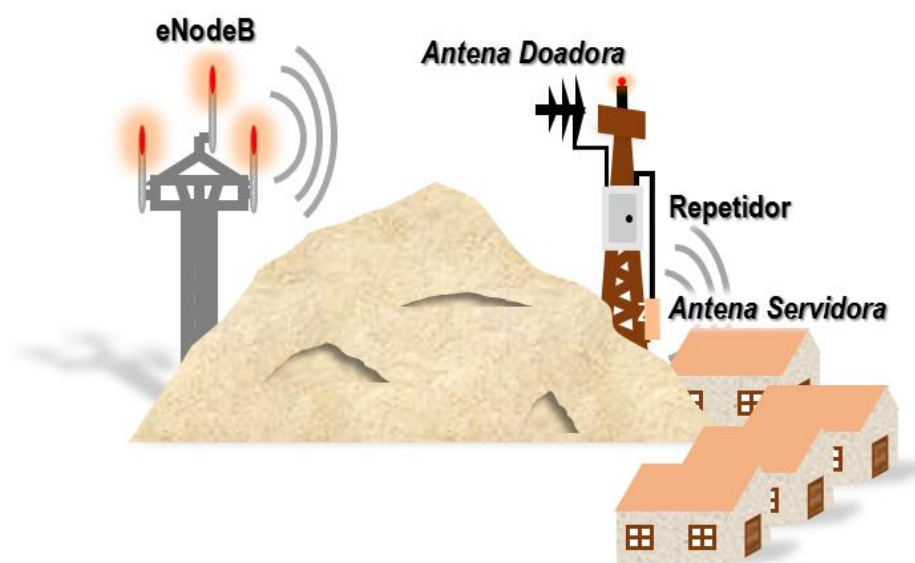


INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia de Electrónica e
Telecomunicações e de Computadores



Planeamento de rede LTE de baixo custo com uso de Repetidor

Claudina Silva Borges

Licenciada em Engenharia Electrotécnica e das Telecomunicações

Trabalho Final de Mestrado para Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de
Electrónica e Telecomunicações

Orientador:

Professor Doutor António João Nunes Serrador

Júri:

Presidente: Professora Doutora Maria Manuela Almeida Carvalho Vieira

Vogal Arguente: Professor Doutor Pedro Manuel de Almeida Carvalho Vieira

Fevereiro 2015

Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço a Deus por me ter dado a força de vontade para levar este trabalho até ao fim.

Agradeço ao meu orientador Professor Doutor António Serrador pela reunião semanal. Pela sua disponibilidade, paciência e orientação desde primeiro dia, na escolha do tema da dissertação e ao longo do desenvolvimento da mesma.

À ATDI *advanced radio communications* e à sua equipa pela disponibilização do *software* de planeamento *ICS designer* e pelo suporte, que foi fundamental na realização deste trabalho.

Agradeço a Associação de Reguladores de Comunicações e Telecomunicações da Comunidade dos Países de Língua Portuguesa (ARCTEL-CPLP) pela disponibilidade demonstrada em ajudar na realização deste trabalho.

A Agencia Nacional das Comunicações de Cabo Verde (ANAC) pela disponibilidade e vontade de ajudar na realização desta dissertação.

Aos meus pais, por, a partir de tão pouco, terem feito tanto por mim mesmo estando longe.

Ao Amilton Tavares pela enorme compreensão, companheirismo, paciência e ajuda que deu e que toda a diferença fez nos momentos mais difíceis.

A todos aqueles que não foram mencionados acima mas que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho.

Resumo

Apesar da tecnologia 3G ainda ser recente em Cabo Verde, está para breve a implementação da tecnologia 4G. A crescente procura pelos serviços de banda larga móvel e acesso aos dados por parte dos utilizadores, faz com que os operadores estejam constantemente a investir no aumento de capacidade suportada pelas redes móveis.

Uma vez que Cabo Verde é um país insular e montanhoso e com baixa densidade populacional, a implementação de uma nova tecnologia de rede exige grande dispêndio de recursos (várias estações base) de forma a garantir uma boa cobertura do sinal.

Cabo Verde é um país com recursos limitados, para garantir uma boa cobertura em todas áreas, no planeamento 4G, são considerados repetidores. Com o uso de repetidores, o custo de implementação da rede seria reduzida consideravelmente uma vez que serão precisas menos estações base. Uma boa cobertura pode ser possível, já que os repetidores "compensariam" perdas de sinal causadas pelas montanhas.

A configuração da estação base será aquela que garante a capacidade para satisfazer o tráfego dos utilizadores. A utilização de repetidores e as suas respetivas localizações serão definidas de forma a garantir a melhor cobertura possível do sinal.

Depois de efetuar o cálculo teórico de capacidade, da cobertura, do débito binário e SINR, da estação base e do repetidor, recorreu-se à ferramenta de planeamento LTE *ICS designer*, para simular a rede sem e com o repetidor. No cenário sem repetidor, uma cobertura de 82% (de área) foi conseguida, com apenas uma estação base. Cerca de 87% dos utilizadores (6088 dos 7000) são cobertos.

Depois de simular a rede, foram analisados os resultados do débito binário, SINR e do *throughput* com e sem repetidor. Melhores resultados (aumento no débito binário) foram alcançados com a utilização de repetidores e, desta forma, os utilizadores na fronteira da célula são cobertos com uma percentagem de cobertura de 99%.

Palavras-chave: LTE, Planeamento, Repetidor, Capacidade, Cobertura.

Abstract

Although 3G technology still recent in Cabo Verde, 4G is planned to be implemented. The growing demand for mobile broadband and data access services by users, means that operators are constantly investing in increased capacity supported by mobile networks.

Since Cabo Verde is an island country and mountainous and sparsely populated areas, the implementation of a new network technology requires great expenditure of resources (several base stations) to ensure a good signal coverage.

Since Cabo Verde is a country with limited resources, to ensure good coverage in all areas, in 4G planning, repeaters are considered. With use of repeaters, the cost of implementing the network would be considerably reduced since less base stations will be needed. A good cover can then be possible, since repeaters can overcome coverage difficulties caused by mountains.

The configuration of the base station is one that ensures the capacity to meet the traffic of users. The use of repeaters and their respective locations will be defined to ensure the best possible signal coverage.

After making the theoretical calculation of capacity, coverage, bit rate and SINR of base station and repeater a LTE planning tool ICS designer is used to simulate the network with and without repeater. The scenario without repeater, a coverage of 82% was achieved with only one base station. About 87% of users (6088 of 7000) are covered.

After simulating network, were analyzed the results of bit rate, SINR and throughput with and without repeater. Best results (increased bit rate) were achieved with the use of repeaters and thus the users in the cell boundary are covered with a percentage of 99% coverage.

Keywords: LTE, Planning, Repeater, Capacity, Coverage.

Índice Geral

Agradecimentos.....	i
Resumo	iii
Abstract	v
Índice Geral	vii
Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas	xi
Lista de Símbolos	xiii
Lista de Siglas e Acrónimos	xvii
Capítulo 1	1
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Evolução histórica das Redes Móveis em Cabo Verde.....	2
1.3. Objetivos	2
1.4. Organização do relatório	3
Capítulo 2	5
2. Estado da Arte	5
2.1. Long Term Evolution	5
2.2. Arquitetura da Rede LTE.....	6
2.3. Acesso Rádio em LTE.....	12
2.3.1. Orthogonal Frequency Division Multiple Access.....	12
2.3.2. Single Carrier Frequency Division Multiple Access	14
2.3.3. Canais lógicos, de transporte e físicos em LTE	16
2.3.4. Soluções de Antenas LTE	19
2.3.5. Ambientes de propagação	23
2.4. Conceitos gerais sobre Repetidores	24
2.4.1. Tipos de Repetidores LTE	26
2.4.2. Isolamento de antena	28
Capítulo 3	31
3. Planeamento Celular em Redes LTE	31

3.1.	Processo de planeamento em rede LTE	31
3.2.	Qualidade de serviço.....	33
3.3.	Planeamento por Cobertura	34
3.3.1.	LTE Link Budget no uplink.....	35
3.3.2.	LTE Link Budget no downlink	41
3.3.3.	Modelo de Propagação.....	46
3.3.4.	Área de cobertura.....	50
3.4.	Planeamento por Capacidade.....	51
3.4.1.	Capacidade em uplink	52
3.4.2.	Capacidade em Downlink.....	54
3.5.	Planeamento de Frequência	55
3.6.	Planeamento de <i>Physical Layer Cell Identities</i>	59
3.7.	Localização do Repetidor.....	62
3.8.	Dimensionamento do Repetidor.....	64
3.9.	Ferramenta de Simulação – <i>ICS Designer</i>	66
Capítulo 4	73
4.	Análise de Resultados	73
4.1.	Planeamento LTE com uso de Repetidor.....	73
4.2.	Definição dos cenários.....	81
4.2.1.	Análise dos resultados em cenários com eNodeB.....	82
4.2.2.	Cobertura com Repetidores nas áreas de sombra	94
Capítulo 5	105
5.	Conclusões.....	105
Bibliografia	107
ANEXOS	111
A.	Tabela do <i>SNIR vs Throughput</i>	111
B.	Bandas de Frequência no LTE	113
C.	Distribuição dos utilizadores ao longo da rede	116
D.	Parâmetros Tx/Rx.....	119
E.	<i>Datasheet</i> da antena utilizada no eNodeB ‘80010303’	123
F.	<i>Datasheet</i> do repetidor LTE.....	124

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Arquitetura de Rede do sistema LTE (adaptado de [3]).....	7
Figura 2.2 – OFDMA no domínio do tempo e da frequência (extraído de [7]).	12
Figura 2.3 – Definição do bloco de recurso no domínio do tempo (adaptado de [8]).....	13
Figura 2.4 – Extensão cíclica de um símbolo OFDM (adaptado de [3]).....	14
Figura 2.5 – Estrutura do SC – FDMA vs. OFDMA (adaptado de [7]).	14
Figura 2.6 – Mapeamento de canais (adaptado de [10]).....	16
Figura 2.7 – Sistemas de acesso de múltiplas antenas (adaptado de [11]).....	19
Figura 2.8 – Princípio MIMO para uma configuração de duas antenas (extraído de [3]).	20
Figura 2.9 – Exemplo do mapeamento dos sinais de referência de <i>DL</i> (extraído de [12]).....	21
Figura 2.10 – Princípio MIMO para múltiplos utilizadores (adaptado de [3]).....	22
Figura 2.11 – Exemplo da aplicação de repetidor para cobertura (direita) e capacidade (esquerda), (adaptado de [15]).	25
Figura 2.12 – Diagrama de bloco do repetidor (adaptado de [14]).	26
Figura 2.13 – Isolamento entre antenas do repetidor.....	29
Figura 3.1 – Processo de planeamento em rede LTE.....	32
Figura 3.2 – Fluxograma do dimensionamento de cobertura em LTE.....	34
Figura 3.3 – Modelo do <i>Link Budget</i> em UL (Adaptado de [18]).....	36
Figura 3.4 – Modelo do <i>Link Budget</i> em DL (adaptado de [18]).	42
Figura 3.5 – ISD e área do <i>eNodeB</i> (extraído de [19]).	50
Figura 3.6 – Diferentes esquemas de <i>inter-cell interference coordination</i> [24].	56
Figura 3.7 – Exemplo do planeamento de frequências (extraído de [11]).....	57
Figura 3.8 – Divisão de largura de banda.....	57
Figura 3.9 – Divisão da largura de banda utilizada.....	58
Figura 3.10 – Localização de RS dentro de um RB para diferentes PCIs ([27]).	60
Figura 3.11 – Planeamento da PCI no ICS designer.....	61
Figura 3.12 – Exemplo da Distribuição da taxa de dados ao longo da célula [28].	63
Figura 3.13 – Ligação entre eNodeB-RN e RN-UE.....	64
Figura 3.14 – Organização das camadas do projecto [15].	66
Figura 3.15 – Janela do Project Manager no ICS designer.....	67
Figura 3.16 – Fluxograma geral do LTE no ICS designer [15].....	68
Figura 3.17 – Modelos de Propagação disponível no ICS designer [15].	69
Figura 3.18 – Opção Monte Carlo no ICS designer.....	70
Figura 3.19 – Opção para exportar as configurações da rede.....	71

Figura 3.20 – Opção para exportar o ficheiro para o GE.....	71
Figura 3.21 – Janela que permite definir os intervalos de valores.....	72
Figura 4.1 – Área do planeamento em Cabo Verde.....	73
Figura 4.2 – SINR em função da distância do eNodeB	78
Figura 4.3 – Débito binário teórico por utilizador em função da SINR do eNodeB.....	78
Figura 4.4 – <i>Throughput</i> da estação base em função da Largura de banda.	79
Figura 4.5 – SINR em função da taxa de código.....	80
Figura 4.6 – Eficiência espectral em função do tipo de modulação.....	80
Figura 4.7 – Posicionamento geográfico do eNodeB no GE.	82
Figura 4.8 – Esquema de percurso do FSR e da Potência Recebida.....	83
Figura 4.9 – Nível de sinal recebido, apresentado no GE.	84
Figura 4.10 – Variação da potência recebida ao longo da área de cobertura.....	85
Figura 4.11 – Nível de cobertura RSRP do eNodeB.	86
Figura 4.12 – Comparação entre RSRQ e RSRP.	88
Figura 4.13 – Mapa da cobertura da SINR do eNodeB.....	89
Figura 4.14 – Relação do <i>Throughput</i> por RB vs SINR.....	90
Figura 4.15 – Variação do <i>Throughput</i> por RB vs. Distância em cada sector.....	91
Figura 4.16 – Bit Rate por sector em DL.....	91
Figura 4.17 – Percentagem da área coberta pelo eNodeB.	92
Figura 4.18 – Utilizadores ligados à estação base.	93
Figura 4.19 – Fluxograma da decisão do uso do repetidor.	94
Figura 4.20 – Débito binário do repetidor em função do número de utilizadores.....	95
Figura 4.21 – SINR vs. Débito binário do repetidor.	96
Figura 4.22 – Localização dos repetidores no GE de acordo com o SINR.....	98
Figura 4.23 – Nível de Potência recebida com o uso do Repetidor.....	99
Figura 4.24 – Percentagem de cobertura após a instalação do repetidor.	100
Figura 4.25 – Nível de sinal <i>RSRP</i> com o uso do Repetidor.	100
Figura 4.26 – Nível de SINR com o uso do Repetidor.....	101
Figura 4.27 - Débito binário dos sectores e dos repetidores.	102
Figura 4.28 – <i>Throughput</i> dentro da área de cobertura usando antena 2x2 MIMO.	102

