura 3.16: Área em estudo – zona rural entre a localidade de Alandroal e a fronteira entre Portugal e Espanha, com futura ferrovia tida em conta.

Capítulo 4

4. Análise de Resultados

Após serem declaradas na *tool* de planeamento Atoll todos os *inputs* necessários, apresentados no capítulo anterior, como o modelo de antena e o seu ganho, potência emitida ou a altura da ERB, obtiveram-se os resultados descritos nos capítulos seguintes.

4.1 RSRP

O RSRP – *Reference Signal Received Power* – permite conhecer os valores da potência média do sinal de referência recebido no dispositivo móvel para uma largura de banda específica, conseguindo assim pré-determinar as condições rádio para garantir os níveis mínimos de *performance* esperados.

Durante a ligação à rede móvel, o UE envia mensagens de RRC MR (*Radio Resource Control Measurements Reports*) para a ERB, nas quais estão incluídos os valores medidos de RSRP. Os valores deste indicador situam-se, tipicamente, entre os -44 dBm e os -140 dBm, estando a sua classificação descrita na Tabela 4.1.

Condições Rádio	RSRP (dBm)
Excelente	≥ -80
Boa	-80 a -90
Razoável	-90 a -100
Má	≤ -100

Tabela 4.1: Classificação do RSRP consoante o seu valor [51].

Após simulação, obtiveram-se os resultados representados na Figura 4.1, onde é possível verificar os valores de RSRP, garantindo-se valores entre os -100 dBm e os -110 dBm nas fronteiras de célula, em *downlink*, ao longo de todo o troço em estudo, em teoria suficiente para manter uma chamada de voz se necessário, embora sejam valores já baixos para manter uma sessão de dados com débitos binários elevados. Para a localidade próxima da ERB1 (Alandroal), servida pelo seu 2º sector, verificam-se níveis de RSRP excelentes, sempre superiores a -70 dBm, garantindo assim bons valores de qualidade e *throughput*.

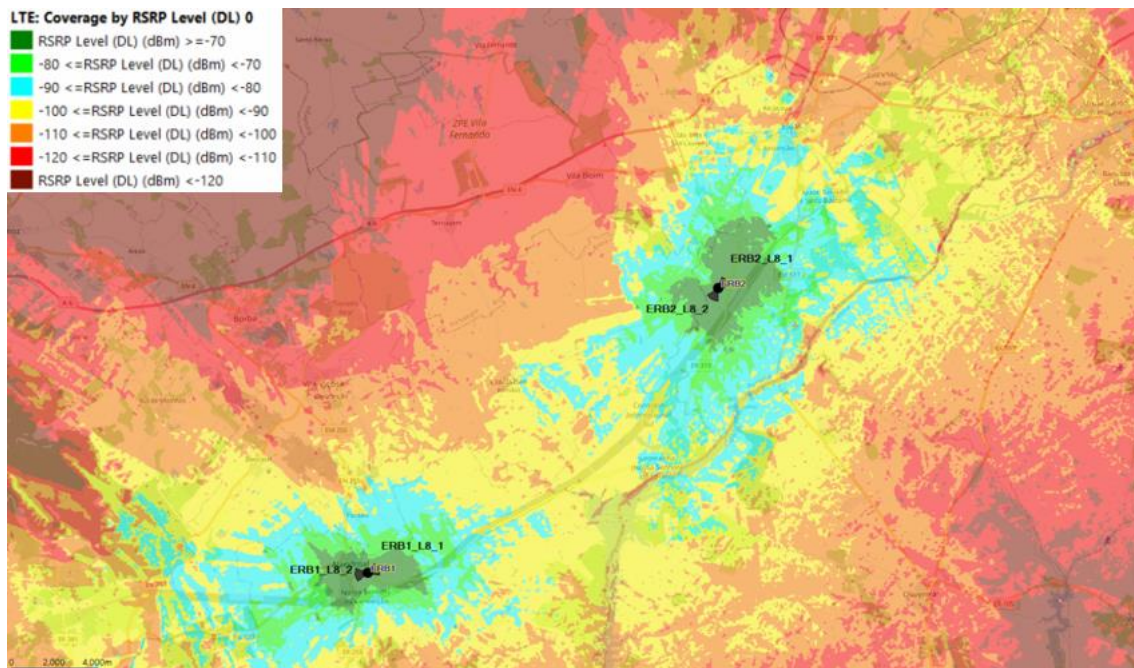


Figura 4.1: Valores de RSRP obtidos através de simulação [64].

4.2 Best Server

Ao efectuar a simulação do *best server* é possível verificar na Figura 4.2 que em todos os sectores o L800 serve de *best server* existindo uma fronteira bem definida entre o sector 1 da ERB1 e o sector 2 da ERB2 no L800, ao longo do troço em estudo, contudo existem algumas zonas nas fronteiras de célula, nas quais os valores de RSRP são menores, onde se verifica zonas alternadas de *best server*, servindo sempre a célula que apresenta melhor nível de sinal recebido.

De maneira a que o dispositivo móvel conheça a célula primária prioritária para estabelecer a ligação RRC, as diferentes bandas existentes na rede são classificadas e configuradas, pelos administradores da rede móvel, consoante a sua prioridade. Neste projecto a banda com maior prioridade será a L800, com o objectivo de evitar *pcell swap's* na fronteira da célula L1800, entre esta e a L800. Deste modo, como era esperado, todos os *best server's* após a simulação são células L800.

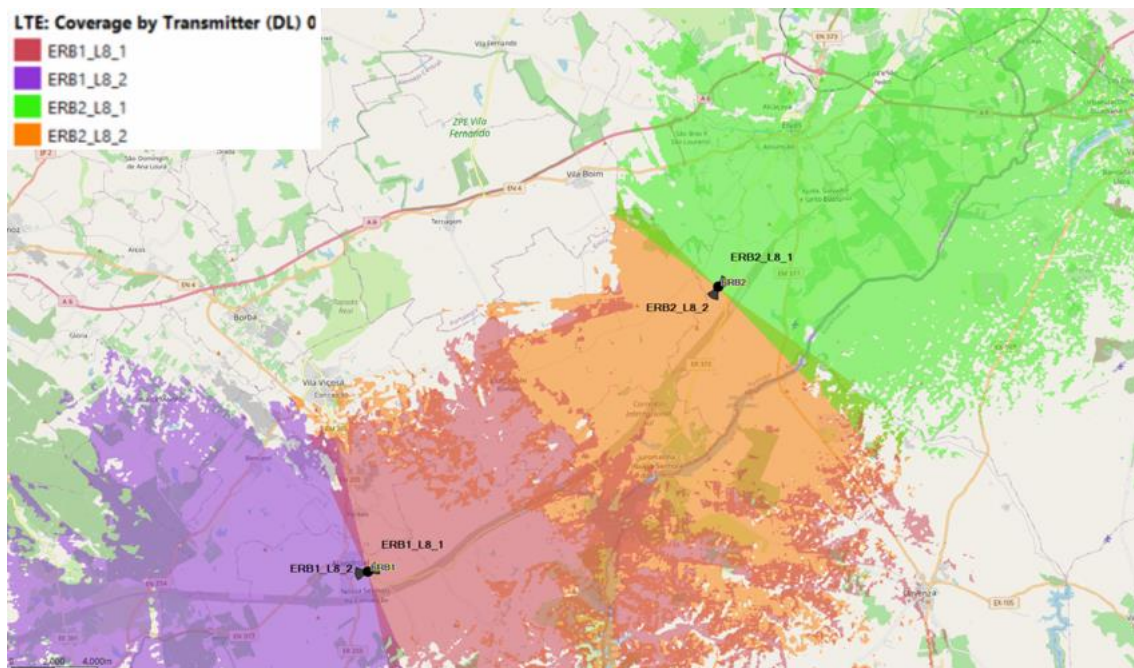


Figura 4.2: Best Server's obtidos através de simulação [64].

4.3 Qualidade

Neste capítulo ir-se-á analisar os indicadores de análise de qualidade de sinal obtidas após simulação.

4.3.1 SINR

Os valores de SINR influenciam directamente o débito binário máximo, sendo que quanto maiores forem os valores deste indicador melhor será o desempenho da rede, uma vez que modulações de ordem mais elevada podem ser utilizadas. Para isso é necessário que o RSRP apresente bons níveis quando comparado com os valores de interferência existente na zona, assim como também que o SINR apresente valores suficientes para assegurar uma boa *performance* da rede em zonas próximas da célula mas principalmente nas zonas de fronteira, onde por vezes, e principalmente em zonas rurais, existem valores mais elevados de interferência.

Na simulação obtida, representada na Figura 4.3, é possível verificar que temos valores de SINR, em toda a extensão da área em análise, sempre superiores a pelo menos 17 dB, o que permite que os utilizadores consigam utilizar as funcionalidades de rede com uma boa qualidade mesmo em zonas de fronteira de célula.