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Restantes interfaces do Plano do utilizador e de controlo (adaptado de [3]).	11
Tabela 2.2 – Parâmetros OFDM para o esquema de transmissão no DL, para cada LB do canal (adaptado de [9]).	15
Tabela 2.3 – Classes do UE no LTE (extraído de [9]).	16
Tabela 2.4 – Classes dos repetidores LTE, (extraído de [11]).	28
Tabela 3.1 – Exemplo do parâmetro F para sites tri-sectorizadas com 30 m de altura [8].	38
Tabela 3.2 – Parâmetros Semi – Empírico a_0 , a_1 , a_2 e a_3 para UL [8].	39
Tabela 3.3 – Margem de desvanecimento para diferentes valores de desvio padrão (extraído de [8]).	40
Tabela 3.4 – Perdas de penetração (adaptado de [20]).	41
Tabela 3.5 – Parâmetros de configuração do UE.	41
Tabela 3.6 – Parâmetro F_c no limite da célula variando o <i>tilt</i> (extraído de [8]).	44
Tabela 3.7 – Parâmetro Semi – Empíricas a_1 , a_3 , $a_{2,max}$ e $a_{0,max}$ no DL [8].	46
Tabela 3.8 – Atenuação A baseando no modelo de Okumura-Hata (adaptado de [8]).	48
Tabela 3.9 – Equação para o cálculo da área do site e distância entre sites.	50
Tabela 3.10 – Características principais da área de cobertura.	52
Tabela 3.11 – Sub-bandas de frequência [791 – 862] MHz.	58
Tabela 3.12 – Frequência atribuída a cada sector.	59
Tabela 3.13 – PCI e os Parâmetros associados ao PCI, (adaptado de [26] [[25]]).	60
Tabela 3.14 – PCIs atribuídas a cada sector do eNodeB.	62
Tabela 4.1 – Resultado do <i>Link Budget</i> no UL.	74
Tabela 4.2 – Resultado do <i>Link Budget</i> no DL.	75
Tabela 4.3 – Resultado do cálculo do tráfego dos utilizadores.	76
Tabela 4.4 – Resultado do cálculo da Capacidade em UL.	76
Tabela 4.5 – Resultado do cálculo da Capacidade em <i>DL</i> .	77
Tabela 4.6 – Parâmetros de configuração do eNodeB.	81
Tabela 4.7 – Localização do eNodeB no mapa.	82
Tabela 4.8 – Tráfego oferecido por cada sector.	92
Tabela 4.9 – Percentagem de cobertura por sector.	93
Tabela 4.10 – Débito binário e SINR do repetidor.	95
Tabela 4.11 – Resultados de simulação no ponto de localização do repetidor.	97
Tabela 4.12 – Coordenadas geográficas da localização dos Repetidores.	97
Tabela 4.13 – Especificação técnica do Repetidor.	98

Lista de Símbolos

γ_{target}	Relação sinal ruído mais interferência no <i>UL</i>
θ	<i>Tilt</i>
θ_{eq}	<i>Tilt</i> equivalente
A	Parâmetro de atenuação
BW	Largura de banda
BW_{RB}	Largura de banda por RB (180 kHz)
B_{LNF}	Margem de desvanecimento log-normal
d	Raio da célula
$EIRP_{DL}$	<i>Effective Isotropic Radiated Power</i> no <i>DL</i>
$EIRP_{UL}$	<i>Effective Isotropic Radiated Power</i> no <i>UL</i>
F_c	Razão entre a potência recebida
G_a	Soma dos ganhos máximos na direção de propagação do eNodeB-UE
G_{amp}	Ganho do amplificador
G_{eNB}	Ganho do eNodeB
G_{Colet}	Ganho da antena coletora
G_{Rep}	Ganho do repetidor
G_{Serv}	Ganho da antena Servidora
H	Corresponde ao factor de atenuação média
h_{eNB}	Altura da antena do eNodeB
h_{UE}	Altura da antena do <i>UE</i>
IM_{UL}	Margem de interferência no <i>UL</i>
IM_{DL}	Margem de interferência em <i>DL</i>
K	Constante <i>Boltzmann's</i>
L_{BL}	Perdas devido ao corpo humano
L_{BPL}	Perdas por penetração em edifícios
L_{CPL}	Perdas por penetração nos carros
L_{eNB_RN}	Perdas na ligação <i>backhaul</i>
L_j	Perdas dos <i>jumpers</i> e de inserção do TMA
L_{RN_UE}	Perdas na ligação <i>access</i>
L_s	Somatórios das perdas em <i>UL</i>

L_{range}	Perda do sinal no limite da célula
$MAPL_{UL}$	Atenuação de propagação máxima em UL
Mgs	Soma das Margens
n_{ant}	Tipo de antena
N_{eNB}	Número de eNodeB
N_{fUE}	Figura do ruído do recetor UE
n_{User}	Corresponde ao número de utilizador a ser servido pelo repetidor
n_{PDCCH}	Número de símbolos alocados para $PDCCH$
n_{RB}	Número de <i>Resorce Block</i>
$N_{RB,DL}$	Ruído térmico por RB em DL
$N_{RB,UL}$	Ruído térmico por RB em UL
N_t	Densidade do ruído térmico (-174 dBm/Hz)
$P_L(LOS)$	Perdas de propagação em LOS
$P_L(NLOS)$	Perdas de propagação em $NLOS$
P_{RxeNB}	Potência recebida no eNodeB
P_{RxUE}	Potência recebida no UE
$P_{TxUE, RB}$	Potência de utilizador por RB
P_{Tx,max_UE}	Potência de transmissão do UE
$P_{txeNB, RB}$	Potência de emissão por RB no ponto de referência do sistema
Q_{DL}	Carga do sistema no DL
$R_{avg, UL}$	Débito binário médio por utilizador por célula no UL
R_{bRN}	Débito binário do repetidor
$R_{breq, RB}$	Débito binário mínimo por RB
R_{breq}	Débito binário requerido
$R_{RB, UL}$	Débito binário por RB
S_{eNB}	Sensibilidade do eNodeB
S_{UE}	Sensibilidade do móvel
$SINR_{DL}$	Relação sinal ruído mais interferência no DL
$SINR_{RN}$	Relação sinal ruído mais interferência do repetidor
$SINR_{UL}$	Relação sinal ruído mais interferência no UL
T	Temperatura do recetor em graus Kelvin.
T_{cell}	Capacidade média da célula

$T_{D_{User}}$	Tráfego diário por utilizador
T_{site}	Capacidade do <i>site</i>
T_{total}	Tráfego total
T_U	Tráfego mensal por utilizador
U	Utilizador

Lista de Siglas e Acrónimos

3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
AMC	<i>Adaptive Modulation and Coding</i>
ANAC	<i>Agencia Nacional das Comunicações de Cabo Verde</i>
ANRF	<i>Automatic Neighbour Relation Function</i>
ARCTEL-CPLP	<i>Associação de Reguladores de Comunicações e Telecomunicações da Comunidade dos Países de Língua Portuguesa</i>
BBERF	<i>Bearer Binding and Event Reporting Function</i>
CapEx	<i>Capital Expenditure</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CP	<i>Cyclic Prefix</i>
CP	<i>Control Plane</i>
DL	<i>Downlink</i>
EDGE	<i>Enhanced Data rates for Global Evolution</i>
EIRP	<i>Effective Isotropic Radiated Power</i>
eNodeB	<i>Evolved NodeB</i>
EPC	<i>Evolved Packet Core</i>
EPS	<i>Evolved Packet System</i>
E-UTRAN	<i>Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FSC	<i>Field Strength Coverage</i>
FSR	<i>Field Strength Received</i>
GE	<i>Google Earth</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
HSS	<i>Home Subscriber Server</i>
IMSI	<i>International Mobile Subscriber Identity</i>
IMT-A	<i>International Mobile Telecommunications-Advanced</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>

KPI	<i>Key Performance Indicator</i>
LB	<i>Largura de Banda</i>
LOS	<i>Line Of Sight</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MAPL	<i>Maximum Acceptable Path Loss</i>
MME	<i>Mobility Management Entity</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
MISO	<i>Multiple Input Single Output</i>
MSSR	<i>Minimum Signal Strength Required</i>
NLOS	<i>Non-Line Of Sight</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
OpEx	<i>Operational Expenditure</i>
PC	<i>Percentagem de Cobertura</i>
PCI	<i>Physical Layer Cell Identities</i>
PCC	<i>Policy and Charging Control</i>
PCEF	<i>Policy and Charging Enforcement Function</i>
PCRF	<i>Policy and Charging Resource Function</i>
PDN	<i>Packet Data Network</i>
P-GW	<i>PDN Gateway</i>
PL	<i>Path Loss</i>
PSS	<i>Primary Synchronization Signal</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QoS	<i>Quality Of Service</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
RB	<i>Resource Block</i>
RE	<i>Resource Element</i>
RN	<i>Repeater Node</i>
RRC	<i>Radio Resource Control</i>
RRM	<i>Radio Resource Management</i>
RS	<i>Reference Signals</i>
RSRP	<i>Reference Signal Receive Power</i>
RSRQ	<i>Reference Signals Receive Quality</i>
RSSI	<i>Received Signal Strength indicator</i>

SAE	<i>System Architecture Evolution</i>
SC-FDMA	<i>Single Carrier Frequency Division Multiple Access</i>
SCTP	<i>Stream Control Transmission Protocol</i>
SFBC	<i>Space-Frequency Block Codes</i>
SGSN	<i>Serving GPRS Support Node</i>
S-GW	<i>Serving Gateway</i>
SINR	<i>Signal to Interference and Noise Ratio</i>
SIMO	<i>Single Input Multiple Output</i>
SISO	<i>Single Input Single Output</i>
SSS	<i>Secondary Synchronization Signal</i>
TD - SCDMA	<i>Time Division Synchronous Code Division Multiple Access</i>
TTI	<i>Transmission Time Interval</i>
UE	<i>User Equipment</i>
UL	<i>Uplink</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunication System</i>
UP	<i>User Plane</i>
UTRAN	<i>Universal Terrestrial Radio Access Network</i>
VoIP	<i>Voice over IP</i>
WCDMA	<i>Wideband Code Division Multiple Access</i>
X2-AP	<i>X2- Application Protocol</i>

Capítulo 1

1. Introdução

As operadoras de redes celulares móveis têm visto um crescimento contínuo no uso de dados com aumento do número de dispositivos inteligentes (*smartphones, laptops, tablets, etc...*). As tecnologias das redes móveis têm evoluído rapidamente, dado o grande crescimento dos dados e dos acessos a todo o tipo de informação em qualquer lado e de forma cada vez mais rápida.

Com o mundo cada vez mais globalizado, Cabo Verde sente também a necessidade de acompanhar os progressos das comunicações. Em particular nas zonas rurais em Cabo Verde o acesso aos dados é cada vez mais solicitado e a qualidade de acesso não satisfaz à procura, uma vez que a morfologia do terreno tem bastante influência na qualidade do sinal.

Sendo a densidade populacional bastante reduzida nas zonas rurais, por parte das operadoras seria muito dispendioso implementar a rede instalando mais estações base, sabendo que isso tem um custo associado muito elevado, tanto a nível de implementação como da sua manutenção.

1.1. Enquadramento

A procura de serviços de banda larga móvel por parte dos utilizadores tem crescido de forma contínua e a um ritmo muito elevado, levando a que os operadores de redes móveis estejam constantemente a investir num aumento de capacidade, e Cabo Verde não é exceção.

Tudo isto surgiu com o “surgimento” dos novos equipamento e com o aumento da densidade populacional. Perante esses desafios surgiu a tecnologia LTE, que se encontra em ascensão mundialmente e que vem introduzir uma vantagem competitiva relativamente às restantes tecnologias móveis *3rd Generation Partnership Project (3GPP)*.

A motivação para a adoção do LTE, de acordo com a *International Telecommunication Union* (ITU) e a *International Mobile Telecommunications-Advanced* (IMT-A), está relacionada com o facto de oferecer maiores capacidades, maior eficiência espectral, baixa latência, sistema de comutação de pacotes otimizado, maiores níveis de qualidade de serviço e infra-estruturas mais baratas sabendo que se pode utilizar a infraestrutura já existente. Isto também implica um planeamento a nível de cobertura como nas outras tecnologias anteriores.

1.2. Evolução histórica das Redes Móveis em Cabo Verde

A primeira chamada móvel em Cabo Verde foi efetuada a 15 de Dezembro de 1997 através da operadora CVMóvel que era a única operadora no país na altura. Em finais de Outubro de 2006, a CVMóvel já operava em todas as ilhas do arquipélago usando o *standard* GSM 900MHz/1800 MHz e contava com mais de 100 mil assinantes na sua base de clientes. Os terminais desta tecnologia já efetuavam, para além de comunicação de voz, a transmissão de dados *Short Message Service* (sms) que surgiu no ano 2000 em Cabo Verde.

No ano de 2008, a CVMóvel alcançou o número de 250.000 clientes, ao mesmo tempo que inovava e lançava no mercado a sua rede de dados GPRS/EDGE, disponibilizava ao público o seu portal *Wireless Application Protocol* (WAP) e o primeiro serviço nacional de internet móvel. Em finais de 2010, foi lançado o serviço 3G [1]. Com as necessidades dos utilizadores num futuro próximo, vai ser preciso a implementação do serviço 4G, o que neste momento já se encontra em estudo.

1.3. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo planear uma rede de quarta geração (LTE) de baixo custo, avaliando para tal o uso de repetidores. A implementação seria feita numa região rural montanhosa de baixa densidade populacional, no Município de São Domingos em Cabo Verde.

Levando em consideração a geografia da zona (muitas montanhas com escarpas muito acentuadas), para que haja uma boa cobertura do sinal, a solução seria a instalação de múltiplas estações base. Tendo em conta o custo associado à implementação dessas

estações base, esta tese propõe a utilização de repetidores que seriam colocados em zonas estratégicas de forma a garantir que um maior número possível de localidades e utilizadores tenham acesso ao sinal emitido pelas estações base.

O objetivo da introdução de um repetidor na interface aérea é, basicamente, aumentar a área de cobertura de uma estação base. Existem diversas situações nas quais a utilização do repetidor é interessante, especialmente sob o ponto de vista de redução de custos e rapidez de implementação. O repetidor, devido à sua versatilidade, pode ser incluído em diversos momentos da implementação da rede, desde etapas iniciais na substituição de uma estação base até em fases mais avançadas no caso da expansão da rede, visando à redução das áreas de sombra existentes.

1.4. Organização do relatório

O presente trabalho encontra-se organizado em 5 capítulos que descreve todo o trabalho desenvolvido e encontra-se organizado da seguinte forma:

No Capítulo 1 é feita uma breve introdução às comunicações móveis e sua evolução histórica em Cabo Verde, um enquadramento do estudo realizado e descrição dos objetivos.

No Capítulo 2, é dedicado à fundamentação teórica do tema onde serão definidos alguns conceitos fundamentais de modo a permitir uma mais fácil compreensão do trabalho a realizar. Sendo abordada a tecnologia LTE e o seu modo de funcionamento, e a solução com o uso de repetidores.

As técnicas de planeamento utilizado no LTE são explicadas no Capítulo 3. Neste capítulo serão apresentadas os processos completos associados ao planeamento LTE, o planeamento de cobertura e capacidade, os cálculos da capacidade do repetidor e a relação sinal ruído.

No Capítulo 4, é onde vão ser apresentados os cenários definidos para o planeamento LTE em Cabo Verde, quais os resultados obtidos após a realização do planeamento, algumas conclusões respeitante aos resultados apresentados, evidenciando assim quais as vantagens e desvantagens da utilização dos repetidores no planeamento LTE.

No Capítulo 5 serão apresentadas as conclusões que foram tiradas ao longo de todo o desenvolvimento da tese, sendo também proposto trabalho para o futuro.

Capítulo 2

2. Estado da Arte

Neste capítulo, inicialmente serão apresentadas uma breve introdução ao LTE, prosseguindo com os conceitos teóricos sobre LTE, nomeadamente a arquitetura, a interface rádio utilizado, os tipos de canais utilizados bem como as outras características. Estudando esses conceitos introdutórios, seguir-se á para os estudos sobre planeamento de rede LTE para ambiente montanhosas com baixa densidade populacional, referindo-se às ilhas de Cabo Verde. Para isso vai ser feito um estudo sobre o tipo de equipamento a ser utilizado, nomeadamente o uso de repetidores de maneira a melhorar a cobertura de rede nas zonas de sombra e minimizar os custos para as operadoras.

2.1. *Long Term Evolution*

Um novo padrão celular chamado de *Long Term Evolution* (LTE), também referenciado como *Evolved UMTS Terrestrial Radio Access* (E-UTRA), foi implementado para substituir a tecnologia 3G, é popularmente chamado de tecnologia 4G e é baseada em IP com base em *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing* (OFDM) com maior eficiência espectral, maior largura de banda e uma baixa latência [2].

O objetivo do LTE ao nível dos requisitos é alcançar um débito elevado na transmissão de dados, com velocidades de transmissão na ordem dos 100 Mbps, para utilizadores em mobilidade e de 1 Gbps para utilizadores fixos.

O LTE continua a ser desenvolvido pelo 3GPP e vai permitir inicialmente um ritmo de transmissão de pico de 100 Mbps em *Downlink* (DL) e 50 Mbps em *Uplink* (UL), com uma largura de banda que vai dos 1,4 aos 20 MHz tanto para o DL como para o UL, assumindo duas antenas recetoras e uma antena de transmissão no terminal. O LTE utiliza o *Orthogonal Frequency-Division Multiple Access* (OFDMA) em DL e *Single Carrier-Frequency Division Multiple Access* (SC-FDMA) em UL, podendo funcionar em modo *Frequency Division Duplex* (FDD) ou em modo *Time Division Duplex* (TDD) [3].

2.2. Arquitetura da Rede LTE

Uma das características do LTE é a redução de custo, simplificando a arquitetura rádio. Na arquitetura LTE os dados são trocados entre utilizadores e a estação base, através da interface aérea. O *Evolved Node B* (eNodeB) faz parte da *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network* (E-UTRAN) onde todas as funcionalidades e serviços de rede são conduzidos [4]. O LTE foi desenhado apenas para suportar serviços comutados por pacotes, em contraste com os modelos de comutação por circuitos nas gerações anteriores.

Ao LTE associam-se dois termos: o primeiro está associado a uma evolução da tecnologia de acesso rádio UTRAN designado de E-UTRAN e o segundo está associado a uma evolução dos aspetos não-rádio, mais concretamente à arquitetura de *core*, e designa-se de *System Architecture Evolution* (SAE) no qual inclui o *Evolved Packet Core* (EPC). Juntos, estes dois conceitos dão origem ao *Evolved Packet System* (EPS) [5].

A E-UTRAN é constituída por um conjunto de eNodeB interligados entre si e é responsável pelas funções de gestão de recursos rádio, compressão de dados, segurança e conectividade com as entidades *core*, sendo estas entidades o *Mobility Management Entity* (MME) e o *Serving Gateway/PDN gateway* (S-GW/P-GW).

Na E-UTRAN, a maioria das funções de gestão rádio são atribuídas ao eNodeB e estes passam a ser o ponto de terminação de todos os protocolos rádio, o que permite uma melhor interação entre protocolos de diferentes camadas da rede de acesso, reduzindo assim a latência e aumentando a eficiência da rede [6].

Na arquitetura LTE uma vês que funciona tudo sobre IP, alguns dos nós, comparando com a arquitetura das tecnologias anteriores são reduzidos e passa a existir uma nova hierarquia de rede, com a divisão da arquitetura em quatro níveis principais, que são UE, E-UTRAN, EPC, e o *Services Domain*.

A Figura 2.1 representa a arquitetura de rede LTE com algumas diferenças comparando com as arquiteturas das tecnologias anteriores [3].

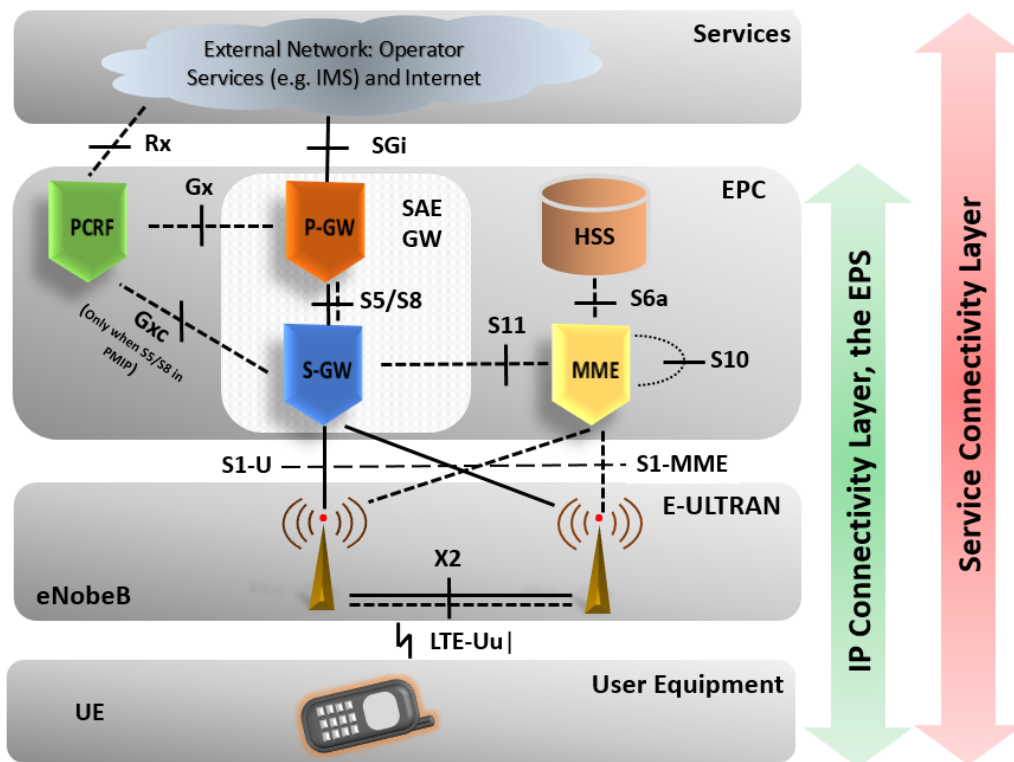


Figura 2.1 – Arquitetura de Rede do sistema LTE (adaptado de [3]).

- **User Equipment (UE)** – É o dispositivo que o utilizador final utiliza para a comunicação. Tipicamente, é um dispositivo portátil tal como um telefone inteligente ou um cartão de dados, tais como os usados em 2G e 3G, ou pode ser incorporado, por exemplo, a um *laptop, tablet*. UE também contém a *Universal Subscriber Identity Module (USIM)* [3]. O UE é também o responsável por disponibilizar serviços ao utilizador, de modo a que clientes *VoIP* possam ser usados no estabelecimento de chamadas sobre LTE.
- **Evolved Node B (eNodeB)** – Os únicos constituintes da E-UTRAN são os eNodeB que são essencialmente estações-rádio que controlam todas as funções rádio do sistema, tanto no DL como no UL, incluindo a compressão do cabeçalho IP, criptografia e encaminhamento dos dados dos utilizadores, o processo de *paging* e *broadcasting*. Estes funcionam como uma ligação entre o UE e o EPC visto que são o ponto de terminação de todos os protocolos respeitantes ao UE e transmitem informação, entre a ligação rádio e respetiva conectividade IP, em direção ao EPC [3].
- **Mobility Management Entity (MME)** – É um elemento principal de controlo na EPC, tem como principais funções a autenticação e segurança do sistema, a gestão de mobilidade, a seleção do *handover* com outros MME e a gestão do perfil de subscrições e

conectividade de serviços. Sempre que um UE em modo *idle* recebe dados de uma rede externa, o MME vai notificar os eNodeB, da área do UE.

Respeitante à autenticação e segurança, quando um UE se regista pela primeira vez na rede, a sua autenticação é realizada pelo MME sendo que esta funcionalidade é necessária para garantir que o UE é quem assegura ser.

O MME aloca periodicamente a cada UE uma identidade temporária denominada de *Globally Unique Temporary Identity* (GUTI), o que vai permitir que a transmissão da *International Mobile Subscriber Identity* (IMSI) na interface rádio seja minimizada para proteger a privacidade do UE. Ao nível da gestão da mobilidade, o MME tem registadas as localizações de todos os UE, na sua área de serviço. Quando um UE realiza o seu primeiro registo na rede, o MME vai criar uma nova entrada e indica a localização do mesmo ao *Home Subscriber Server* (HSS) pertencente à rede do UE [3].

- **Serving Gateway (S-GW)** – Faz parte de uma central da infraestrutura de rede e encontram-se interligados por meio de uma interface *S5/S8* ao *Packet Data Network Gateway* (P-GW). Onde a interface *S5/S8* é baseado em *GPRS Tunneling Protocol* (GTP) ou *Proxy Mobile Internet Protocol* (PMIP). Quando é baseado em GTP, o S-GW constrói um túnel em todas as suas interfaces *User Plane* (UP). Nesta configuração o mapeamento dos serviços IP é efectuado no P-GW e, todo o controlo relacionado com a comunicação é feito pelo MME ou P-GW. Quando a interface *S5/S8* usa o PMIP o S-GW irá realizar o mapeamento entre o serviço IP e tuneis GTP nas interfaces *S1-U* e vai ligar ao *Policy and Charging Resource Function* (PCRF) para receber informação do mapeamento. O S-GW não tem funções ao nível de controlo, visto que é apenas responsável pelos seus recursos e respetiva alocação, com base em pedidos do MME, P-GW ou PCRF aquando da necessidade de atribuição, modificação ou remoção de portadoras ao utilizador. Ao nível da mobilidade entre eNodeB's, o S-GW atua como âncora pois vai efetuar uma troca dos túneis do antigo eNodeB para o novo ou fornecer recursos para reenvio de dados do antigo eNodeB para o novo, aquando de *handover* da parte do UE [3] .
- **Packet Data Network Gateway (P-GW)** – É o elemento de encaminhamento entre o EPS e a rede externa de dados e tem um nível de mobilidade mais alto no sistema. Realiza funções de filtragem de tráfego e aloca endereços IP ao UE para que este consiga comunicar com redes exteriores. O P-GW inclui o *Policy and Charging*

Enforcement Function (PCEF), o que se traduz na realização da filtragem, taxaço, controlo de serviços tendo em conta as políticas atribuídas ao UE. Em situação da realização de *handover* entre S-GW, o P-GW irá receber uma informação para que comute os fluxos de dados para o novo S-GW. Cada P-GW pode estar conectado a um ou mais PCRF, S-GW e redes externas. Na situação do *handover* entre múltiplos S-GW, o P-GW irá receber uma informação para que comute os fluxos de dados para o novo S-GW [3].

- ***Policy and Charging Resource Function (PCRF)*** – É Responsável pelas políticas de decisão, bem como pelo controlo de taxaço (*Policy and Charging Control*) [5]. Este toma as decisões relativamente ao tratamento de serviços com base na qualidade de serviço dos mesmos e fornece informação ao PCEF, que se encontra localizado no P-GW e, se necessário, também ao *Bearer Binding and Event Reporting Function* (BBERF) que está localizado no S-GW, para que seja possível a atribuição das portadoras apropriadas ao UE, bem como o respetivo controlo. O PCRF é um servidor que se encontra usualmente localizado com outros elementos da rede, nos centros de comutação da operadora. Cada PCRF pode estar associado a um ou mais *Application Function* (AF), P-GW ou S-GW sendo que, existe somente um PCRF associado a cada ligação de dados que cada UE possui.
- ***Home Subscriber Server (HSS)*** – É uma base de dados onde estão os dados permanentes de todos os utilizadores. Esta base de dados guarda também a localização dos utilizadores ao nível dos nós da rede, como por exemplo o MME. Mas também regista a localização dos utilizadores visitantes. É um servidor de banco de dados mantido na instalação do operador de origem ou seja quando um UE encontra-se em roaming vai precisar de entrar em contacto com esse base de dados. A chave permanente que é utilizada no cálculo dos vetores que são enviadas para rede visitada, será guardada no *Authentication Center* (AuC) que tipicamente faz parte do HSS. Toda a sinalização relativa à autenticação é tratada entre o HSS e o MME logo o HSS necessita de estar conectado a todos os MME da rede. Para cada UE, o HSS vai estar conectado ao MME que está ao seu serviço e, assim que um segundo MME reporte que está ao serviço do

UE, o HSS cancela a localização do mesmo a partir do antigo MME isto tudo funciona como o HLR/VLR no GSM [3].

- **Serviços** – os serviços podem incluir vários subsistemas, que por sua vez podem conter vários nós lógicos, de acordo com os serviços disponibilizados. Segue-se uma categorização dos tipos de serviços que serão disponibilizados:
 - i. Em primeiro lugar estão os serviços *IP Multimedia Sub-system (IMS)*, estes são serviços implementados pelo operador através de *Session Initiation Protocol (SIP)*;
 - ii. Em segundo lugar, os serviços não IMS, que não são definidos nas especificações, mas implementados pelo operador, através de um protocolo existente entre uma aplicação no UE e um servidor pertencente ao operador. Outros serviços não fornecidos pelo operador de rede móvel, mas acessíveis através da *internet*, tendo em conta que o UE pode efetuar uma ligação a um qualquer servidor na *internet* [3].

- **Interfaces do sistema LTE:** No sistema LTE existe vários interfaces que permite a ligação entre os recursos rádio, entre os recursos rádio e *core*, entre *core* e a rede externa. As duas principais interfaces do sistema LTE são as que permitem a interligação direta entre os recursos rádio, designada de interface X2 e a interface S1 permitindo a interligação entre eNodeB e *core*.
 - i. Interface S1: A interface S1 faz a interligação entre o eNodeB e o EPC. Está dividido em duas interfaces uma para o *control plane (S1-CP)* e outra para o *user plane (S1-UP)*. O S1-CP vai ser baseado em *Stream Control Transmission Protocol (SCTP)* e vai efectuar o transporte da sinalização. A interface S1-UP transporta os dados do eNodeB para o S-GW. A estrutura do protocolo usado nesta interface é semelhante à usada pelo UMTS e baseia-se na pilha protocolar *Generic Tunneling Protocol (GTP)* [5].
 - ii. Interface X2: A interface X2 surge na arquitetura LTE, para a simplificação da mesma, e é uma interface que faz a interligação direta entre eNodeB's para transferência de contextos, para declaração de vizinhanças. Isto pode-se dizer que o estabelecimento da interface X2 poderá ser despoletado na situação em que há aumento da carga de tráfego, informação de interferência e informação de *handover*. A inicialização do procedimento para estabelecer uma interface X2 começa com a identificação do eNodeB do destino da ligação. Esta identificação é

levada a cabo pela *Automatic Neighbour Relation Function* (ANRF). Tem como principal funcionalidade efetuar suporte à mobilidade do terminal, utilizada para funções de *Rádio Resource Management* (RRM) quando existem múltiplas células. A interface X2 tal como o S1 está dividida entre *Control Plane* (X2-CP) e o *User Plane* (X2-UP) e pertence à camada de rádio. A X2-CP é baseada em *Stream Control Transmission Protocol* (SCTP) pertencente a camada de transporte onde efetua o transporte da sinalização através do protocolo X2- *Application Protocol* [5].

- iii. **Interface S5/S8:** É a interface pertencente ao plano do utilizador que liga o P-GW ao S-GW. Em princípio, S5 e S8 é a mesma interface, a diferença é que S8 é usado quando estiver em *roaming*, entre os diferentes operadores, enquanto S5 é a rede interna. A interface S5/S8 entre o S-GW, pode ser baseada em túneis GTP, no qual o fluxo de dados IP é mapeado nesses túneis pelo P-GW, através da informação obtida do PCRF ou do S-GW. Se a interface for baseada em PMIP, os pacotes IP são todos mapeados num único túnel *Generic Routing Encapsulation* (GRE) que permite que os pacotes sejam transmitidos de forma transparente entre os *end points*, neste caso toda a informação de controlo é trocada apenas com o PCRF [3].