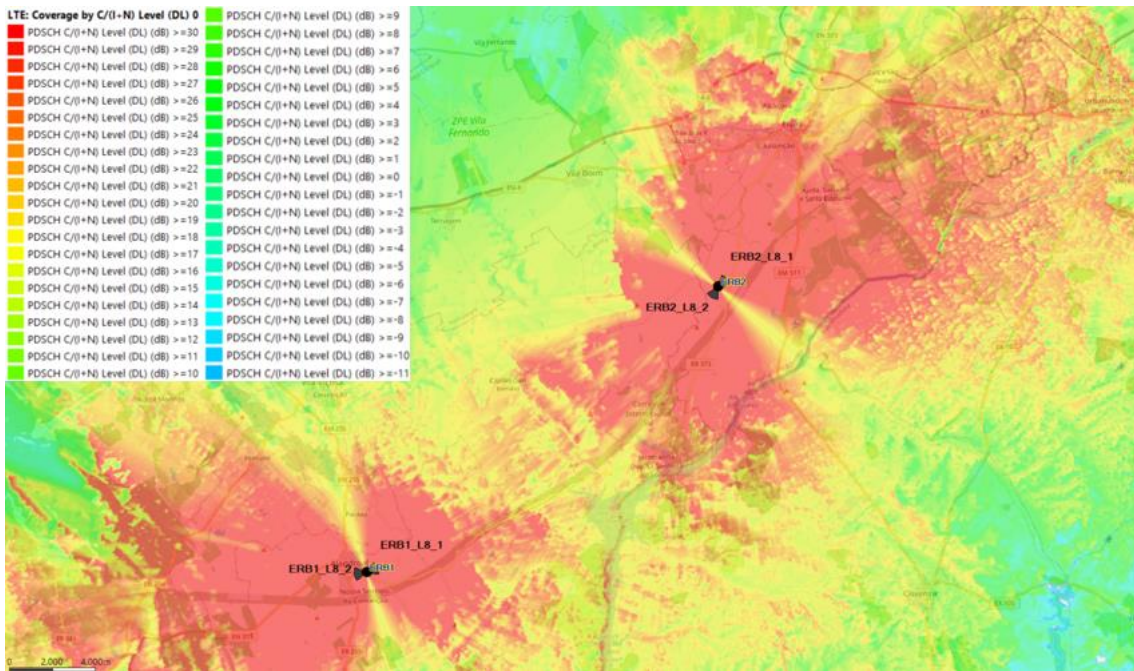


Figura 4.3: Valores de SINR obtidos através de simulação [64].

4.3.2 BLER

Uma vez que os valores de SINR são bastante favoráveis na área em estudo, como era de esperar a taxa simulada de blocos recebidos errados no dispositivo móvel é bastante baixa, sendo muito próximo de 0% em zonas próximas às estações rádio base e cerca de 5%-10% em zonas mais afastadas destas, em toda a área em estudo. Tendo em conta que o BLER deve apresentar valores inferiores a 10%, o indicador simulado e ilustrado na Figura 4.4 apresenta valores muito benéficos para uma boa qualidade na rede móvel.

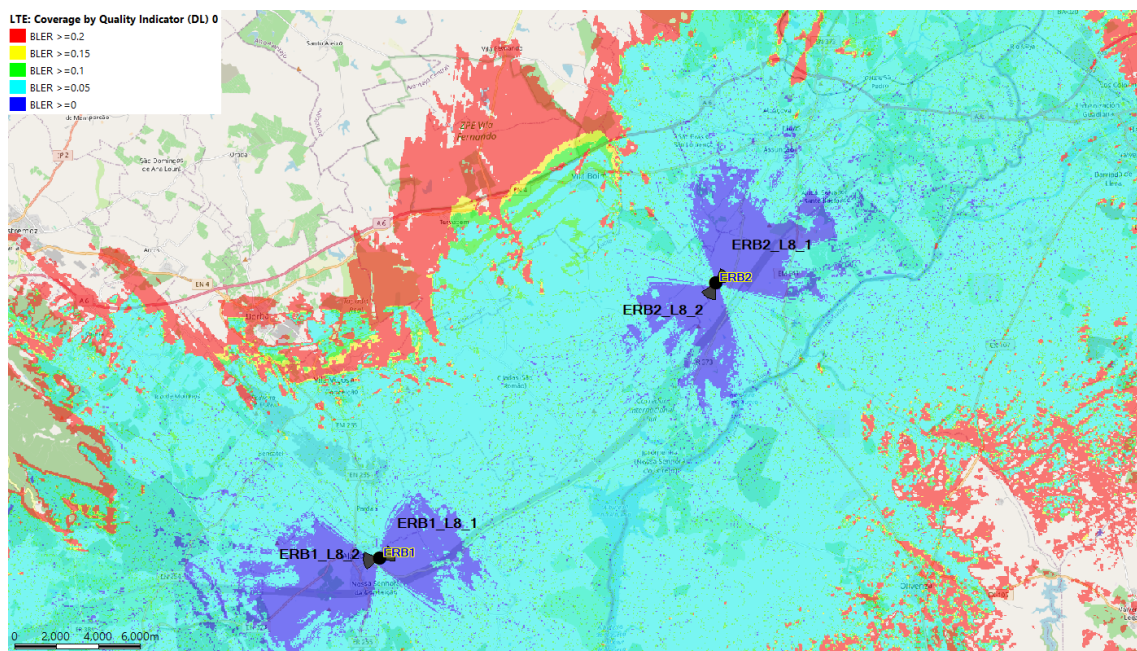


Figura 4.4: Valores de BLER obtidos através de simulação [64].

4.3.3 RSRQ

Outro indicador de qualidade necessário analisar é o RSRQ – *Reference Signal Received Quality* – uma vez que apenas um bom valor de RSRP não é sinónimo de boa qualidade de sinal e que por outro lado, o RSRQ pode ser um indicador utilizado para determinar qual a melhor célula para o dispositivo móvel se conectar e também para o processo de *handover*, uma vez que este processo pode ser despoletado tanto pelo valor de RSRP como pelo de RSRQ, determinando através destes qual a melhor célula LTE para ser transferida a ligação actual do UE.

O RSRQ é um indicador calculado através do valor de RSRP, o número de *resource blocks* utilizados e o valor de RSSI – *Received Signal Strength Indicator* – que representa o valor total da potência do sinal recebido (incluindo de células vizinhas não servidas, co-canal, células adjacentes e ruído térmico), sendo sempre melhor quanto maior for o valor do RSRP e apresentando valores mais medíocres quando o RSRP for menor.

$$RSRQ = N_{BR} \frac{RSRP}{RSSI} \quad (4.1)$$

Os valores de RSRQ estão definidos na gama de valores de [-19,5;-3] dB com intervalos de 0.5 dB [65]. A classificação dos valores de RSRQ estão descritos na Tabela 4.2.

Condições Rádio	RSRQ (dB)
Excelente	>= -10
Boa	-10 a -15
Razoável	-15 a -20
Má	< -20

Tabela 4.2: Classificação do RSRQ consoante o seu valor [51].

Os valores de RSRQ são bastante importantes uma vez que o utilizador ao se movimentar influencia as condições rádio, havendo a possibilidade de se deslocar para zonas onde o valor do RSRP até poderá ser melhor, mas devido a problemas de interferência o RSRQ diminuir, podendo originar assim um *handover* de modo a assegurar a continuidade de uma ligação estável. Contudo se ambos os valores, RSRP e RSRQ, diminuírem em simultâneo, é indicativo de problemas de cobertura na zona onde o utilizador se encontra. Desta maneira, ao analisar os valores de RSRQ de uma rede móvel, é possível identificar zonas nas quais é necessário haver algum tipo de acção de modo a melhorar tanto zonas com fraca cobertura ou zonas com interferência elevada que degradem a qualidade de serviço fornecida aos utilizadores, podendo levar a problemas de queda de chamada ou *throughput* baixo.

O valor mínimo para o UE se conectar à rede LTE, tanto para o RSRP como para o RSRQ, é configurável pelos operadores, assegurando assim que o utilizador tem os valores mínimos para realizar uma ligação estável à rede.

Através da Tabela 4.2, verificamos que para garantirmos bons valores de qualidade na rede móvel, é necessário assegurar valores de RSRQ superiores a -15 dB, uma vez que abaixo deste

valor existe a probabilidade de problemas na ligação e até de existir um inter-RAT *handover*, ou seja, passagem da ligação para outras tecnologias como o GSM ou UMTS. Ao analisar a Figura 4.5, com os resultados da simulação dos valores de RSRQ na área em estudo, verificamos que em toda a sua extensão tem-se sempre valores superiores a -15 dB, o que garante bons valores de cobertura e valores de interferência desprezável.