Na Tabela 2.1 encontram-se um resumo das restantes interfaces do *User Plane* e do *Control Plane*.

Tabela 2.1 – Restantes interfaces do Plano do utilizador e de controlo (adaptado de [3]).

Plano de utilizador		Plano de Controlo	
<i>Interface</i>	<i>Função</i>	<i>Interface</i>	<i>Função</i>
S1-U	Interface entre os <i>eNodeB</i> (<i>E-UTRAN</i>) e o <i>S-GW</i> (<i>EPC</i>).	S6A	Interface que liga os <i>MME</i> aos <i>HSS</i> levando a que seja possível a transferência de dados de subscrição e autenticação.
SGi	Interface entre o <i>P-GW</i> e a rede externa.	Gx	Interface entre o <i>P-GW</i> e o <i>PCRF</i> que vai permitir a transferência de políticas da qualidade de serviço da informação e das regras de tarifação.
S11	Interface que liga o <i>S-GW</i> ao <i>MME</i> .	Rx	Interface que estabelece a ligação entre o <i>PCRF</i> e redes exteriores.

2.3. Acesso Rádio em LTE

A tecnologia LTE adotou uma nova interface aérea baseada na tecnologia *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing* (OFDM) que possibilita alcançar alta velocidade na transmissão de dados, com uma implementação de baixo custo e eficiente no consumo de energia. Tal inovação combina uma modulação baseada no *Orthogonal Frequency-Division Multiple Access* (OFDMA) com esquema de múltiplo acesso para DL e *Single Carrier Frequency-Division Multiplexing Access* (SC-FDMA) no UL.

A multiplexação OFDM divide o espectro disponível em milhares de subcanais estreitos, cada um carregando parte do sinal ao máximo, sendo combinados posteriormente para gerar os dados transmitidos. Com isso, o OFDMA associa diferentes subcanais para diferentes utilizadores, evitando problemas causados por reflexões em múltiplos caminhos, enviando os bits dos dados a baixas velocidades, combinados no recetor para formar uma mensagem de alta velocidade.

2.3.1. Orthogonal Frequency Division Multiple Access

O OFDMA cumpre os requisitos do LTE, porque permite a flexibilidade do espectro e soluções de baixo custo para débitos binários elevados. O OFDMA emprega múltiplas subportadoras sobrepostas no domínio da frequência, cada subportadora é modulada com um esquema de modulação convencional (QPSK, 16QAM ou 64QAM). Com o princípio do OFDMA, diferentes utilizadores podem usar diferentes portadoras. A Figura 2.2 apresenta as principais características de um sinal OFDMA na frequência e no tempo.

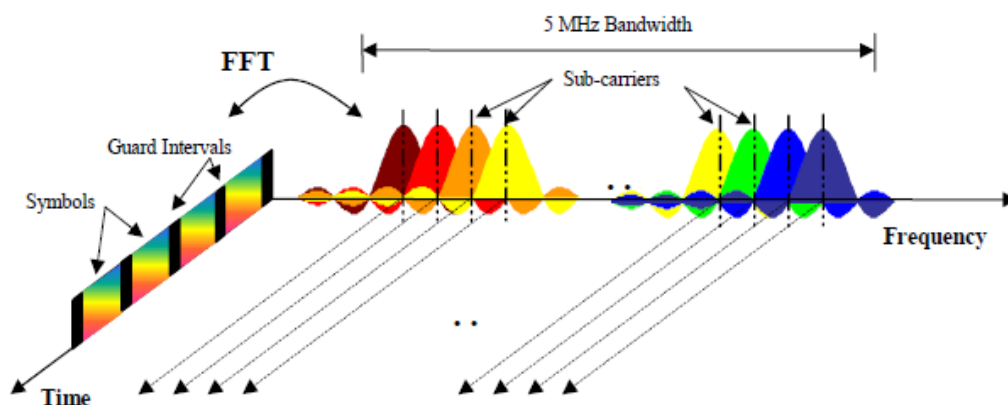


Figura 2.2 – OFDMA no domínio do tempo e da frequência (extraído de [7]).

A total motivação do OFDMA no LTE é o seguinte:

- ✓ Bom desempenho em canais de frequência com desvanecimento seletivo;
- ✓ Baixa complexidade dos recetores de banda base;
- ✓ Adaptação de ligação e planeamento no domínio da frequência;
- ✓ Compatível com as tecnologias avançadas de recetores e antenas;

Muitos desses benefícios só poderiam ser alcançados na sequência da recente evolução da arquitetura de rede de acesso rádio, ou seja, colocando o controlo rádio no eNodeB. Em LTE adotou-se um espaçamento entre portadoras de 15 kHz cada, o que leva a uma maior tolerância ao nível do efeito de *Doppler*. As subportadoras estão divididas em grupo, onde cada grupo é formado por 12 subportadoras, tendo em conta o espaçamento entre as subportadoras formarão um *resource block* (RB), cuja largura de banda é de 180kHz, Figura 2.3.

A OFDM é uma técnica que apresenta vantagens frente aos problemas de interferências entre frequências com maior eficiência respeitante às condições desfavoráveis do meio, como atenuação de altas frequências, interferência inter-simbólica, interferência causada por múltiplos percursos. É introduzido um tempo de guarda entre cada símbolo de modo a compensar o atraso da propagação do canal, diminuindo a interferência inter-simbólica, Figura 2.4.

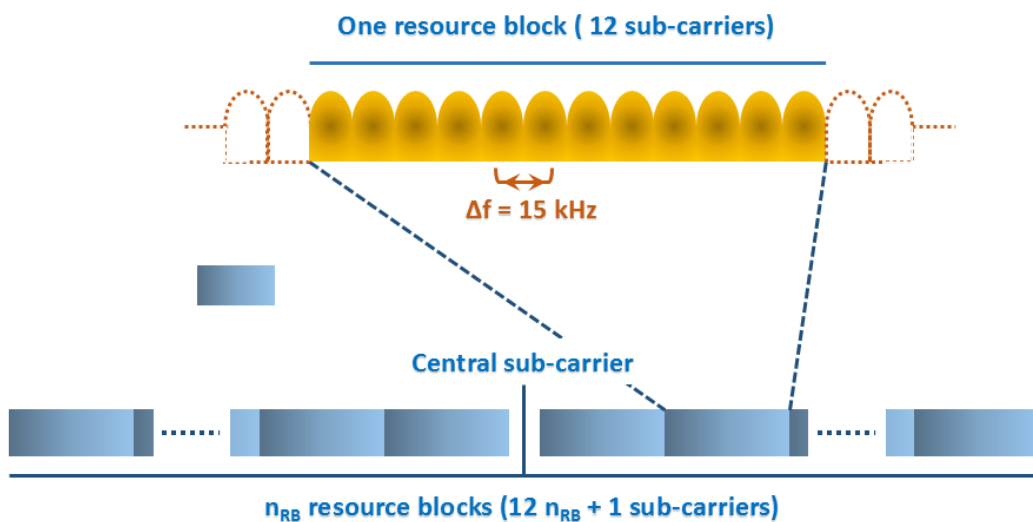


Figura 2.3 – Definição do bloco de recurso no domínio do tempo (adaptado de [8]).

O número de RBs está associado à banda disponível, conforme apresentado na Tabela 2.2.

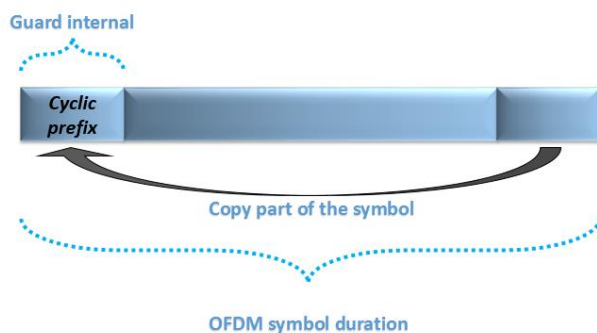


Figura 2.4 – Extensão cíclica de um símbolo OFDM (adaptado de [3]).

Como a tecnologia OFDM não tem a característica de encriptação para fornecer proteção contra interferência inter-simbólica como é o caso do *Code Division Multiple Access* (CDMA) no limite da célula, será preciso recorrer a planeamento de frequências.

2.3.2. Single Carrier Frequency Division Multiple Access

Um sinal OFDM puro também cria um elevado sinal de pico em relação à média e é por isso que uma modificação da tecnologia denominada SC-FDMA é utilizada no UL.

A forma básica de SC-FDMA pode ser vista como sendo igual à modulação QAM, onde cada símbolo é transmitido um de cada vez, à semelhança do método *Time Division Multiple Access* (TDMA) utilizado em sistemas GSM.

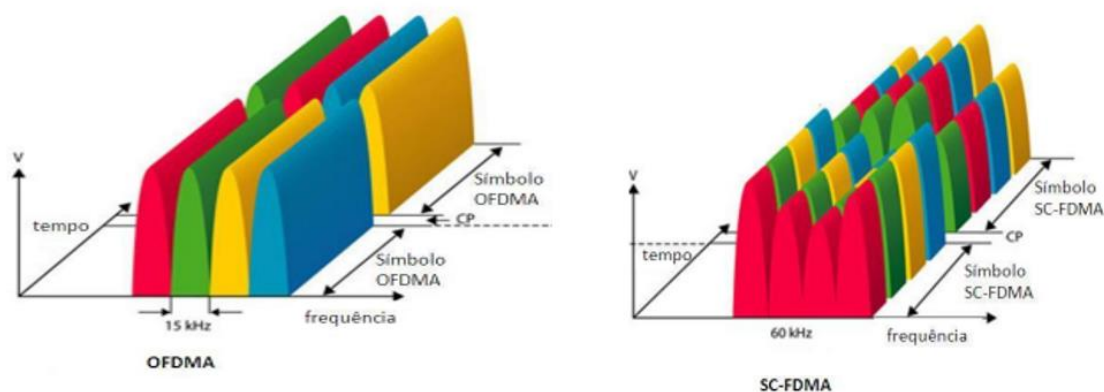


Figura 2.5 – Estrutura do SC – FDMA vs. OFDMA (adaptado de [7]).

A técnica SC-FDMA consiste numa transmissão com a utilização de apenas uma única portadora, o que leva a uma transmissão individual mais curta no domínio do tempo, mas superior no domínio da frequência comparada com a técnica utilizada em DL, isto pode se confirmar na Figura 2.5.

Como num sistema OFDMA a utilização de extensão cíclica também é adicionado periodicamente mas não depois de cada símbolo, visto evitar a interferência inter-simbólica, como já mencionado, e conduzir a uma simplificação do *design* do recetor [3].

A diferença mais óbvia entre o OFDMA e o SC-FDMA, é que o OFDMA transmite os quatro símbolos QPSK em paralelo, um em cada subportadora, enquanto o SC-FDMA transmite os quatro símbolos QPSK em série, a uma taxa 4 vezes superior, com cada símbolo a ocupar uma largura de banda de $M \times 15$ kHz, em que M são as subportadoras adjacentes.

O LTE utiliza um conjunto de largura de banda que varia desde 1,4 MHz até 20 MHz, definida de acordo com o comprimento da FFT, taxas de amostragem [3]. A largura de banda do sistema pode ser selecionada de acordo com o volume da transmissão ou com um nível de QoS pretendido. Na Tabela 2.2 pode-se verificar as várias larguras de banda atribuídas ao LTE e vários parâmetros associados.

Tabela 2.2 – Parâmetros OFDM para o esquema de transmissão no DL, para cada LB do canal (adaptado de [9]).

Parâmetros	Valores					
Duração do slot [ms]	0.5					
Largura de Banda [MHz]	1.4	3	5	10	15	20
Sub-Trama (TTI [ms])	1(=2slots)					
Número de RB (1 RB=180kHz (em 1ms TTI)	6	15	25	50	75	100
Modulação	DL: QPSK, 16QAM, 64QAM UL: QPSK, 16Q AM, 64 QAM(optional)					
Largura de banda da Sub-Portadora [kHz]	15					
Largura de banda do Physical RB [kHz]	180					
Frequência de Amostragem [MHz]	1.92 (1/2x3.84)	3.84	7.68 (2x3.84)	15.36 (4x3.84)	04 (6x3.8)	30.72 (8x3.84)
Tamanho do FFT	128	56	512	1024	1536	2048
Sub-Portadoras ocupadas	72+1	0+1	300+1	600+1	900+1	1200+1
Símbolos por trama	4 com CP curto e 6 com CP longo					
Prefixo Cíclico	4.69 µs com CP curto e 16.67 µs com CP longo					

Os UEs, estão classificadas em várias categorias, na Tabela 2.3 encontra-se os vários parâmetros das categorias dos UEs.

Tabela 2.3 – Classes do UE no LTE (extraído de [9]).

Categoria dos UEs		1	2	3	4	5
Peak Rate (Mbps)	DL	10	50	100	150	300
	UL	5	25	50	50	75
Largura de Banda		20MHz				
Modulação	DL	QPSK, 16QAM, 64QAM				
	UL	QPSK, 16QAM			QPSK, 16QAM, 64QAM	
2 Rx Diversity		Já se encontra definido nos requisitos de desempenho em todas as categorias do LTE				
2x2 MIMO		Opcional		Obrigatório		
4x4 MIMO		Não é suportado			Obrigatório	

2.3.3. Canais lógicos, de transporte e físicos em LTE

A camada de acesso ao meio realiza o mapeamento entre os canais lógicos e os canais de transporte, organizando os acessos dos diferentes terminais e dos serviços que utilizam, tanto no DL como no UL, dependendo das duas prioridades. A Figura 2.6 apresenta o mapeamento dos canais lógicos, de transporte e físicos do LTE.

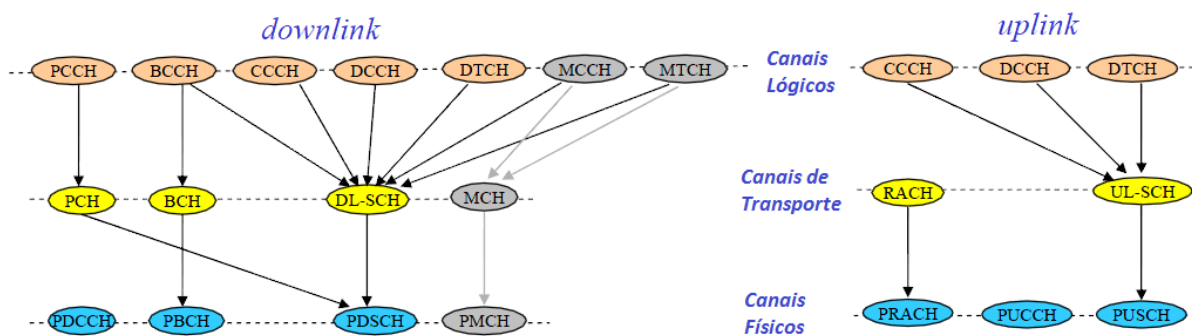


Figura 2.6 – Mapeamento de canais (adaptado de [10]).

Os canais lógicos podem ser divididos em canais de controlo, para o transporte de sinalização, e canais de tráfego para o transporte de dados do utilizador, esses canais são:

- **Broadcast Control Channel (BCCH)** – Usado para difusão da informação para os terminais dentro de uma célula, é um canal de UL;

- **Paging Control Channel (PCCH)** – Usado para notificar o UE de uma chamada ou para comunicar a alteração da informação de célula, é um canal de UL;
- **Common Control Channel (CCCH)** – Usado para comunicar informação de controlo em UL ou DL quando não existe uma ligação RRC entre o UE e o eNodeB;
- **Multicast Control Channel (MCCH)** – É um canal usado em DL, no qual é usado para transmitir informação de controlo em *multicast*;
- **Dedicated Control Channel (DCCH)** – Usado para transmitir informação de controlo em modo dedicado para um determinado UE, quando este possui uma ligação RRC com o eNodeB.