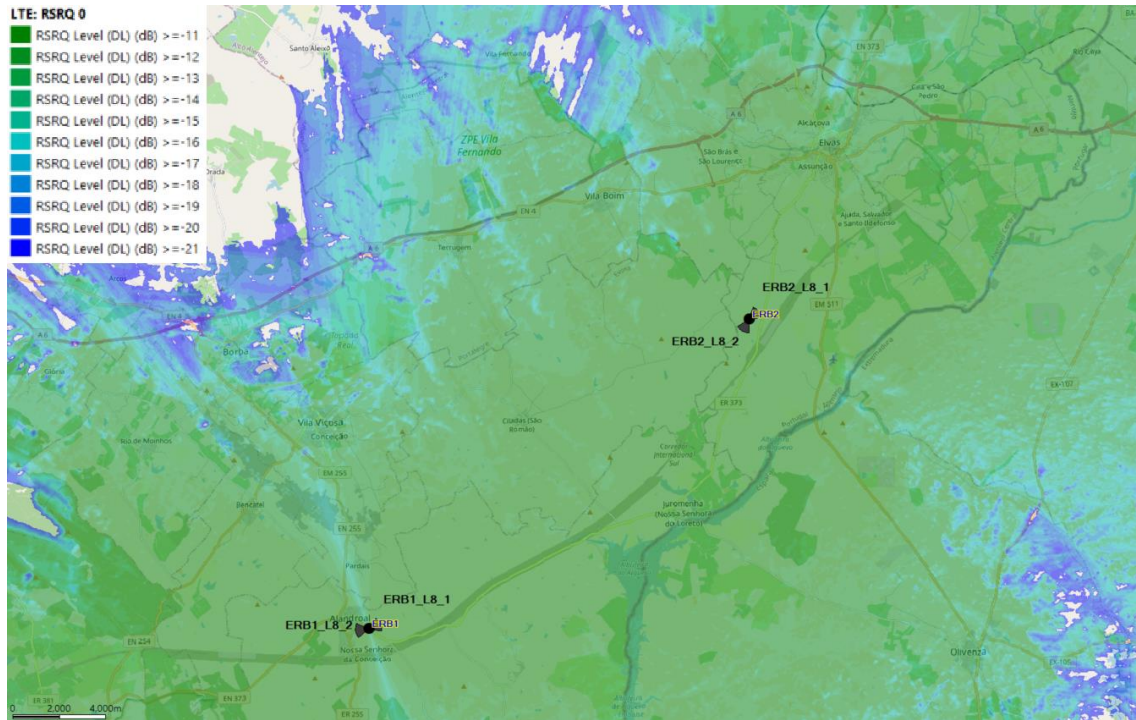


Figura 4.5: Valores de RSRQ obtidos através de simulação [64].

4.4 Cell Throughput

Por fim, foram simulados os valores máximos de *throughput*, em situações rádio ideais e configurações LTE maximizadas, para a área em estudo. Inicialmente apenas para a banda mais prioritária, L800, e de seguida esta em conjunto com a banda L1800, ilustrados na Figura 4.6 e Figura 4.7, respectivamente.

Através dos dados obtidos em simulação na Figura 4.6, é possível verificar que para dispositivos móveis que estejam em áreas servidas apenas pela banda L800 ou que apenas suportem uma CC em *downlink*, quando na área de serviço do sector 2 do ERB1, em condições de rádio ideais, o *throughput* máximo que a rede móvel pode fornecer é de valores próximos de 90 Mbps.

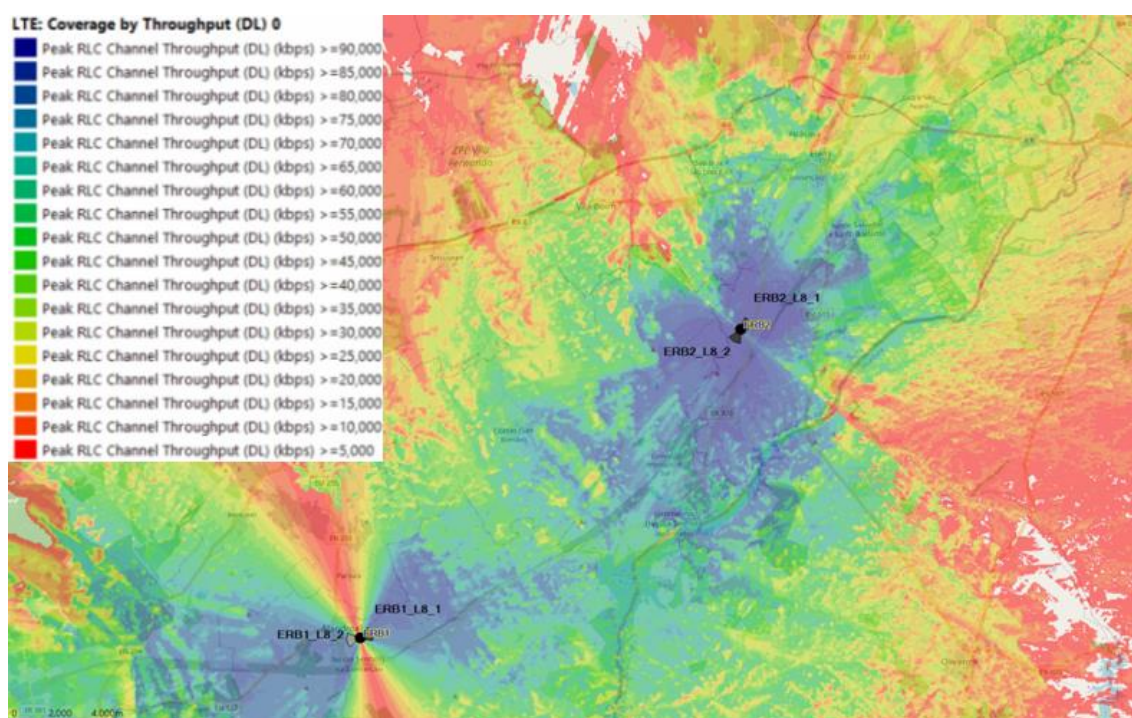


Figura 4.6: Valores de *throughput* para L800 obtidos através de simulação [64].

Posteriormente, simulando em conjunto as bandas L800 e L1800, é possível verificar através dos dados obtidos, ilustrados na Figura 4.7, que em condições ideais de propagação rádio, um dispositivo móvel que suporte *carrier aggregation* e que esteja a ser servido pelo sector 2 da ERB1 poderá usufruir de valores de *throughput* máximos próximos de 565 Mbps.

Tanto os valores de *throughput*, obtidos em simulação, para uma CC (L800) como para duas CC's (L800 e L1800), são inferiores em cerca de 30 Mbps comparativamente aos valores teóricos calculados, descritos na Tabela 3.5. Este facto deve-se principalmente ao factor da velocidade média do dispositivo móvel, cujo valor influencia directamente a qualidade da ligação entre transmissor e receptor, que em ambiente de simulação foi configurada como sendo 120 Km/h. Contudo esta componente para a fórmula teórica do débito binário, descrita em (2.1), não é tida em conta.

Cell	Number	Maximum number	Neighbour	Cause	Relation type
ERB1_L8_1	4	32	ERB1_L8_2	Co-Site	Intra-carrier
			ERB1_L18_2	Co-Site	Inter-carrier
			ERB2_L8_2	Adjacent	Intra-carrier
			ERB2_L8_1	Adjacent	Intra-carrier
ERB1_L8_2	3	32	ERB1_L8_1	Co-Site	Intra-carrier
			ERB1_L18_2	Co-Site	Inter-carrier
			ERB2_L8_2	Adjacent	Intra-carrier
ERB1_L18_2	3	32	ERB1_L8_2	Co-Site	Inter-carrier
			ERB1_L8_1	Co-Site	Inter-carrier
			ERB2_L8_2	Adjacent Layer	Inter-carrier
ERB2_L8_1	2	32	ERB2_L8_2	Co-Site	Intra-carrier
			ERB1_L8_1	Adjacent	Intra-carrier
ERB2_L8_2	4	32	ERB2_L8_1	Co-Site	Intra-carrier
			ERB1_L8_1	Adjacent	Intra-carrier
			ERB1_L18_2	Adjacent Layer	Inter-carrier
			ERB1_L8_2	Adjacent	Intra-carrier

Figura 4.8: Relações de vizinhança da rede planeada [64].

4.6 Análise de Custos

Neste capítulo será feita uma análise aos possíveis custos do projecto.

4.6.1 Antenas

A antena é o último elemento na cadeia de transmissão, estando a performance da rede também dependente desta e da sua interação com o ambiente rádio.

A antena tem como funções básicas:

- Conexão entre o dispositivo móvel e a rede;
- Eliminar interferência através da diversidade da antena;
- Eliminar ruído através da efectividade e do ganho da antena.

Deste modo é imperativo num sistema de telecomunicações escolher a antena a utilizar consoante as suas características, como o ganho ou abertura vertical, garantindo que a potência é transmitida de forma eficiente com o mínimo de perdas.

Tendo em conta que se projectou para a área em estudo duas ERB's, cada uma destas com dois sectores, será necessário instalar nos mesmos as respectivas antenas para transmissão e recepção de sinal. De modo a economizar em custos e logísticas de instalação, foram consideradas apenas antenas *dual-band* (banda dupla) de maneira a que com a mesma antena se consiga transmitir em simultâneo nas bandas LTE800 e LTE1800. Apesar de existirem sectores planeados apenas com a configuração com LTE800, será instalado nas estações rádio base antenas *dual-band* de modo a precaver uma futura expansão de banda nos mesmos.

O custo associado às antenas instaladas encontra-se descritos na Tabela 4.3.