Os canais físicos transportam a informação das camadas superiores, que por sua vez são mapeados em canais de transporte. Os canais de transporte atuam como uma interface entre a camada de acesso ao meio e a camada física. A seguir são apresentados os canais físicos utilizados no sistema LTE.

- **Physical Broadcast Channel (PBCH)** – É um canal utilizado em DL para transportar informação do sistema, tal como frequência, canal de controlo, etc;
- **Physical Downlink Control Channel (PDCCH)** – É um canal que é usado em DL para transportar informação de controlo de sinalização para o terminal. Também transporta informação de controlo no UL tais como informação relativa ao *Channel Quality Indicators*, transporta respostas HARQ ACK/NACK à transmissão da ligação descendente, neste caso fala-se de **Physical Uplink Control Channel (PUCCH)**.
- **Physical Multicast Channel (PMCH)** – É um canal de DL, como o próprio nome indica este canal físico transporta informação de sistema referente a transmissões *multicast*.
- **Physical Downlink/Uplink Shared Channel (PDSCH/PUSCH)** – É um canal utilizado em UL e DL, transporta os canais de sincronização no SCH, bem como informação de *paging*, usa a modulação QPSK, 16QAM ou 64QAM.
- **Physical Random Access Channel (PRACH)** – É um canal de UL que transporta os preâmbulos de acesso aleatório que são enviados pelo UE.

Ao contrário do canal de transporte dedicado existente no WCDMA, no LTE contém apenas os canais comuns de transporte.

Os canais de transporte são a interface entre a camada controlo de acesso ao meio (MAC) e a camada física. A camada física necessita de ter capacidade para fornecer a alocação dinâmica de recursos, para taxas de dados variáveis e para a divisão de recursos entre diferentes utilizadores. Os canais de transporte podem ser descritos do seguinte modo [3]:

- **Broadcast Channel (BCH)** – É o canal de *broadcast* utilizado em DL, para transmitir os parâmetros de sistema necessários para permitir o acesso dos terminais ao sistema, e também para identificar o operador.
- **Multicast Channel (MCH)** – É utilizado para transmitir dados de *multicast* do terminal móvel para o eNodeB, ligação UL – DL.
- **Paging Channel (PCH)** – É um canal utilizado em DL para transportar a informação de *paging* para o dispositivo, para passar o dispositivo de um estado *RRC_IDLE* a um estado *RRC_CONNECTED*, ou seja, quando a rede pretende iniciar as comunicações com um terminal.
- **Downlink Shared Channel (DL – SCH)** – Transporta os dados dos utilizadores nas ligações ponto-a-ponto na direção do DL. Todas as informações (dados de utilizadores ou informações de controlo da camada superior) destinam-se a apenas um utilizador ou UE, é transmitida no *DL-SCH*, assumindo que UE já está no estado *RRC_CONNECTED*.
- **Uplink Shared Channel (UL-SCH)** – transporta os dados do utilizador e informação de controlo originada no terminal na direção do UL. Semelhante ao *DL-SCH*.
- **Random Access Channel (RACH)** – é o canal utilizado no UL e tem como finalidade responder às mensagens de *paging* ou simplesmente porque o utilizador deseja efetuar uma chamada, o móvel terá de entrar em contacto com o sistema ou seja, transporta a informação de controlo do terminal.

2.3.4. Soluções de Antenas LTE

A antena usada no *eNodeB* depende de vários fatores (benefícios de desempenho esperados para o ambiente de rádio, os custos, etc.). As especificações das antenas devem ser determinadas com base em exigências de cobertura.

As redes móveis estão sujeitas as interferências, multipercurso e canais com baixas características de propagação, o que limita o débito binário. No LTE existe o conceito de técnicas de múltiplas antenas, que são usados para permitir a transmissão de dados com maior débito binário, extensão de cobertura e conseqüentemente, maior capacidade. Adicionando mais antenas para um sistema de rádio, permite a possibilidade de melhoria de desempenho, o que reforça a dimensão espacial resultante da utilização de múltiplas antenas distribuídas espacialmente, daí o termo *Multiple Input Multiple Output* (MIMO).

Quando os sinais são combinados corretamente no recetor, a qualidade do sinal e o débito binário para cada utilizador de MIMO é melhorado.

Como se pode ver na Figura 2.7, há quatro maneiras de fazer uso do canal de rádio.

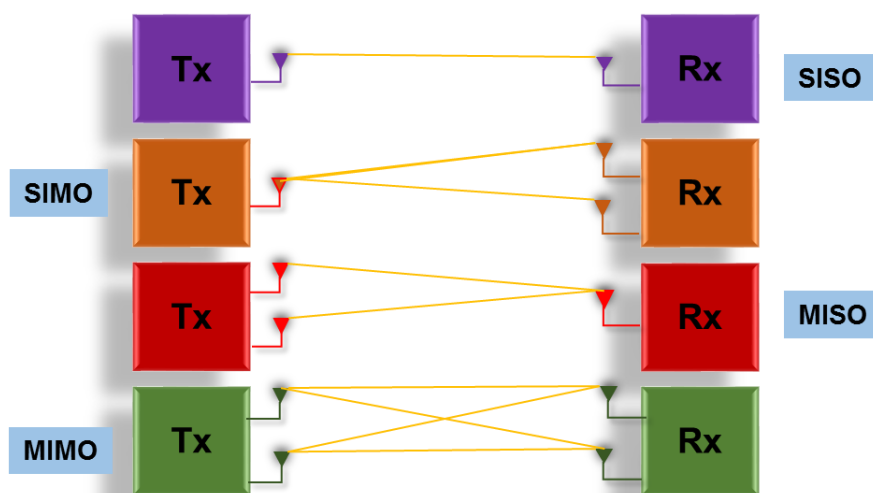


Figura 2.7 – Sistemas de acesso de múltiplas antenas (adaptado de [11]).

- **Single Input Single Output (SISO)** – O modo de acesso ao canal rádio mais básica é o SISO, em que é usado apenas uma antena transmissora e uma antena de recepção. Esta é a forma de comunicação que tem sido o padrão desde que o rádio começou e é o patamar no qual é comparada às outras técnicas de antena.

- **Single Input Multiple Output (SIMO)** – Utiliza um transmissor e dois ou mais recetores. SIMO é muitas vezes referida como diversidade de receção. Este modo de acesso ao canal rádio é particularmente bem adaptado para condições de baixo relação sinal-ruído, em que é possível um ganho teórico de 3dB quando são usados dois recetores. Não há nenhuma alteração na taxa de dados uma vez que é transmitida apenas um fluxo de dados, mas a cobertura no limite da célula é melhorada devido à redução do SINR [11].
- **Multiple Input Single Output (MISO)** – O MISO usa dois ou mais transmissores e um recetor. MISO é mais comumente referido como a diversidade de transmissão. Os mesmos dados são enviados em ambas as antenas de transmissão, mas codificado de tal modo que o recetor pode identificar cada transmissor. A diversidade de Transmissão aumenta a robustez do sinal de desvanecimento e pode aumentar o desempenho em condições de baixo SINR. MISO não aumenta as taxas de dados, mas ele suporta as mesmas taxas de dados usando menos potência.
- **Multiple Input Multiple Output (MIMO)** – Os sistemas MIMO são parte essencial do LTE, e permitem que esta tecnologia alcance as metas ambiciosas que lhe foram traçadas em termos de débito e eficiência espectral. Tal deve-se ao facto de serem enviados sinais diferentes de duas ou mais antenas que, na receção vão ser desmultiplexados, aumentando assim o débito para o dobro, ou mesmo para o quadruplo consoante a configuração da antena, Figura 2.8. No DL do LTE é assumido que MIMO 2x2 é utilizado como configuração base, ou seja, duas antenas no emissor e no recetor, sem o qual não seria possível atingir os débitos esperados, embora sistemas MIMO 4x2 sejam presentemente utilizados para aumentar ainda mais o desempenho do sistema LTE.

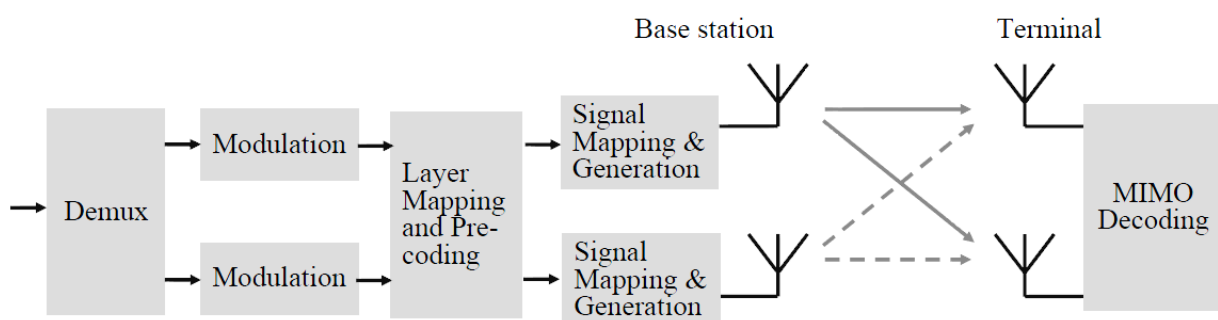


Figura 2.8 – Princípio MIMO para uma configuração de duas antenas (extraído de [3]).

A técnica MIMO inclui multiplexagem espacial, diversidade e Pré-Codificação. O princípio básico da multiplexagem espacial baseia-se em enviar sinais de duas ou mais antenas diferentes com fluxos de dados diferentes e, por meio de processamento do sinal no recetor separar esses fluxos de dados aumentando, assim a taxa de bits por um fator de 2, ou 4 quando se trata de uma configuração MIMO 4x4.

A diversidade de transmissão depende do envio do sinal codificado a partir de várias antenas, de forma a explorar os ganhos de desvanecimento entre antenas. Na pré-codificação, os sinais transmitidos pelas diferentes antenas são ponderadas de modo a maximizar o SINR recebido [3]. A natureza do OFDMA é bastante adequada para a operação de MIMO que requer uma SINR elevada e pode beneficiar-se da alta SINR que é atingido localmente no domínio do tempo e da frequência.

Um sistema MIMO utiliza um conjunto de *Reference Signals* (RS) para ajudar a superar a interferência entre células, para realizar a estimação do canal e para diferenciar os dados das diferentes antenas. Isto porque consoante a configuração das antenas, de 1x1, 2x2 ou 4x4, os RS vão estar mapeados segundo um determinado padrão. Consoante o aumento do número das antenas, a SINR necessária aumenta, assim como a complexidade entre o emissor e o recetor e a sobrecarga da RS. Este princípio é apresentado na Figura 2.9.

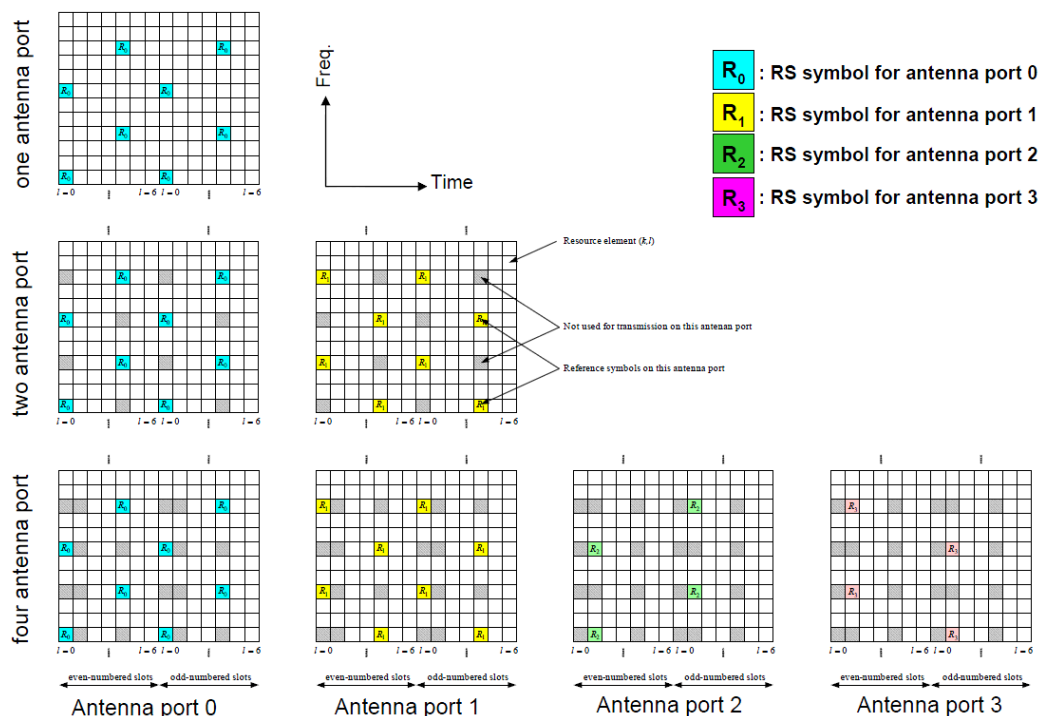


Figura 2.9 – Exemplo do mapeamento dos sinais de referência de DL (extraído de [12]).

Em UL também é suportado MIMO o que leva a um aumento para o dobro da capacidade da célula, aquando da utilização de duas antenas com RSs ortogonais. Assim a transmissão do eNodeB é tratada como uma transmissão MIMO e o fluxo de dados é separado com processamento do recetor MIMO, Figura 2.10.

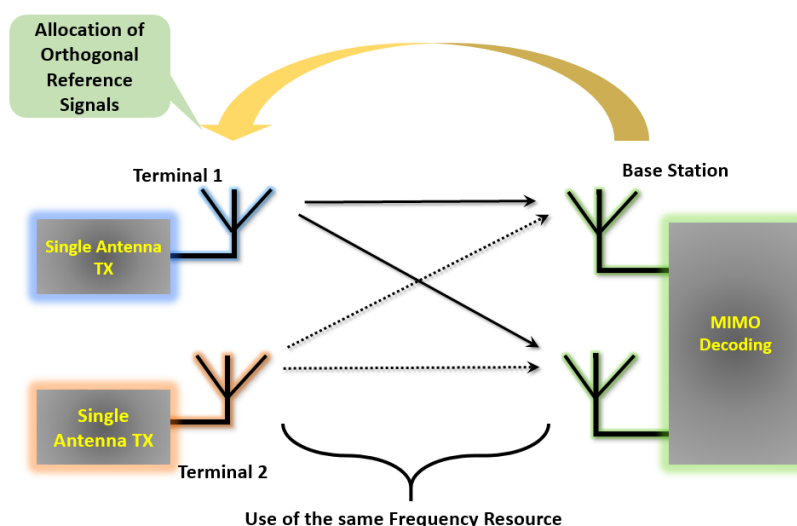


Figura 2.10 – Princípio MIMO para múltiplos utilizadores (adaptado de [3]).

São definidos sete modos de transmissão MIMO no LTE para otimizar o desempenho no DL sob diferentes condições de rádio de acordo com [11], esses modos são apresentados a seguir:

- **Modo 1 – *Single-antenna port; port 0* – SIMO:** Este modo de transmissão contém apenas uma antena a transmitir enquanto na receção pode existir duas antenas.
- **Modo 2 – *Transmit diversity (TxD)* – MISO:** Neste modo os dados a transmitir são repetidos pelas variadas antenas, sendo que cada fluxo vai possuir uma codificação diferente devido à utilização de *Space-Frequency Block Codes* (SFBC).
- **Modo 3 – *Open-loop spatial multiplexing (OLSM)* – MIMO, *no precoding*:** Aqui 2 ou 4 fluxos de dados vão transmitir informação diferente, através da utilização de canais paralelos. As condições em que esta transmissão é efetuada vão depender dos valores do *Rank Indicator* (RI) e do *Channel Quality Indicator* (CQI). Este modo é apropriado para situações em que o eNodeB não possui o *Precoding Matrix Indicator* (PMI) do UE.

- **Modo 4 – Closed-loop spatial multiplexing (CLSM) – MIMO, precoding:** Neste modo o eNodeB aplica no sinal transmitido a matriz de pré-codificação, que está de acordo com o PMI recebido por parte do UE, RI e CQI.
- **Modo 5 – Multi-User MIMO - MIMO, separate UE:** Este modo constitui um caso especial do modo 3, no qual diferentes utilizadores vão possuir diferentes fluxos de dados. Este modo pode apresentar problemas de interferência entre UE caso as camadas espaciais utilizadas por cada um não sejam ortogonais entre si.
- **Modo 6 – Closed -loop Rank 1 with precoding:** Este modo é considerado o recuo do modo 4, é permitido *beamforming* e a informação é transmitida num único canal espacial.
- **Modo 7 – Single-antenna port; port 5 - MISO:** Modo de *beamforming* onde a mesma informação é enviada numa única camada espacial. Neste um sinal de referência dedicado forma um porto de antena adicional permitindo assim transmissões com mais de quatro antenas.

2.3.5. Ambientes de propagação

As características do canal sujeito a multipercurso podem ser descritas por uma combinação de um perfil de atraso de propagação, desvio de doppler e o efeito de múltiplas antenas num sistema MIMO, através da utilização de matrizes de correlação. Há quatro cenários de ambiente de propagação em LTE [6]:

- **Extended Pedestrian A (EPA)** – Abrange cenários com utilizadores pedestres com baixo perfil de mobilidade, até 3 km/h e desvio máximo de Doppler de 5 Hz.
- **Extended Vehicular A (EVA)** – Este modelo abrange cenários com utilizadores de veículos em movimento de até 50 km/h e desvio máximo de Doppler entre 5Hz e 70 Hz.
- **Extended Typical Urban (ETU)** – Este modelo abrange cenários com utilizadores em veículos com médio perfil de mobilidade, até 90 km/h e desvio máximo de Doppler entre 70Hz e 300 Hz.
- **High-Speed Train (HST)** – Utilizado em cenários com utilizadores em comboios com elevado perfil de mobilidade, de até 300 km/h e desvio máximo de Doppler é 750 Hz.

2.4. Conceitos gerais sobre Repetidores

Com o aumento do tráfego de dados e o aparecimento dos novos equipamentos, as operadoras sentem cada vez mais a necessidade de implementar a nova tecnologia de rede LTE. Mas isso implica custos elevados para as operadoras. Assim, a primeira questão de interesse para as operadoras é a forma de reduzir o custo e proporcionar uma boa cobertura e/ou capacidade se for o caso.

Neste sentido, o repetidor proporcionaria uma solução eficiente na redução do número de eNodeB's, mantendo o objetivo de aumentar consideravelmente a qualidade do serviço (QoS) e aumentar a cobertura da célula.

A utilização de um repetidor é uma solução de baixo custo para as operadoras, quando comparados com os custos associados a um eNodeB. Para além de possuírem custos de instalação (CapEx) e de operação e manutenção (OpEx) bastante inferiores, a instalação de repetidores não exige uma fase de planeamento tão rigorosa como a instalação de um eNodeB [13].

Um repetidor funciona como uma estação base, e usa a mesma tecnologia de acesso rádio da estação base para o repetidor, e do repetidor para a estação móvel [14]. É usado tipicamente para preencher lacunas de cobertura, tais como nas áreas de sombra, túneis, empresas e edifícios industriais, e onde o tráfego é muito baixo e que não justifica a instalação de uma estação base, como é o caso das zonas rurais devido a morfologia do terreno e densidade populacional. O Repetidor, cada vez mais, parece ser uma solução na melhoria de cobertura móvel na zona rural onde a fibra não está disponível. Uma configuração típica é mostrada na Figura 2.11.

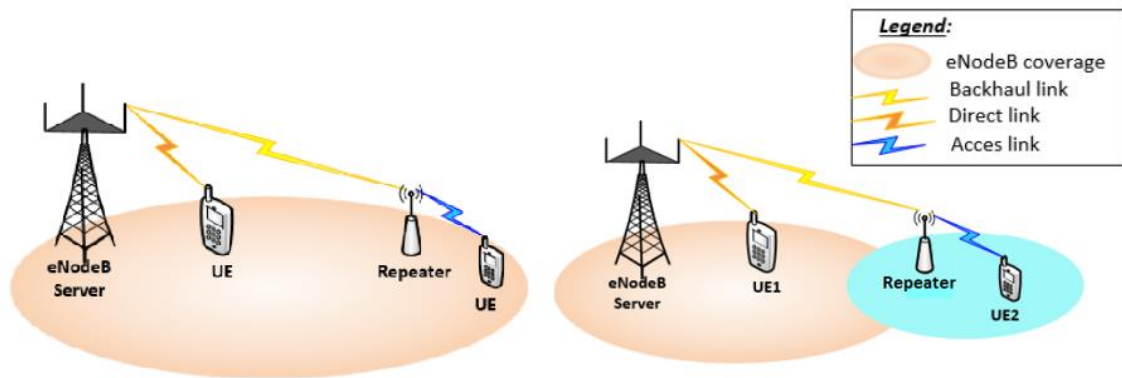


Figura 2.11 – Exemplo da aplicação de repetidor para cobertura (direita) e capacidade (esquerda), (adaptado de [15]).

O repetidor, de uma forma genérica é constituído por duas antenas e por um amplificador. O tipo de antena utilizada nos repetidores é normalmente assumido como sendo uma antena omnidirecional no entanto, é interessante considerar antena direcional orientada para as estações base, normalmente uma *YAGI*, a antena destinada à generalidade dos UEs pode ser omnidirecional.

As antenas devem ser colocadas preferencialmente costas com costas de forma a evitar fenómenos de realimentação.

Um repetidor consiste basicamente em amplificadores bidirecionais com filtro duplo, com duas antenas uma para a ligação com a estação base principal e outro para área de cobertura onde serve os utilizadores. Eles são chamados de *Donor antenna* e *Service antenna*, respetivamente.

O repetidor recebe um sinal da estação base através da antena doadora, filtra, amplifica o sinal e envia para a outra antena que serve os utilizadores, conforme se ilustra no diagrama de bloco da Figura 2.12.

A área de cobertura de um repetidor depende do ganho do próprio repetidor. Normalmente um repetidor encontra-se localizado nas células e é usada para melhorar a cobertura da célula e sua capacidade em determinadas áreas.

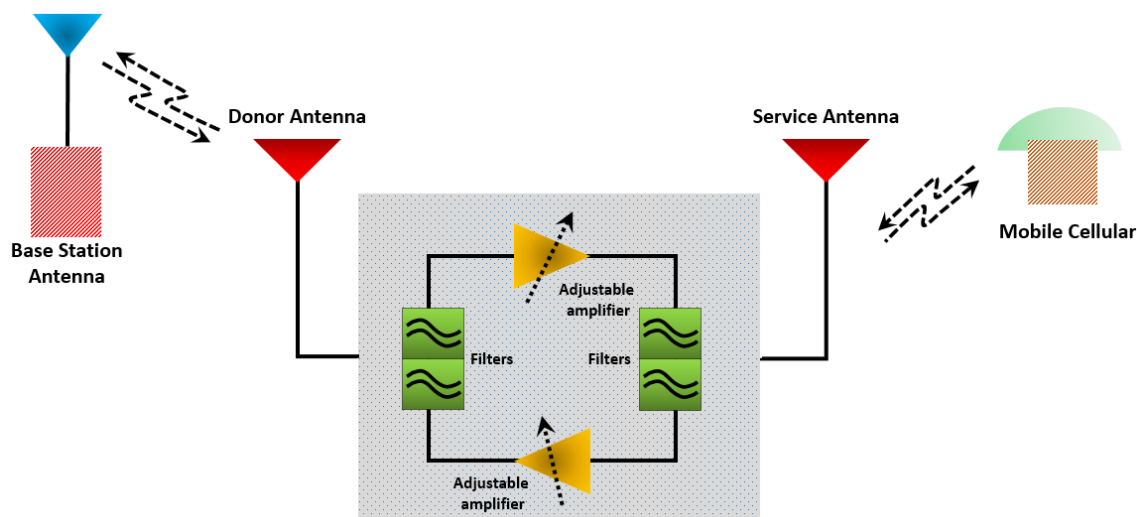


Figura 2.12 – Diagrama de bloco do repetidor (adaptado de [14]).

Uma questão importante no uso do repetidor é o controlo do ganho no qual é usado para amplificação aonde o sinal é encaminhado no DL e no UL. Se o ganho de repetidor é demasiado grande, existe uma elevada probabilidade de que os repetidores amplifiquem muita interferência no sistema. Por isso, é importante controlar o ganho do repetidor, a fim de otimizar o desempenho geral do sistema.

2.4.1. Tipos de Repetidores LTE

O repetidor amplifica o sinal de RF em ambos os sentidos de ligação UL e DL, ou seja, é um dispositivo que compensa a perda de propagação entre a antena da estação base e da estação móvel.

Os tipos de repetidores desenvolvidos e utilizados no sistema LTE, segundo [16] são:

- *Amplify-and-forward (AF) relay* ou às vezes designada de repetidor (Layer 1);
- *Decode-and-forward (DF) relay* ou Layer 2 relay;
- *Self-backhauling relay* ou Layer 3 relay.

Um repetidor AF é um tipo de repetidor que recebe o sinal da célula doadora amplifica-o e reencaminha para os utilizadores. É um repetidor transparente para o sistema e reencaminha o sinal sem saber se são sinais desejados, interferência ou ruído.

Para um repetidor DF este descodifica o sinal ao receber, só depois transmite para os utilizadores o que pode causar atrasos na entrega e requer maior RB.

Contudo, antes de definir os tipos de repetidores, é necessário olhar para os diferentes modos de operação.

Uma das características importantes de um repetidor LTE é a frequência de portadora que opera. O repetidor irá ligar à célula doadora (DeNB) utilizando um dos dois métodos existentes:

- **Inband** – Se a ligação entre o eNodeB e o repetidor (DeNB-RN) estejam na mesma frequência de portadora que a ligação entre o repetidor e o UE (RN-UE);
- **Outband** – A ligação entre o eNodeB e o repetidor operam com uma frequência portadora diferente da ligação RN-UE.

No que se refere, a escolha do tipo de repetidor a ser utilizado depende muito das características topográficas, morfológicas e do tipo de cobertura desejada, pois existem diferentes características associadas à introdução do repetidor no sistema. Para cada situação existe um tipo de repetidor com características que melhor irão atender aos objetivos do projeto.

Enquanto o repetidor *Inband* aumenta a cobertura, o repetidor *Outband* melhora a capacidade.

O repetidor pode ser classificado como transparente ou não transparente, um repetidor não transparente controla a sua própria célula como o caso do eNodeB, tem uma única *Cell identity* (CI) na camada física, são usados os mesmos mecanismos de *Radio Resource Management* como um eNodeB normal. Um repetidor não transparente pode ser classificado como tipo 1, tipo 1a e tipo 1b. Um repetidor transparente é a parte da célula doadora, não tem uma *Cell Id* separada, é classificada como sendo repetidor do tipo 2. Na Tabela 2.4 está identificadas as diferentes classes dos repetidores LTE.

Tabela 2.4 – Classes dos repetidores LTE, (extraído de [11]).

Classes dos repetidores LTE	Cell ID	Formato Duplex
<i>Type 1</i>	Yes	<i>Inband half duplex</i>
<i>Type 1.a</i>	Yes	<i>Outband full duplex</i>
<i>Type 1.b</i>	Yes	<i>Inband full duplex</i>
<i>Type 2</i>	No	<i>Inband full duplex</i>

Um repetidor *Type 1* pela definição é *half duplex*, e são incapaz de transmitir para o UE e receber do eNodeB doadora em simultâneo [17]. Este tipo de repetidor exige partilha de recursos entre a ligação *backhaul* e o eNodeB.

Os repetidores *full duplex*, por outro lado podem operar tanto como repetidor *outband* (*Type 1.a*) ou repetidor *inband* (*Type 1.b*) com a separação espacial, filtragem, ou cancelamento de interferência reforçada, exigindo portanto, a não partilha de recurso específico.

2.4.2. Isolamento de antena

O ganho das antenas do repetidor é limitado pelo isolamento, pelo que na instalação do repetidor deve ser considerado um valor de isolamento entre as antenas Tx e Rx (ver anexo F).

O Isolamento da antena é uma questão essencial para o melhor desempenho do repetidor, porque o sinal de eco da antena Tx para a antena Rx atua como interferência. Se o isolamento da antena não cumprir com os requisitos o repetidor passa a funcionar como um oscilador.

A Figura 2.13 apresenta uma ilustração de isolamento entre antenas Tx e Rx. Para o caso de instalação do repetidor *outdoor*, as perdas de percursos entre antena TX e RX é relativamente baixa.

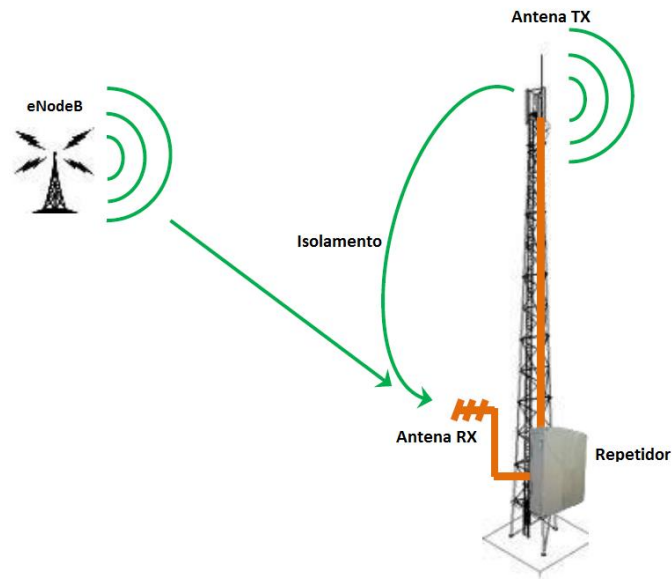


Figura 2.13 – Isolamento entre antenas do repetidor.

Segundo o fabricante *SELECOM* o algoritmo *Echo-CANCELLER* permite reduzir até 25 dB de estrangimento do isolamento entre as antenas RX e TX, para poder usar o repetidor com sua dinâmica completa de ganho. A opção de *Echo-Canceller* está disponível para UMTS e LTE.

3. Planejamento Celular em Redes LTE

Neste capítulo, pretende-se explicar o processo de planejamento de rede LTE relevante para esta tese.

O primeiro passo a ter em consideração quando se pretende efetuar o planejamento de uma rede, consiste em verificar o tipo de terreno e as condições de propagação, a capacidade de cobertura que se pretende, o número de utilizadores e sua respetiva distribuição geográfica na região de cobertura, densidade do tráfego por cada utilizador, características dos possíveis equipamentos que vão ser utilizados. Outros parâmetros relevantes devem ser equacionados, tais como: o custo, a qualidade do serviço, disponibilidade das portadoras e capacidade do sistema.