Equipamento	Quantidade	Custo unidade [€]	Custo total [€]
Antena APXVBLL15H_43-C-I20	4	550	2 200

Tabela 4.3: Custos associados às antenas.

4.6.2 Torres Metálicas Auto-suportadas e Cabinet

As torres metálicas auto-suportadas têm uma resistência grande ao vento e por esse motivo a atenuação causada pelo feixe não apontar directamente para o receptor será menor do que utilizando outro tipo de estrutura como torres espiadas. Em (4.2) mostra-se como será o custo da estrutura consoante a sua altura, em metros [63]:

$$C_t = 4000 + 600h, \quad \text{para } 10 \leq h \leq 30 \quad (4.2)$$

De notar que o custo de uma torre metálica auto-suportada é proporcional à sua altura, onde para uma torre com mais de 30 metros este será consideravelmente mais caro do que para torres com alturas inferiores a 30 metros. Por este motivo, será benéfico para o projecto adquirir torres inferiores a 30 metros mas que tenham uma altura suficiente para conseguir anular a atenuação dos obstáculos.

Para o projecto actual considerou-se torres com altura de 10 metros uma vez que o valor das cotas do terreno, onde está feito o planeamento da instalação, são elevadas, estando os seus custos associados descritos na Tabela 4.4.

De modo a armazenar todo o *hardware*, como módulos de rádio, módulos de sistema ou sistema de alimentação de energia, é necessário também instalar junto da torre uma estrutura ou casa de apoio para acomodar os mesmos, podendo ser instalada a cima da terra ou numa zona subterrânea com o objectivo de camuflar a ERB ou devido também a problemas de falta de espaço para a instalação que podem surgir em zonas urbanas.

Equipamento	Quantidade	Custo [€]
Torre metálica auto-suportada 10m	2	20 000
Hardware necessário + casa apoio	2	120 000

Tabela 4.4: Custos associados às torres metálicas auto-suportadas e estrutura de apoio.

4.6.3 Largura de Banda

Tendo em conta a informação em [59] a taxa anual, definida pela ANACOM, associada a cada 1 MHz equivale a 120 mil euros, sendo que esse custo deve ser dividido igualmente entre todas as estações rádio base existentes no país. Uma vez que neste projecto utilizar-se-á duas ERB's e 10 MHz na banda LTE800 e 20 MHz na LTE1800, e tendo em conta que existem cerca de 4 mil ERB's em Portugal, os custos de projecto associados à largura de banda estão descritos na Tabela 4.5:

Largura de Banda Utilizada [MHz]	Custo anual [€]	Custo por ERB [€]	Custo da LB no projecto [€]
30	3 600 000	900	1800

Tabela 4.5: Custos associados à largura de banda.

4.6.4 Custos Finais

Para obter os custos do projecto é necessário calcular os custos totais a longo prazo. Tomou-se como o tempo de vida da tecnologia a implementar 25 anos e sendo assim, é apenas necessário somar os custos fixos aos anuais, considerando uma taxa de inflação de 3%:

$$C_{PROJ} = C_i + \sum_i^{25} (C_{fa}(1 + 0,03)^i) = 209\,795,48 \text{ €} \quad (4.3)$$

4.6.5 Retorno do Projecto

Para calcular o retorno do projecto, teve-se em conta o custo médio de uma chama de 3 min com uma taxa de retorno interno de 8%. Inicialmente calculou-se o período de recuperação do investimento:

$$t_r = \sum_{i=1}^{25} \frac{1}{(1 + t_{ir})^i} = 10,67 \text{ anos} \quad (4.4)$$

Posteriormente calculou-se as receitas do projecto anuais necessárias:

$$t_r = \frac{C_{PROJ}}{r_p} \Leftrightarrow r_p = \frac{209\,795,48}{10,67} = 19\,653,38 \text{ €} \quad (4.5)$$

Com as receitas necessárias para sustentar o projecto é possível então calcular o custo de uma chamada de 3 minutos para o utilizador ao longo do tempo de vida do projecto, sabendo o tráfego médio por canal telefónico ($T_{tel} = 0,2 + 0,02t_{i[anos]}$) [63]:

$$\begin{aligned} r_p &= C_{3min} \times T_{tel} \times N_{ch} \times \frac{365 \times 24 \times 60}{3} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow C_{3min} &= \frac{19\,653,38}{T_{tel} \times 500 \times 175\,200} = \frac{0,00022}{0,2 + 0,02t_i} \end{aligned} \quad (4.6)$$

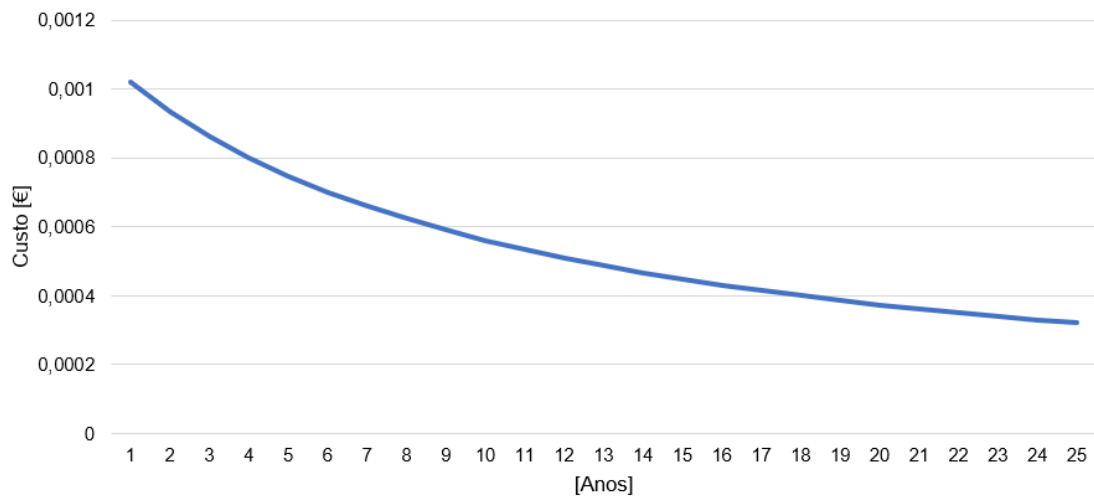


Figura 4.9: Variação do custo médio para o cliente de uma chamada de 3 min ao longo de 25 anos.

Analisando os dados obtidos para o custo médio de uma chamada de 3 minutos, ilustrados na Figura 4.9, verifica-se um custo inicial no primeiro ano de projecto inferior a 1 cêntimo, sendo um valor bastante abaixo quando comparando com os preços praticados hoje em dia no mercado de redes móveis. Tendo em conta o tarifário “M Móvel”, disponibilizado para os clientes da operadora de telecomunicações em Portugal, MEO, que tem um custo mensal de 13,99 € e oferecendo 500 minutos para chamadas de voz, o custo por cada chamada de 3 minutos para este tarifário é aproximadamente de 0.08 cêntimos [67], cerca de oitenta vezes mais quando comparando com o valor obtido de 0,001 €.

Contudo é necessário ter em conta que o custo calculado não teve em conta despesas associadas por exemplo a eletricidade ou manutenção dos equipamentos, o que influenciaria directamente o valor final para os utilizadores.

5. Conclusão

5.1 Conclusões Principais

Com a introdução do LTE existiu uma revolução no mundo das redes móveis, abandonando-se toda a comutação de circuitos, utilizada nas gerações anteriores, e evoluindo para uma rede *all-IP* com maior capacidade e menor latência, sendo possível utilizar diferentes bandas do espectro disponível com diferentes larguras de banda, consoante as necessidades de cada operadora e conseguindo ultrapassar valores de débito binário de 100 Mbps, em *downlink*, e os 50 Mbps, em *uplink*. Desta maneira o uso dos *smartphones* passou a ser rotina na vida da população, ao facilitar a comunicação entre pessoas e devido ao fácil acesso à internet.

O objectivo deste projecto é abordar o estudo e planeamento de uma rede LTE, assim como os seus parâmetros e desempenho. Para isso foram geradas simulações da rede planeada sendo posteriormente analisados e comparados com os valores teóricos. Para a zona de estudo, no Alentejo Norte, não foi apenas tido em conta assegurar uma boa cobertura em toda a área, como também garantir capacidade do sistema de comunicações móveis para assegurar boas *performances* da rede aos utilizadores. Com essa finalidade foram analisados diversos factores que influenciam directamente a *performance* da rede como os esquemas de codificação, modulação, modelos de propagação, frequências, tipo de MIMO ou as características dos equipamentos a utilizar.

Os parâmetros principais que influenciam os valores de *throughput* são o RSRP e RSRQ, tendo garantindo-se um valor de RSRQ, pelos resultados obtidos, de pelo menos -15 dB em toda a extensão da área em estudo, o que garante boas *performances* da rede móvel, verificando-se que nas zonas de fronteira de célula os valores de RSRP já se encontram entre os -100 dBm e -110 dBm, sendo pouco provável conseguir manter uma sessão dados com débitos binários elevados mas em teoria suficiente para conseguir realizar chamadas de voz.

Por outro lado, também os valores de BLER foram analisados, cujo valor não deve ultrapassar 10%, e verificou-se que na zona da área em estudo, este indicador apresenta sempre valores abaixo de 10%, o que assegura poucas retransmissões de modo a manter um débito binário o mais elevado possível.

As simulações obtidas e analisadas no capítulo 4, foram realizadas com o auxílio da ferramenta de planeamento Atoll, em zonas rurais, na região do Alentejo Norte, entre a vila de Alandroal e a fronteira com Espanha, tendo sido planeado a instalação de duas estações rádio base, cada uma com dois sectores, utilizando as bandas LTE 800 (quatro células) e LTE 1800 (uma célula), com larguras de banda de 10 MHz e 20 MHz, respectivamente. Para os valores máximos de débito binário, em condições ideais, obtiveram-se 90 Mbps para a banda LTE 800 e 565 Mbps em *carrier aggregation* entre o LTE 800 e o LTE 1800, garantindo assim um muito bom desempenho da rede móvel. De salientar o grande contributo da técnica de *carrier aggregation* que apenas com duas CC's consegue valores simulados de débitos binários superiores a 500 Mbps. Os valores de débito binário encontram-se bastante próximos dos valores teóricos calculados, sendo ambos menores em cerca de 30 Mbps, o que se pode explicar por diferenças de cálculo entre a *tool* de planeamento e a fórmula teórica utilizada, como é o caso do factor de velocidade do UE tido em

conta aquando das simulações. Apesar da ligeira diferença entre os resultados teóricos calculados e os resultados obtidos, a ferramenta de planeamento mostra-se bastante útil para uma primeira fase do estudo de novas estações rádio base ou optimização das que existam na rede, conseguindo ter-se uma perceção das potências, ganhos ou larguras de banda necessárias.

Ao analisar no geral o trabalho elaborado, é possível destacar o grande conhecimento obtido pela elaboração do mesmo, para além do facto dos objectivos que foram traçados terem sido alcançados, tendo garantido-se que com a tecnologia LTE é possível assegurar boas *performances* na rede móvel.

5.2 Perspetivas de Trabalho Futuro

As redes móveis estão em constante evolução e aperfeiçoamento, sendo que hoje em dia já se encontra em algumas zonas do globo as primeiras estações rádio base 5G a operar. Contudo, em Portugal ainda não houve autorização da parte da ANACOM para disponibilizar a tecnologia 5G aos utilizadores, e daí, este trabalho poderá ser continuado através de um estudo do planeamento rádio entre o LTE e o 5G, dado que as primeiras células da nova tecnologia irão operar no modo NSA (*Non-standalone*), ou seja, irão estar dependentes ainda do LTE. Desse modo seria interessante estudar a iteração entre ambas as tecnologias, os requisitos necessários para a instalação, as *features* LTE novas introduzidas com o lançamento do 5G, assim como também, as características da nova tecnologia, como os débitos binários máximos e a sua latência, e os seus custos de instalação.

Referências

- [1] CISCO, “Cisco Visual Networking Index (VNI)”.
- [2] 3GPP, “LTE”, acessido em Fevereiro 2021.
- [3] QUALCOMM, “*VoLTE with SRVCC: The second phase of voice evolution for mobile LTE device*”, 2012.
- [4] Bradai, A., Singh, K. e Ahmed, T., and Rasheed, T., “*Cellular Software Defined Networking: a Framework*”, 2015.
- [5] 3GPP, “*Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2*”, 2016.
- [6] Sesia, S., Toufik, I. e Baker, M., “*LTE – The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*”, 2009.
- [7] 3GPP, “*LTE; General Packet Radio Service (GPRS) enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) access (3GPP TS 23.401 version 8.4.1 Release 8)*”, 2009.
- [8] 3GPP: Wannstrom, J., “LTE-Advanced”, 2013.
- [9] Stroski, P., “Introdução a MIMO”, 2017.
- [10] 3GPP, “*3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); S1 Application Protocol (S1AP)*”, 2016.
- [11] Nokia: Scaloni, A., “*Minimization of Drive Test (MDT) An Innovative Methodology for Measuring Customer Performance on Mobile Network “The GeoSynthesis Project”*”, 2019.
- [12] Dahlman, E., Parkvall, S., Sköld, J. e Beming, P., “3G Evolution: HSPA and LTE for Mobile Broadband”, 2007.
- [13] Ribeiro, F., “Estudo e Simulação da Camada Física do Padrão IEEE 802.16d”, Janeiro de 2013.
- [14] Schulz, B., “*LTE Transmission Modes and Beamforming*”, Julho de 2015.
- [15] 3GPP, “*LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception (3GPP TS 36.101 version 14.3.0 Release 14)*”, 2017.
- [16] “<http://teletopix.org/4g-lte/lte-mimo-4g-lte/lte-mimo-types-of-inputs-and-outputs>”, acessido em Fevereiro 2021.
- [17] “<https://www.mathworks.com/help/lte/ug/fdd-and-tdd-duplexing.html>”, acessido em Fevereiro 2021.
- [18] RF Wireless World, “<https://www.rfwireless-world.com/Tutorials/LTE-frame-structure.html>”, acessido em Fevereiro 2021.
- [19] “<https://ma-mimo.ellintech.se/2018/06/22/disadvantages-with-tdd>”, acessido em Fevereiro 2021.
- [20] “<https://www.tswireless.com/minimization-of-drive-tests/>”, acessido em Março de 2021.
- [21] Basilashvili, G., “Study of Spectral Efficiency for LTE Network”, Março de 2017.
- [22] Forsk, “Atool RF Planning & Optimisation Software”, Janeiro de 2009.

- [23] Telecompedia, "<https://telecompedia.net/ofdma/>", acessido em Março de 2021.
- [24] Arimas, "<https://arimas.com/2016/04/22/140-lte-radio-interface-overview>", acessido em Março de 2021.
- [25] "https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/35558/35558_3.PDF", acessido em Março de 2021.
- [26] Rysavy Research / 3G Americas, "*HSPA to LTE-Advanced*", Setembro de 2009.
- [27] Westbase.io, "What is LTE-Advanced Pro", Março de 2019.
- [28] CableFree, "<https://www.cablefree.net/wirelesstechnology/4glte/lte-ue-category-class-definitions>", acessido em Março de 2021.
- [29] Oliveira, F., "Rede Celular: Avaliação da Transição de GSM/GPRS para 3G/UMTS", Agosto de 2008.
- [30] Kaur. P., "On The Cell Breathing Technique To Reduce Congestion Applying Bandwidth Limitation", Março de 2012.
- [31] Correia, L., "Propagation Models".
- [32] Yonis, A. e Abdullah, M., "*Downlink and Uplink Physical Channels in Long Term Evolution*", Novembro de 2021.
- [33] Mamman, M., Hanapi, Z., Abdullah, A. e Muhammed, A., "*Quality of Service Class Identifier (QCI) radio resource allocation algorithm for LTE downlink*", Janeiro de 2019.
- [34] Nasimi, M., Hashim, F. e Ng, C., "*Characterizing energy efficiency for heterogeneous cellular networks*", Dezembro de 2012.
- [35] Colibrex, "*Drone as a Flying Spectrum Monitoring Unit for Public & Homeland Security Purposes*", Abril de 2017
- [36] Varela, F., Sebastião, P. e Correia, A., "Unified Propagation Model for Wi-Fi, UMTS and WiMAX Planning in Mixed Scenarios", 2010
- [37] Alcatel-Lucent, "LTE Dimensioning Guidelines - Outdoor Link Budget – FDD", Fevereiro de 2011.
- [38] Infraestruturas de Portugal – Corredor Internacional Sul, "Arranque da Fase de Construção do Troço Évora / Caia", Março de 2018.
- [39] "<https://forum.huawei.com/enterprise/en/pci-confusions-vs-pci-collisions/thread/470163-100305>", acessido em Março de 2021.
- [40] Veríssimo, R., Vieira, P., Rodrigues, A. e Queluz, M., "*PCI Conflict and RSI Collision Detection in LTE Networks Using Supervised Learning Techniques*", 2017.
- [41] Queiroz A. e Silva, E., "*Estudo De Técnicas De Coordenação De Interferência Intercelular No Downlink LTE-A Para Redes Heterogêneas*", Dezembro de 2013.
- [42] Jasim, A. e Mawjoud, S., "*LTE Heterogeneous Network: A Case Study*", Janeiro de 2013.
- [43] Maliswan, S., Milindavanij, D. e Kaewphanuekrungsri, W., "*Quality of Service (QoS) and Quality of Experience (QoE) of the 4G LTE Perspective*", Junho de 2016.
- [44] Pedras, V., "*Identifying Quality of Experience (QoE) in 3G/4G Radio Networks based on Quality of Service (QoS) Metrics*", Novembro de 2017.
- [45] Alexandru, M. and Urechiatu, R., "LTE Indoor Radio Coverage Optimization Study In Modern City Environments", 2014.