O resultado final deve ser a mínima densidade de estações base a ser instalada para evitar custos supérfluos, e um orçamento final justificável, para atender aos objetivos do projeto.

Um dos principais objetivos é garantir uma cobertura de 95% da zona proposta com um nível de sinal que garanta uma boa qualidade do serviço e uma capacidade que permita aos utilizadores utilizar os serviços.

3.1. Processo de planejamento em rede LTE

Planeamento significa construir uma rede capaz de fornecer o serviço para os clientes onde quer que estejam e evitar o excesso de interferência. Para planejar uma rede celular é preciso fazer um estudo da área em questão e criar uma base de dados com as informações geográficas, analisar a população na área de serviço, realizar simulações e análises utilizando cenários de propagação e ferramentas adequadas.

Este trabalho pode ser simplificado e estruturado em várias etapas de uma forma resumida conforme se ilustra no fluxograma da Figura 3.1.

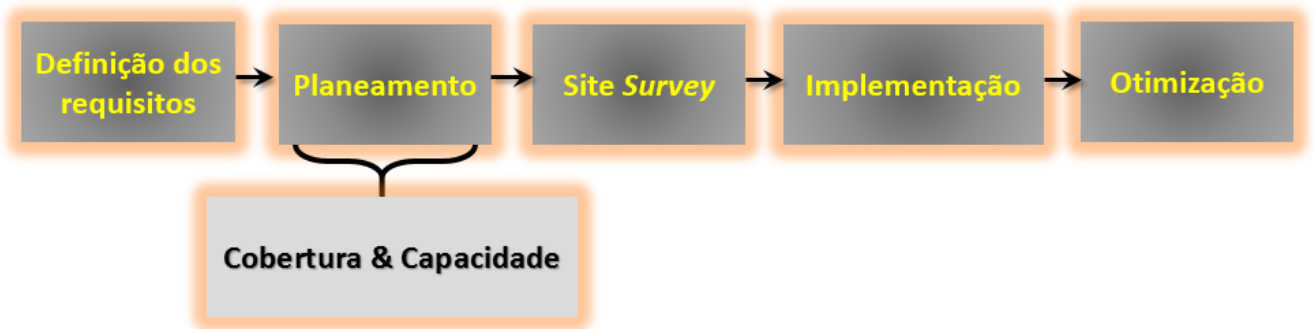


Figura 3.1 – Processo de planejamento em rede LTE.

O processo de planejamento em rede LTE segue os seguintes passos:

i. Definição dos Requisitos

O processo de planejamento celular inicia-se com a definição de alguns requisitos, nomeadamente análise de tráfego, cobertura e capacidade atual da rede caso seja uma rede já existente, tipo de tráfego. Partindo desta obtém a informação geográfica da rede, a capacidade esperada, o custo associado.

Apos a definição dos requisitos segue-se a fase do planeamento no qual é efetuado uma previsão de cobertura e capacidade partindo dos cálculos do *link budget*. Após verificar a capacidade calculada compara-se com a capacidade disponível para uma determinada largura de banda, após a comparação verifica se o número de eNodeB calculado satisfaz a necessidade de cobertura.

ii. Site Surveys

Após a previsão de cobertura e capacidade é preciso conhecer o tipo de terreno a planear, esta etapa é designada de *Site-Survey*. Consiste em conhecer o local e as condições onde poderá ser instalado as eNodeB's, e pode ser feito presencialmente ou através do mapa. Esta etapa permite identificar eventuais constrangimentos que possam existir nomeadamente o local de instalação, tipo de *hardware* e acessos. Esta etapa é um grande desafio visto que pode interferir diretamente nos *Key Performance Indicator* (KPIs), Cobertura e Capacidade.

iii. Implementação

Para atender a demanda de cobertura e capacidade da região a ser atendida vai ser preciso fazer um dimensionamento do equipamento (células e eNodeB's). Depois do dimensionamento é o momento de implementar o sistema ou seja iniciar o processo de instalação dos equipamentos. Depois de se identificar os potenciais locais a instalar os eNodeB's, recorre-se à ferramenta de planeamento de cobertura rádio apropriados.

iv. Otimização

A otimização visa a observação dos KPI das estações instaladas devido à carga que o sistema passará a receber após entrar em funcionamento, a fim de identificar eventuais melhorias a aplicar à configuração. Estas melhorias poderão ser um ajuste de potência, verificação de alguns parâmetros de rede, alteração do *tilt* e azimute das antenas ou ainda ativação de funcionalidades, que permitem ajustar a capacidade da estação base à densidade de tráfego existentes. Verificar o desempenho da rede comparado com os valores nominais aceitáveis. Análise de performance em termos de qualidade, eficiência e disponibilidade.

3.2. Qualidade de serviço

A qualidade de serviço disponibilizada pela rede na área de cobertura de uma célula, mais concretamente na sua periferia, depende diretamente da qualidade do sinal que um terminal consegue receber. Tal qualidade é medida como a razão entre a potência do sinal desejado e as potências de outros sinais interferentes e ruído, como por exemplo células vizinhas, outros terminais etc, sendo denominada tecnicamente de *Signal to Interference and Noise Ratio* (SINR).

O SINR condiciona a capacidade do terminal de interpretar corretamente a informação transmitida nos símbolos OFDM, ou seja, desmodular o sinal de forma a extrair o símbolo com uma taxa de erros, *Bit Error Rate* (BER), inferior a um determinado limiar de modo a manter a integridade da informação.

A qualidade inclui o *throughput* médio da célula e a probabilidade de bloqueio. Esses parâmetros são os requisitos usados pelos operadores para fornecerem um certo nível de serviço aos seus clientes.

3.3. Planeamento por Cobertura

O planeamento por cobertura é importante para garantir uma boa qualidade de sinal presente numa dada área de serviço. O processo de cobertura inclui a seleção do modelo de propagação baseado no tipo do terreno. Os modelos de propagação por si só não conseguem prever o comportamento de propagação do sinal de forma precisa, mas conseguem nos dar alguma precisão de como os sinais se comportam.

O dimensionamento de cobertura centra-se essencialmente no cálculo do *link-Budget*.

Nesta secção são apresentados os modelos de propagação utilizados para o planeamento de redes móveis celulares na faixa de frequência do LTE, sendo efetuado o *link budget* para se determinar a máxima atenuação permitida. O fluxograma da Figura 3.2 ajuda a perceber o dimensionamento de cobertura em LTE.

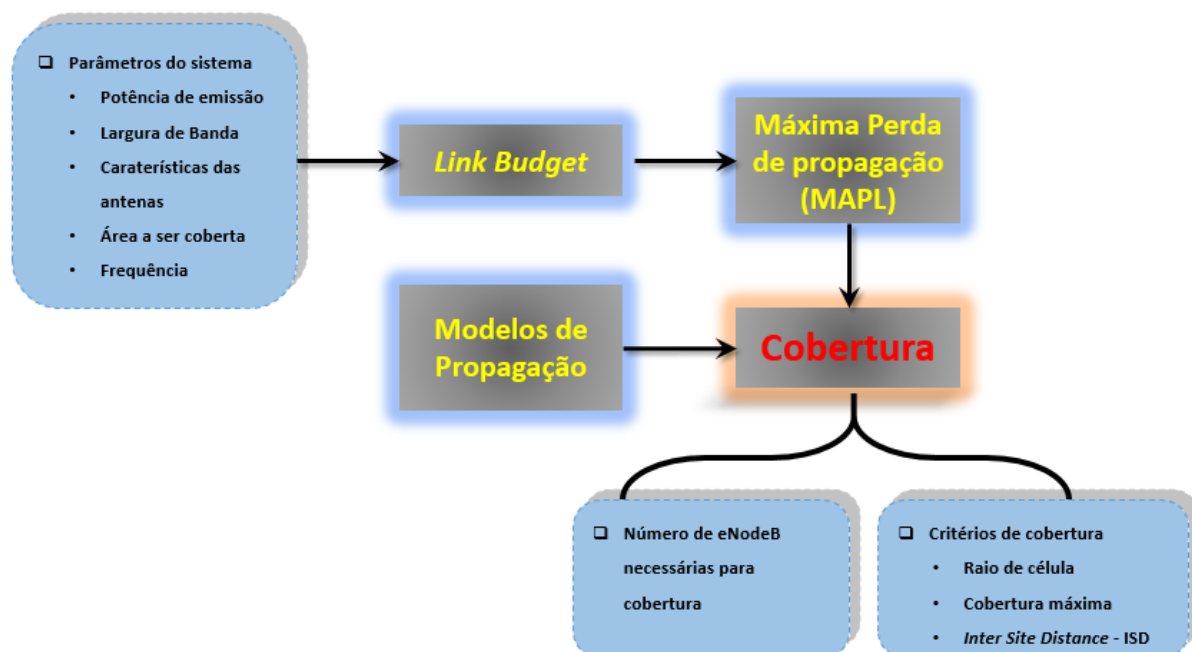


Figura 3.2 – Fluxograma do dimensionamento de cobertura em LTE.

Como se pode ver no fluxograma da Figura 3.2, para o cálculo do *link budget* um dos principais parâmetros de entrada é a potência de emissão, largura de banda, frequência, área a ser coberta se é *indoor* ou *outdoor* e as características das antenas. Através do *link budget* calcula-se a máxima perdas de propagação. Aplicando as estimativas obtidas através do MAPL ao modelo de propagação mais adequado, obtêm-se a dimensão das células que resulta no raio da célula, distância entre *sites*, a cobertura máxima e o número de eNodeB necessário para cobertura.

3.3.1. LTE Link Budget no uplink

Em LTE o *link budget* é utilizado para quantificar a perda máxima de propagação (MAPL) entre o emissor e o recetor em ambos os sentidos de propagação.

Os cálculos resultantes permitem determinar o dimensionamento de cobertura, nomeadamente o raio de célula, a distância entre *sites*, a área de cobertura do site e o número de sites necessários para a cobertura total, utilizando um modelo de propagação apropriado.

O *link budget* é composto por ganhos, margens e perdas de sinal observados desde a saída do módulo transmissor, através do andar amplificador, cadeia de transmissão (cabos, *duplexers*, etc.), chega às antenas de emissão, perdas no meio de propagação onde está sujeito a desvanecimento (*fast* e *slow fading*), *shadowing* (“sombras” causadas por obstáculos), interferência e ruído, chega às antenas de receção e cadeia de receção, até à entrada do módulo recetor. Para além destes parâmetros, o *link budget* inclui o limiar de sensibilidade do recetor, abaixo do qual não é possível manter a ligação ativa ou com a qualidade pretendida.

Há alguns fatores que influenciam o resultado do *link budget*, nomeadamente as características do ambiente, se é urbano denso, urbano ou rural, devido às reflexões que o sinal pode sofrer.

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

Os cálculos do *link budget* no UL são feitas de acordo com os seguintes parâmetros:

- *UE effective isotropic radiated* (EIRP_{UE}) ou a potência transmitida por RB;

- Sensibilidade recebida no eNodeB (S_{eNB});
- *Noise Rise* ou Margem de interferência no UL (IM_{UL});
- SINR no UL (γ_{target});
- Débito binário necessário por RB ($R_{req,UL,RB}$);
- Margem de desvanecimento log-normal (B_{LNF});
- *Uplink link budget Maximum Allowable Path Loss* (MAPL_{UL});
- Perdas devido ao corpo humano (L_{BL}).

O L_{BL} , são as perdas induzidas pelo utilizador que em serviços de voz representam cerca de 3 dB e em serviços de dados 0 dB. Esta diferença deve-se ao facto de que em dados, posição normal do equipamento móvel é estar afastado da cabeça do utilizador, a não ser que o utilizador está a fazer chamadas de *VoIP*.

Na Figura 3.3 podemos ver um exemplo do modelo do *link budget* em UL.

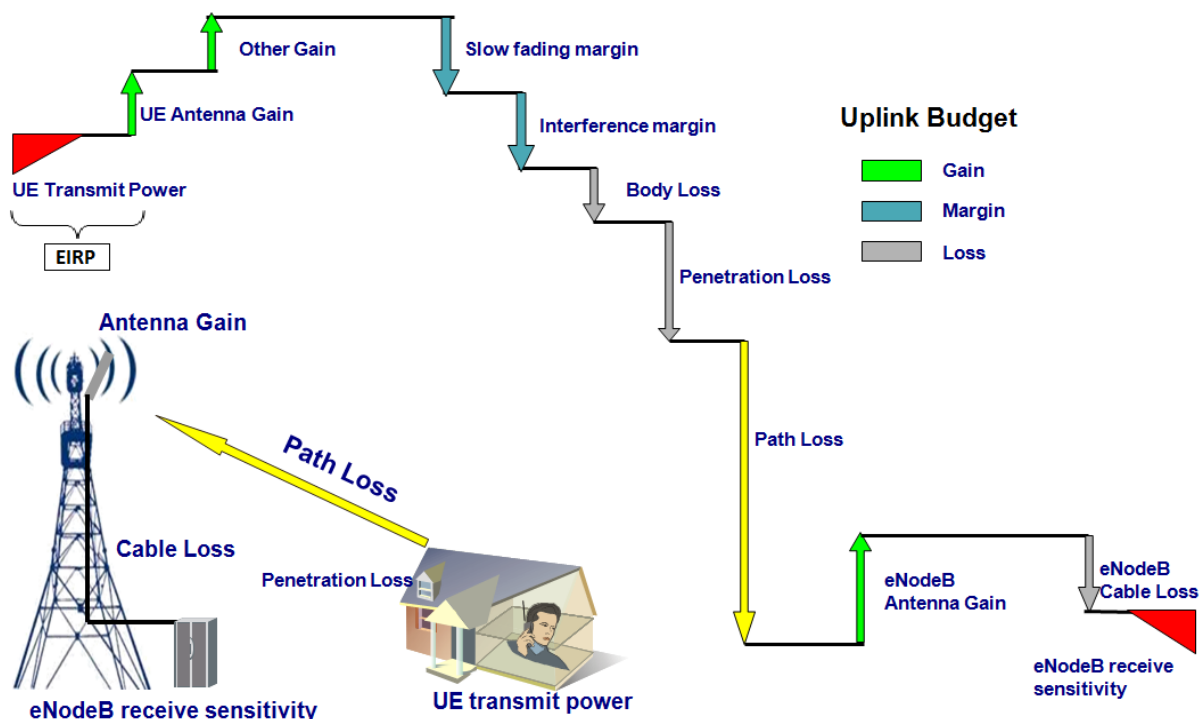


Figura 3.3 – Modelo do *Link Budget* em UL (Adaptado de [18]).

O alcance máximo de cobertura de uma célula em UL é determinado pela capacidade do eNodeB de receber o sinal proveniente do utilizador com qualidade suficiente quando este está a transmitir na potência máxima [19].