- [46] Teleco, “https://www.teleco.com.br/freq4G_mundo.asp”, acessado em Abril de 2021.
- [47] “https://www.rfsworld.com/pim/product/html/APXVBBLL15H_43-C-I20?fbclid=IwAR2S11vNG8JLhpg6C2FYyqYGWKL_-8v0Ww3xIBNZ_-SYKIBNsCL_cjBf4dc”, acessado em Maio de 2019.
- [48] “<https://www.ericsson.com/en/mobility-report/mobility-visualizer?f=1&ft=1&r=2,3,4,5,6,7,8,9&t=8&s=1,2,3&u=1&y=2020,2026&c=1>”, acessado em Abril de 2021.
- [49] “<https://www.anandtech.com/show/14165/the-huawei-p30-p30-pro-reviews-photography-enhanced>”, acessado em Abril de 2021.
- [50] “<https://telecom-knowledge.blogspot.com/p/down-tilt-calculator.html>”, acessado em Abril de 2021.
- [51] “<https://arimas.com/2016/04/24/164-rsrq-to-sinr>”, acessado em Abril de 2021.
- [52] Nsiri, B., Mallouki, N. e Sofien, M., “Novel Scheduling Algorithm for 3GPP Downlink LTE Cellular Network”, Setembro de 2014.
- [53] Pereira, V. e Sousa, T., “Evolution of Mobile Communications: from 1G to 4G”, Julho de 2004.
- [54] Meirmanova, A., “*Mobile Applications And Youth Involvement In Farming*”, Março de 2019.
- [55] Haidine, A., El Hassani, S., Aqqal, A. e El Hannani, A., “The Role of Communication Technologies in Building Future Smart Cities”, Dezembro de 2016.
- [56] “<https://www.ericsson.com/en/mobility-report/mobility-visualizer?f=8&ft=3&r=1&t=8&s=1,3&u=3&y=2011,2020&c=3>”, acessado em Maio de 2021.
- [57] Santos, R., “*História Das Telecomunicações Em Portugal*”, 1999.
- [58] ANACOM, “Serviços Móveis”, 4º trimestre de 2020.
- [59] Ministério das Obras Públicas Transportes e Comunicações, “Portaria nº 1473-A/2008”, Dezembro de 2008.
- [60] Correia, L., “Cellular Networks”.
- [61] Shehu, N. M., “*Coverage and Capacity Improvement in GSM Network*”, 2015.
- [62] Mônica, M., “Sistemas Celulares”, Maio de 2013.
- [63] Nobre, P., “Ligação Por Feixes Hertzianos Entre Malveira da Serra E Santa Iria de Azóia”, Dezembro de 2018.
- [64] Forsk, Atoll, Junho 2021.
- [65] “<https://forum.huawei.com/enterprise/en/what-are-the-differences-between-rsrp-rsrq-rssi-and-sinr/thread/665359-869>”, acessado em Junho de 2021.
- [66] 3GPP, “LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures (3GPP TS 36.213 version 12.3.0 Release 12)”, Outubro de 2014.
- [67] “https://www.meo.pt/aderir/tarifariomovel?utm_source=google&utm_medium=adwords&utm_campaign=unlimited-brand&gclid=Cj0KCQjw8laGBhCHARIsAGIRRYrOxnDI-DEsCYyKFhaYm8dDgaNivuPsEBScm0EJMsbIWdZRULOqBRwaAkgbEALw_wcB”, acessado em Junho de 2021.

Anexo A

Modelos de propagação

A.1 Modelo de propagação Okumara-Hata

Factores de correção do modelo Okumara-Hata [31]

Along and Across street: K_{al} , K_{ac}

$$K_{ac}(d)_{[dB]} = 2.1 \log(d_{[Km]}) - 6.3 \quad (A.1.1)$$

$$K_{al}(d)_{[dB]} = \begin{cases} -2.7 \log(d_{[Km]}) + 8.6, & d \leq 40Km \\ -4 \log(d_{[Km]}) + 10.7, & d > 40Km \end{cases} \quad (A.1.2)$$

Average slope near the base station: $K_{sp}(\theta)$

$$K_{sp}(\theta) = \begin{cases} -0.0025\theta^2_{[mrad]} + 0.204\theta_{[mrad]}, & d < 10Km \\ -0.648\theta^{1.09}_{[mrad]}, & d > 30Km \\ -0.0012\theta^2_{[mrad]} + 0.840\theta_{[mrad]}, & d > 60Km \end{cases} \quad (A.1.3)$$

Terrain undulation: K_{th}

$$K_{th}(\Delta h)_{[dB]} = -3 \log^2(\Delta h_{[m]}) - 0.5(\Delta h_{[m]}) + 4.5 \quad (A.1.4)$$

Position in terrain undulation: $\pm K_{hp}$

$$K_{hp}(\Delta h)_{[dB]} = -2 \log^2(\Delta h_{[m]}) + 16(\Delta h_{[m]}) - 12 \quad (A.1.5)$$

Mixed paths: K_{mp}

$$K_{mp}(\beta)_{[dB]} = \begin{cases} A \begin{cases} -12.4\beta^2 + 27.2\beta, & d > 60Km \\ -8\beta^2 + 19\beta, & d > 30Km \end{cases} \\ B \begin{cases} 11.9\beta^2 + 4.7\beta, & d > 60Km \\ 7.8\beta^2 + 5.6\beta, & d > 30Km \end{cases} \end{cases} \quad (A.1.6)$$

Suburban áreas: K_{su}

$$K_{su}(f)_{[dB]} = 2 \log^2 \left(\frac{f_{[MHz]}}{28} \right) + 5.4 \quad (\text{A.1.7})$$

Open área: K_{oa}

$$K_{oa}(f)_{[dB]} = 4.78 \log^2(f_{[MHz]}) - 18.33 \log(f_{[MHz]}) + 40.9 \quad (\text{A.1.8})$$

Quasi-open areas: K_{qo}

$$K_{qo}(f)_{[dB]} = K_{oa}(f)_{[dB]} - 5 \quad (\text{A.1.9})$$

Standard deviation for urban and suburban áreas: σ_u, σ_{su}

$$\sigma_u(f)_{[dB]} = 0.7 \log^2(f_{[MHz]}) - 2.5 \log(f_{[MHz]}) + 11.1 \quad (\text{A.1.10})$$

$$\sigma_{su}(f)_{[dB]} = 0.98 \log^2(f_{[MHz]}) - 3.4 \log(f_{[MHz]}) + 11.88 \quad (\text{A.1.11})$$

Tipo de percursos:

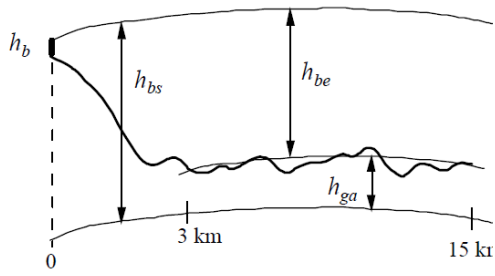


Figura A.1: Elevação do terreno.

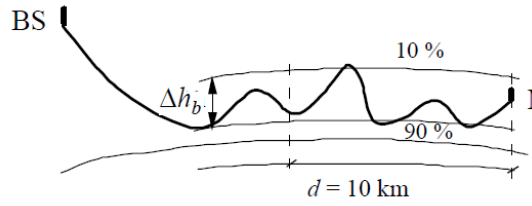


Figura A.2: Terreno rugoso.

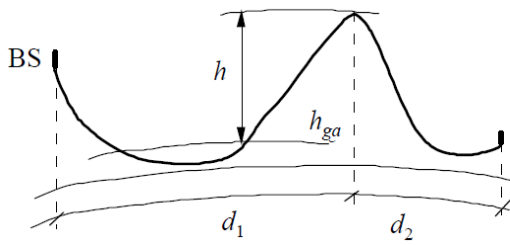


Figura A.3: Presença de obstáculo.

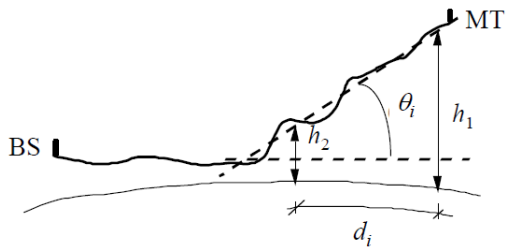


Figura A.4: Elevação do terreno.

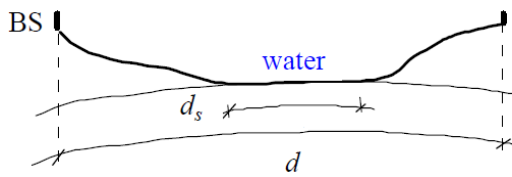


Figura A.5: Superfície aquosa.

Anexo B

B.1 Fichas Técnicas

Ficha Técnica – Smartphone Huawei P30 [49]

Huawei P30 Series			
		P30	P30 Pro
SoC		HiSilicon Kirin 980 2x Cortex-A76 @ 2.60 GHz 2x Cortex-A76 @ 1.92 GHz 4x Cortex-A55 @ 1.80 GHz	
GPU		Mali G76MP10 @ 720MHz	
DRAM		6/8GB LPDDR4X	8GB LPDDR4X
Display		6.1" OLED 2340 x 1080	6.47" OLED 2340 x 1080
Size	Height	149.1 mm	158.0 mm
	Width	71.36 mm	73.4 mm
	Depth	7.57 mm	8.41 mm
Weight		165 grams	192 grams
Battery Capacity		3550mAh Rated 3650mAh Typical	4100mAh Rated 4200mAh Typical
Wireless Charging		-	Qi
Rear Cameras	Main	40MP f/1.8 RYYB sensor 27mm equiv. FL	40MP f/1.6 OIS RYYB sensor 27mm equivl. FL
	Telephoto	8MP f/2.4 3x Optical zoom 80mm equiv. FL	8MP f/3.4 5x Optical Zoom 135mm equivl. FL
	Wide	16MP f/2.2 Ultra wide angle 17mm equivl. FL	20MP f/2.2 Ultra wide angle 16mm equivl. FL
	Extra	-	Time-of-flight sensor

Front Camera	32MP f/2.0	
Storage	128 / 256 (P30 Pro only) + proprietary "nanoSD" card	
I/O	USB-C 3.5mm headphone jack	USB-C
Wireless (local)	802.11ac Wave 2 Wi-Fi Bluetooth 5.0 LE + NFC	
Cellular	Kirin 980 Integrated LTE (Category 21/18) DL = 1400 Mbps 4x4 MIMO 3x20MHz CA, 256-QAM (5CA no MIMO) UL = 200 Mbps 2x2 MIMO 1x20MHz CA, 256-QAM	
Splash, Water, Dust Resistance	IP53 (no water resistance)	IP68 (water resistant up to 1m)
Dual-SIM	2x nano-SIM	

APXVBLL15H_43-C-I20

X-Pol 8-ports Antenna, 1.5m, 690-960/690-960/1695-2690/1695-2690MHz, 65deg,15.3/15.9/18.2/18.3dBi, 2-12deg, Integrated RET

FEATURES / BENEFITS

- 4 ports / 2 cross pol systems in low band (690-960MHz)
- 4 ports / 2 cross pol systems in high band (1695-2690MHz)
- Supports 4x4 MIMO in low band and high band
- Integrated and field replaceable SRET
- ACU HW Version -HRLS170901H1.00 / SW Version -SRLS190802V1.22
- Compliant with AISG V2.0 and 3GPP



Technical features

ELECTRICAL SPECIFICATIONS

Electrical Specification Header		LOW BAND ARRAY (690-960 MHz) [R1]		
Frequency Band	MHz	690 - 806	790 - 894	880 - 960
Gain Typical	dBi	14.2	15.3	15.3
Gain Over all Tilts	dBi	13.7 +/- 0.5	14.4 +/- 0.9	14.8 +/- 0.5
Azimuth Beamwidth 3dB	Deg	62.5 +/- 5	57 +/- 3.5	55 +/- 7.5
Elevation Beamwidth 3dB	Deg	15.6 +/- 1.5	14 +/- 1	12.5 +/- 1
Cross Polar Discrimination at Boresight	dB	21	23	21
Cross Polar Discrimination over Sector	dB	12	11	11
F/B at +/-30deg Total Power	dB	20	21	22
First Upper Side Lobe Suppression	dB	16	18	18
Electrical Downtilt	Deg	2 to 12		
Cross Polar Isolation	dB	25		
Interband Isolation	dB	25		
VSWR	-	1.5		
Passive Intermodulation (3rd Order, 2 x 43dBm)	dBc	-153		
Maximum Effective Power per Port	Watt	250		

ELECTRICAL SPECIFICATIONS

Electrical Specification Header		LOW BAND ARRAY (690-960 MHz) [R2]		
Frequency Band	MHz	690 - 806	790 - 894	880 - 960
Gain Typical	dBi	14.8	15.3	15.9
Gain Over all Tilts	dBi	13.8 +/- 1	14.4 +/- 0.9	14.9 +/- 1
Azimuth Beamwidth 3dB	Deg	62.3 +/- 5.6	56.3 +/- 3.5	53.6 +/- 5
Elevation Beamwidth 3dB	Deg	15 +/- 1.5	13.6 +/- 0.5	12.3 +/- 1
Cross Polar Discrimination at Boresight	dB	18	21	22
Cross Polar Discrimination over Sector	dB	10	10	9
F/B at +/-30deg Total Power	dB	20	22	23
First Upper Side Lobe Suppression	dB	14	18	17
Electrical Downtilt	Deg	2 to 12		
Cross Polar Isolation	dB	25		
Interband Isolation	dB	25		
VSWR	-	1.5		
Passive Intermodulation (3rd Order, 2 x 43dBm)	dBc	-153		
Maximum Effective Power per Port	Watt	250		

ELECTRICAL SPECIFICATIONS

Electrical Specification Header	High Band Array (1695-2690 MHz) [Y1]					
Frequency Band	MHz	1695 - 1880	1850 - 1990	1920 - 2170	2300 - 2400	2490 - 2690
Gain Typical	dBi	17.1	17	18.1	18.2	18.1
Gain Over all Tilts	dBi	16.1 +/- 1	16.5 +/- 0.5	17.1 +/- 1	17.2 +/- 1	17.1 +/- 1
Azimuth Beamwidth 3dB	Deg	69.7 +/- 6.7	65.3 +/- 6.5	61.2 +/- 6	53.7 +/- 5.2	59.1 +/- 6.5
Elevation Beamwidth 3dB	Deg	7.4 +/- 0.5	6.7 +/- 0.5	6.3 +/- 0.5	5.4 +/- 0.5	5 +/- 0.1
Cross Polar Discrimination at Boresight	dB	19.2	24	21	17	18
Cross Polar Discrimination over Sector	dB	4	6	3	3	1
F/B at +/-30deg Total Power	dB	23.2	25	25	25	25
First Upper Side Lobe Suppression	dB	19	20	19	14	17
Electrical Downtilt	Deg	2 to 12				
Cross Polar Isolation	dB	26				
Interband Isolation	dB	28				
VSWR	-	1.5				
Passive Intermodulation (3rd Order, 2 x 43dBm)	dBc	-153				
Maximum Effective Power per Port	Watt	250				

ELECTRICAL SPECIFICATIONS

Electrical Specification Header	High Band Array (1695-2690 MHz) [Y2]					
Frequency Band	MHz	1695 - 1880	1850 - 1990	1920 - 2170	2300 - 2400	2490 - 2690
Gain Typical	dBi	17.2	17.1	18	18.3	18.1
Gain Over all Tilts	dBi	16.2 +/- 1	16.6 +/- 0.5	17 +/- 1	17.3 +/- 1	17.1 +/- 1
Azimuth Beamwidth 3dB	Deg	69.7 +/- 6.5	64.7 +/- 6.9	60.4 +/- 6	52.8 +/- 4.5	58.5 +/- 5.8
Elevation Beamwidth 3dB	Deg	7.4 +/- 0.5	6.8 +/- 0.5	6.3 +/- 0.5	5.4 +/- 0.5	5 +/- 0.1
Cross Polar Discrimination at Boresight	dB	19	21.5	20	16	17
Cross Polar Discrimination over Sector	dB	5	7	4	3	1
F/B at +/-30deg Total Power	dB	23	26	26	25	25
First Upper Side Lobe Suppression	dB	18.7	20	17	16	19
Electrical Downtilt	Deg	2 to 12				
Cross Polar Isolation	dB	26				
Interband Isolation	dB	28				
VSWR	-	1.5				
Passive Intermodulation (3rd Order, 2 x 43dBm)	dBc	-153				
Maximum Effective Power per Port	Watt	250				

ELECTRICAL SPECIFICATIONS

Impedance	Ohm	50
Polarization	Deg	±45°

MECHANICAL SPECIFICATIONS

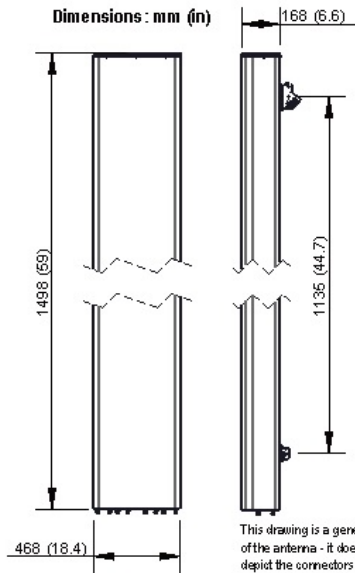
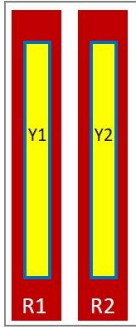
Dimensions - H x W x D	mm (in)	1498 x 468 x 168 (59 x 18.4 x 6.6)
Weight (Antenna Only)	kg (lb)	24.5 (54)
Weight (Mounting Hardware only)	kg (lb)	4.5 (9.9)
Packing size- HxWxD	mm (in)	1698 x 563 x 288 (66.9 x 22.2 x 11.3)
Shipping Weight	kg (lb)	32 (70.5)
Connector type		8 x 4.3-10 female/bottom + 2 AISG connectors (1 male, 1 female)
Radome Material / Color		Fiber Glass / Light Grey RAL7035

TESTING AND ENVIRONMENTAL

Temperature Range	°C (°F)	-40 to 60 (-40 to 140)
Lightning protection		Direct Ground
Survival/Rated Wind Velocity	km/h	200 (150)
Wind Load @Rated Wind Front	N	717
Wind Load @Rated Wind Side	N	179
Wind Load @Rated Wind Rear	N	912
Survival wind Velocity	km/h	200

ORDERING INFORMATION

Order No.	Configuration	Mounting Hardware	Mounting pipe Diameter	Shipping Weight
APXVBLL15H_43-C-I20	Internal RET(ACU-I20- H12B)	APM50-H2	50-125mm	32.0 Kg



Ficha Técnica – FLPMDK triple band 700/800/900 dual MHA

Especificações do FLPMDK em *uplink*:

Parameter	Details		
	700 MHz	800 MHz	900 MHz
RX frequency range [MHz]	703-733	832-862	880-915
Nominal gain [dB]	12 +/- 1.0		
Passband ripple [dB]	≤ 1.0		
Typical Insertion Loss, Bypass mode [dB]	2.2		
Group Delay Distortion	≤ 30 ns/any 180 kHz	≤ 90 ns/any 3.84 MHz	
Return Loss [dB]	≥ 16		
Bypass Return Loss [dB]	12		
Typical noise figure [dB]	1.4		
Maximum noise figure [dB]	2.5		
PIM Rx band (2 x 43 dBm carrier) [dBm]	≤ -117 dBm		
Input 1 dB gain compression [dBm]	> -5		
IIP3 [dBm]	> 10		
Input power at ANT port without damage [dBm]	> 10		

Especificações do FLPMDK em *downlink*:

Parameter	Details		
	700 MHz	800 MHz	900 MHz
TX Frequency Range [MHz]	758-788	791-821	925-960
Typical TX insertion loss [dB]	0.5		
Group Delay Distortion	700 and 800 MHz: ≤ 30 ns/any 180 MHz 900 MHz: ≤ 90 ns /any 3.84 MHz		
Return Loss [dB]	≥ 18		
Continuous RMS power [dBm]	+52.5 (180 W)		
Peak power [dBm]	+60 (1000 W)		
Isolation between ports [dB]	≥ 50		

Anexo C

C.1 Localização e orientação das antenas

A orientação dos azimutes das antenas que compõem a rede projectada foi efectuada de modo a garantir uma continuidade de cobertura em toda a área em estudo, chegando-se aos seguintes valores:

- Estação rádio base 1 – ERB1:
 - Latitude: 38.700476° ;
 - Longitude: -7.393485° ;
 - Elevação: 381m;
 - Azimutes:
 - Sector 1: 65° ;
 - Sector 2: 260° ;
- Estação rádio base 2 – ERB2:
 - Latitude: 38.815350° ;
 - Longitude: -7.206626° ;
 - Elevação: 326m;
 - Azimutes:
 - Sector 1: 50° ;
 - Sector 2: 210° .

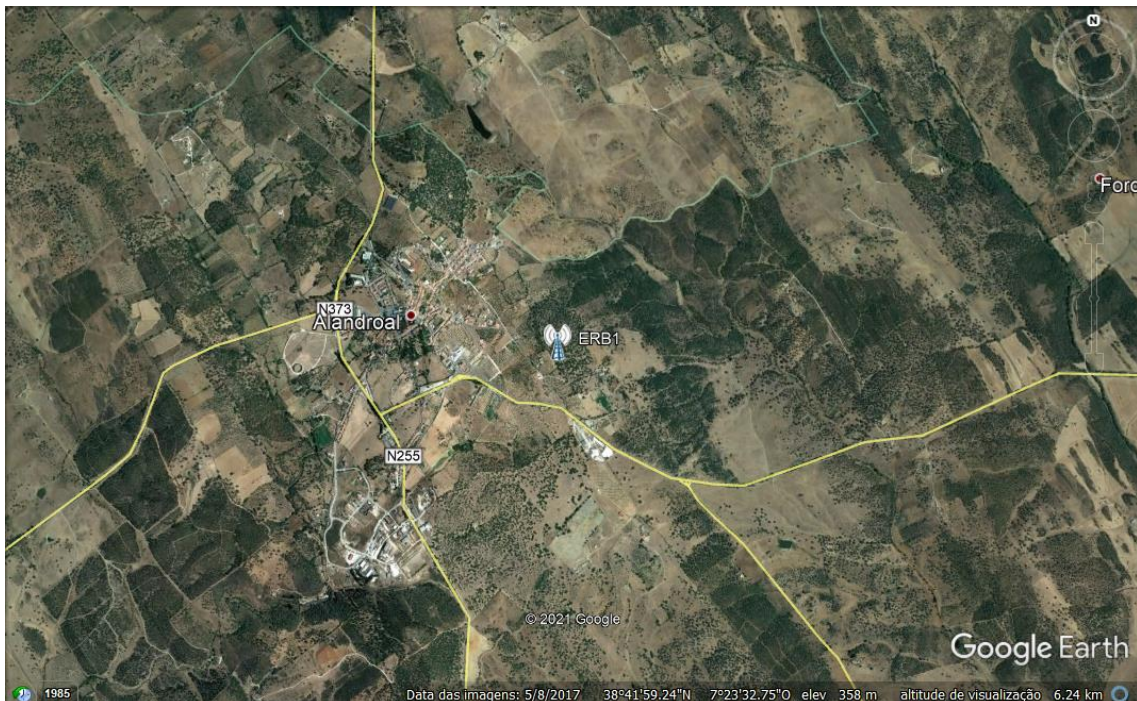


Figura C.1: Localização ERB1.

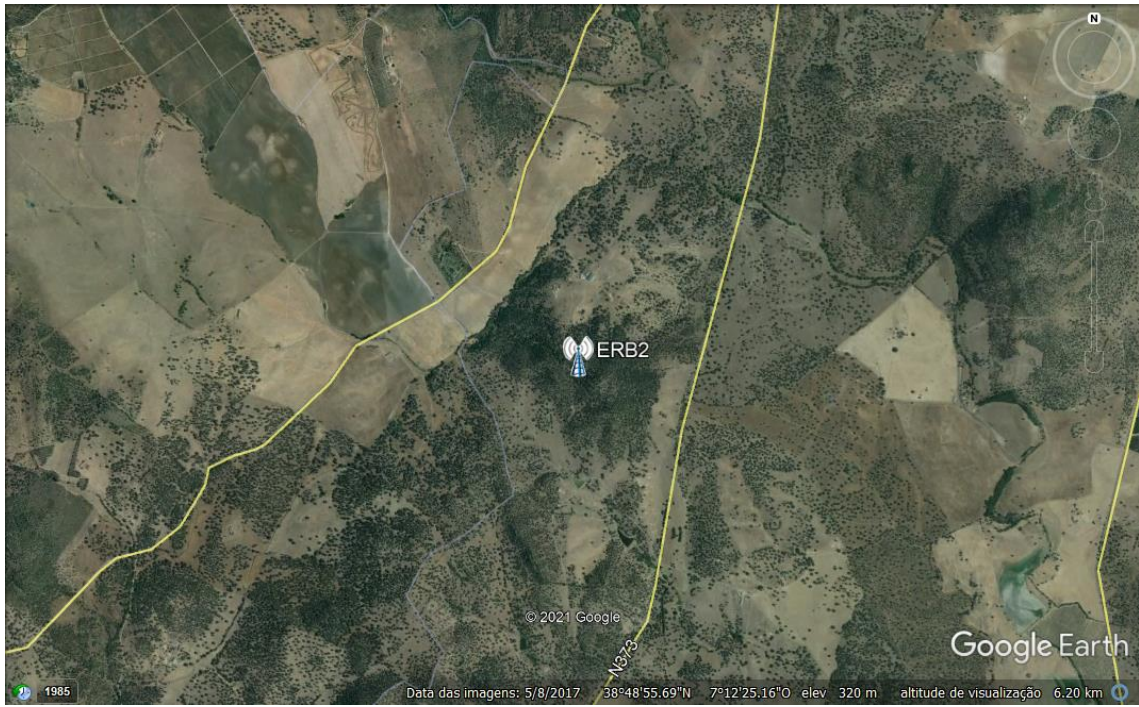


Figura C.2: Localização ERB2.

Anexo D

D.1 Parâmetros configurados na ferramenta de planeamento Atoll

Name	Duplexing Method	TDD: Start Frequency, FDD: DL Start Frequency (MHz)	FDD: UL Start Frequency (MHz)	Channel Width (MHz)	Number of PRBs
LTE08	FDD	791	832	10	50
LTE18	FDD	1,805	1,710	20	100

Figura D.1: Definição de bandas LTE utilizadas.

Index	Name	Priority (0:lowest)
0	LTE08	1
1	LTE18	0

Figura D.2: Definição das prioridades das bandas LTE utilizadas.

Name	Noise Figure (dB)	Reception gain (dB)	Transmission losses (dB)
FLPMDK triple band 700/800/900 dual MHA	2.5	12	0.5

Figura D.3: Definição das características do MHA utilizado.