Define-se como sensibilidade de recepção do eNodeB, o limiar com que o sinal é recebido com uma qualidade que seja aceitável. A perda máxima de propagação em UL ($MAPL_{UL}$) é calculada com recurso à equação (3.1).

$$MAPL_{UL[\text{dB}]} = EIRP_{UE} - S_{eNB} + \sum G_a - \sum L_S - \sum M_{gs} \quad (3.1)$$

$$EIRP_{UE[\text{dBm}]} = P_{TxUE_RB} + G_{UE} \quad (3.2)$$

Para o cálculo do P_{TxUE_RB} no UL tipicamente é considerado a potência máxima do UE. Segundo [8] P_{TxUE_RB} corresponde à potência por RB. Assumindo que todos os blocos de recursos são alocado o mesmo valor de potência, a potência por RB é calculada com recurso à equação (3.3).

$$P_{TxUE_RB[\text{dBm}]} = P_{Tx,max_UE} - 10\log(n_{RB}) \quad (3.3)$$

Onde, P_{Tx,max_UE} corresponde a potência de transmissão do UE e n_{RB} o número de RBs, que varia consoante a largura de banda do canal. O S_{eNB} é a sensibilidade do eNodeB, G_a é o somatório do ganho da antena do eNodeB e outros ganhos. M_{gs} , é o somatório das margens de interferência e do desvanecimento log-normal, L_S é o somatório das perdas de penetração, *feeder*, cabos, *Body loss*, conectores, *jumpers* e *TMA*. O $EIRP_{UE_RB}$, corresponde ao EIRP do UE por RB.

$$S_{eNB[\text{dBm}]} = N_{RB_UL} + SINR_{UL} \quad (3.4)$$

$$N_{RB_UL[\text{dBm}]} = N_t + N_{feNB} + 10\log(BW_{RB}) \quad (3.5)$$

Onde, N_{RB_UL} corresponde ao ruído térmico por RB no *uplink*, o N_t corresponde à densidade do ruído térmico, BW_{RB} é a largura de banda por RB e o N_{feNB} é o factor de ruído do eNodeB expressa em dB, segundo [8] assume-se que é de 2.5 dB com a utilização do *Tower Mounted Amplifier* (TMA) e 3 dB sem TMA. O $SINR_{UL}$ é a relação sinal ruído mais interferência no UL.

Em LTE a densidade do ruído térmico é definida por KT , assumindo um valor de -174 dBm/Hz, valor esse que é calculada com base no constante *Boltzmann's* (K) (1.380662×10^{-23}) e T a temperatura do recetor em grau kelvin (ex: 290°k).

KTB representa o nível de ruído térmico de uma largura de banda B do ruído específico, onde $B = n_{RB} \times 180$ kHz, 180kHz corresponde a largura de banda de 1 RB [5] e n_{RB} corresponde ao número de RB.

No sistema LTE um utilizador não interfere com os restantes da célula visto que estes se encontram separados no domínio do tempo e da frequência. O aumento de ruído em UL depende apenas da interferência das células adjacentes. Desta forma, a margem de interferência no *link budget* vai compensar o ruído (*noise rise*) introduzido. No caso de um controlo de potência de malha fechada, a margem de interferência é obtida pela equação (3.6) [8].

$$IM_{UL[\text{dB}]} = 10\log_{10}\left(\frac{1}{1 - \gamma_{target} \times Q_{UL} \times F}\right) \quad (3.6)$$

Onde IM_{UL} , é a margem de interferência no UL, Q_{UL} é a carga média do sistema em UL, F é um ganho resultante da variação dos *tilts* elétricos da antena e foram obtidos a partir de simulações com um raio de célula fixo e para uma altura da antena de 30m para vários ângulos de tilt em que segundo [8], assume-se um valor de 0.7 para uma antena do eNodeB de 30m com um *tilt* elétrico de 6° (antena *kathrein 80010303* (0° – 14°)).

O γ_{target} é a relação sinal ruído mais interferência em UL, também dado pelo símbolo $SINR_{UL}$, pode ser calculado com recurso a equação (3.7) ou tipicamente obtido através de simulações no qual assume um valor de -7dB segundo [9], para um débito mínimo de 64 Kbps e para um eNodeB utilizando a tecnologia MIMO.

Tabela 3.1 – Exemplo do parâmetro F para sites tri-sectorizadas com 30 m de altura [8].

Raio da célula [m]	Tilt [°]									
	0.0	2.0	4.0	6.0	8.0	9.9	11.9	13.8	15.7	
500	0.0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	
1000	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	
2000	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	
5000	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	
Parâmetro F	1.1	0.9	0.8	0.7	0.7	0.6	0.5	0.4	0.4	

$$\gamma_{target} \text{ [dB]} = SINR_{UL} = a_1 - a_2 \sqrt{\ln\left(\frac{a_0 - a_3}{R_{breq,UL,RB} - a_3}\right) / \ln(2)}, \quad 0 \leq R_{RB} \leq a_0 \quad (3.7)$$

Em que a_0 , a_1 e a_2 são parâmetros semi-empíricos que dependem do tipo de canal de modulação se é EPA5, EVA70 ou ETU 300 Hz, segundo a Tabela 3.2. O parâmetro a_0 representa o débito binário máximo obtido por RB [8].

Tabela 3.2 – Parâmetros Semi – Empírico a_0 , a_1 , a_2 e a_3 para UL [8].

Modelo de canal / Frequência Doppler	EPA 5	EVA 70	ETU 300
a0 [kbps]	459.90	456.90	322.50
a1 [dB]	20.76	23.91	20.15
a2 [dB]	13.28	13.75	12.41
a3[kbps]	0.00	0.00	0.00

O dimensionamento começa com a definição dos requisitos de qualidade, que é expressa normalmente num débito binário mínimo que pode ser fornecido a um utilizador na fronteira da célula com uma determinada probabilidade, segundo [8], no UL pode assumir um valor de 500 kbps para uma probabilidade de cobertura de 95%. O débito binário necessário segue o serviço para qual o sistema está a ser dimensionado.

O $R_{breq,RB}$ é o débito binário mínimo por RB fornecido a um utilizador, dado pela equação (3.8), onde o n_{RB} é o número de RB's reservados para garantir esse débito e o R_{breq} é o débito binário requerido.

$$R_{breq,RB} \text{ [kbps]} = \frac{R_{breq}}{n_{RB}} \quad (3.8)$$

Na prática, o n_{RB} é selecionado pelo escalonador, num TTI de 1ms. No exercício de dimensionamento, o número de RB pode ser selecionado livremente, guiado pela experiência e compreensão do sistema, dentro das limitações de largura de banda total oferecido. Para um valor de n_{RB} elevado vai resultar num débito maior, visto que existe um

maior número de recursos (Tabela 2.3) disponíveis levando a um aumento de capacidade [8].

A margem de desvanecimento log-normal (B_{LNF}) vai modelar a área de cobertura para uma determinada probabilidade de cobertura, que normalmente é especificado como uma probabilidade de cobertura no limite da célula. Ao acrescentar esta margem, a probabilidade de estabelecer e manter uma ligação é garantida para uma determinada qualidade.

Tipicamente são de 90% e 75% de probabilidade de cobertura na fronteira. Atingir os 90% de cobertura no limite da célula significa que 90% dos locais estão cobertos acima da sensibilidade mínima.

A Tabela 3.3 mostra as margens de desvanecimento em dB para diferentes valores de desvio padrão σ , do processo de desvanecimento log-normal e diferentes probabilidades de cobertura e ambiente de propagação [8], dependendo também da área de cobertura se é *indoor* ou *outdoor*.

Existem outras perdas adicionais a ter em conta no cálculo de MAPL nomeadamente a perda de penetração outdoor, as perdas de *jumper*, perdas do cabo. Tipicamente o diâmetro dos cabos usados é de 7/8 e 15/8 e corresponde a uma atenuação de 6.15dB/100m e 3.84dB/metros.

Tabela 3.3 – Margem de desvanecimento para diferentes valores de desvio padrão (extraído de [8]).

Ambiente de propagação	σ dB]	Probabilidade de Cobertura [%]				
		98	95	90	85	75
Rural, Suburbano	6	5.5	2.9	0.5	-1.2	-3.7
Urbano	8	8.1	4.9	1.8	0.2	-3.4
Denso urbano e suburbano indoor	10	10.6	6.7	3.1	0.6	-3.1
Urbano Indoor	12	13.1	8.4	4.2	1.3	-3.1
Denso urbano indoor	14	15.3	9.9	5.1	1.8	-3.2

As perdas de penetração refere-se quando o UE se encontra dentro do edifício, a Tabela 3.4 mostra as perdas para diferentes classes morfológicas.

Tabela 3.4 – Perdas de penetração (adaptado de [20]).

Tipo	Perdas de Penetração [dB]	
Frequência [MHz]	900	2600
Rural	8	8
Suburbano	12	13
Urbano	16	17
Urbano Denso	18	20

Na Tabela 3.5, estão mencionados os parâmetros do UE utilizados nos cálculos do *link budget* e na configuração do UE.

Tabela 3.5 – Parâmetros de configuração do UE.

Parâmetros do UE	
Potência máxima de transmissão do UE [dBm]	23
Altura do UE [m]	1.5
Categoria	3
Modelo de canal	EPA 5
Configuração da antena	SIMO Tx-1, Rx-2

3.3.2. LTE Link Budget no downlink

O *link budget* em DL permite calcular o débito oferecido na fronteira da célula para a ligação eNB-UE e determinar o limite da ligação.

Para os cálculos do *link budget* em DL, de acordo com [8], é necessário calcular:

- A máxima perdas de propagação em UL;
- O débito binário necessário;
- A potência por RB;
- A margem de interferência em DL;
- Sensibilidade recebida no UE;
- Débito binário no limite da célula.

A Figura 3.4 apresenta o exemplo do percurso do *link budget* numa ligação descendente.

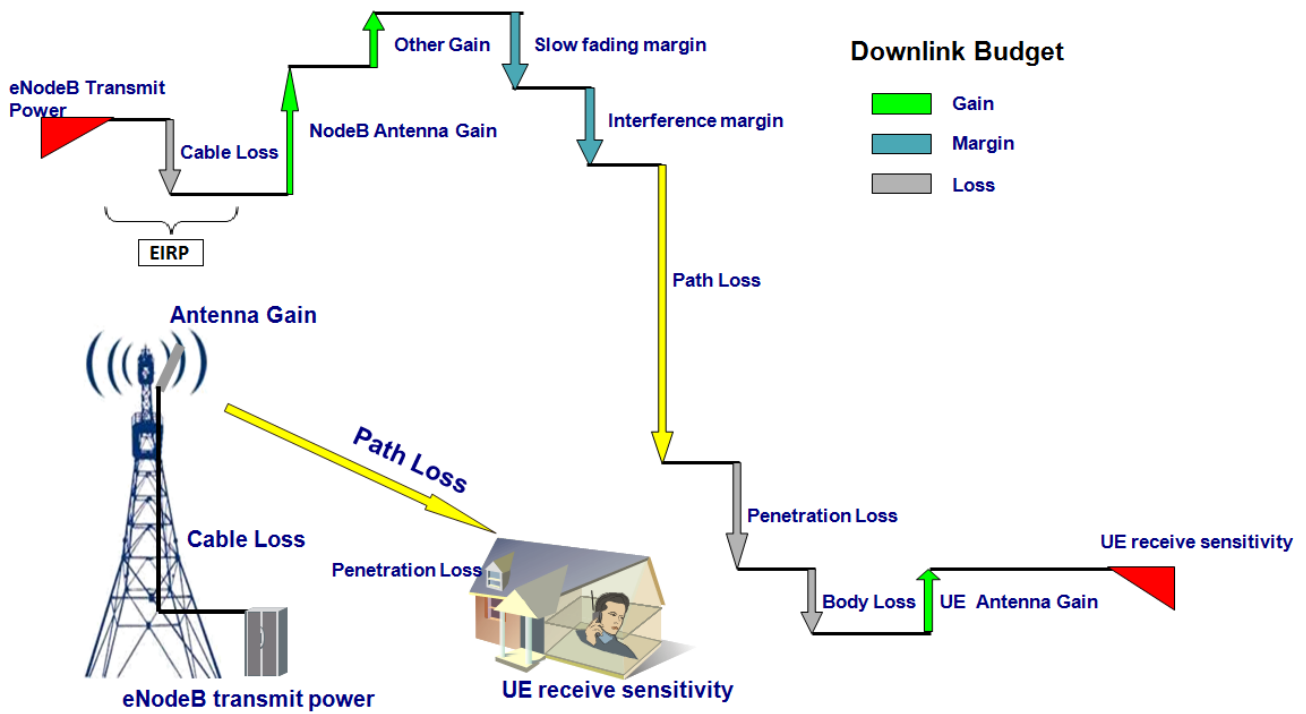


Figura 3.4 – Modelo do *Link Budget* em DL (adaptado de [18]).

A máxima perdas de propagação calculada em UL vai servir como parâmetro inicial para o cálculo do *link budget* no DL.

$$MAPL_{DL[db]} = EIRP_{DL} - S_{UE} - B_{LNF} - IM_{DL} - L_{BL} - L_{CPL} - L_j \quad (3.9)$$

$$EIRP_{DL[dbm]} = P_{txeNB, RB} - L_{Cab} + G_{eNB} \quad (3.10)$$

onde,

- $MAPL_{DL}$ → Atenuação de propagação máxima em DL;
- $P_{txeNB, RB}$ → Potência de emissão por RB no ponto de referência do sistema;
- S_{UE} → Sensibilidade do móvel;
- IM_{DL} → Margem de interferência em DL;
- L_{BL} → Perda por penetração em edifícios, mais propriamente para a zona urbana;
- G_{eNB} → Ganho da antena do eNodeB;
- L_j → Perdas dos *jumpers* e de inserção do TMA [dB].

Segundo [8], a potência em LTE é partilhada por todos os RBs, isto é, assume que todos os RB's são atribuídas as mesmas quantidades de potência, como tal, não existe controlo de potência para cada RB. Em vez disso os utilizadores são escalonados a um ritmo elevado, a cada milissegundo. A potência transmitida pelo eNodeB ou a potência radiada por RB e a sensibilidade do móvel são dadas pelas equações (3.11) e (3.12) respetivamente.

$$P_{txeNB,RB}_{[dBm]} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{nom,ref}}{n_{RB}} \right) \quad (3.11)$$

$$S_{UE}_{[dBm]} = N_{RB,DL} + SINR_{DL} = N_t + N_{fUE} + 10 \log(W_{RB}) + SINR_{DL} \quad (3.12)$$

onde,

- $N_{RB,DL}$ → Ruído térmico por RB em DL;
- N_t → Densidade do ruído térmico (-174 dBm/Hz);
- N_{fUE} → Figura do ruído do UE [dB];
- W_{RB} → Largura de banda por RB (180 kHz);
- S_{UE} → É a sensibilidade do UE;
- $N_{RB,DL}$ → Ruído térmico por RB em DL [dBm];
- $SINR_{DL}$ → SINR na fronteira da célula.

A $P_{nom,ref}$ é o somatório das potências nominais de todas as unidades rádios da célula.

O cálculo da SINR na fronteira da célula inclui a perda de propagação no UL ($MAPL_{UL}$) e é calculada recorrendo à equação (3.14).

$$SINR_{DL}_{[dB]} = P_{txeNB,RB} - MAPL_{UL} - N_{RB,DL} - IM_{DL} - B_{LNF} - L_{BL} - L_{CPL} - L_{BPL} + G_a - L_j \quad (3.13)$$

O ruído térmico é definida pela equação (3.4), diferenciando no fator de ruído (N_{fUE}), que é de 7dB para o DL, de acordo com [8].

A margem de interferência no DL (IM_{DL}), no limite da célula, vai depender da potência de transmissão do eNodeB por RB, da carga do sistema, da atenuação do sinal no limite da célula e do ruído térmico, como se pode ver pela equação (3.14).

$$IM_{DL[dB]} = 10 \log_{10} \left(1 + \frac{P_{txeNB, RB} * Q_{DL} * F_c}{N_{RB, DL} * L_{range}} \right) \quad (3.14)$$

O L_{range} , corresponde à perda do sinal no limite da célula, Q_{DL} é a carga do sistema no DL, e quanto maior for a carga no sistema maior será a margem de interferência e F_c é o factor que corresponde a razão entre a potência recebida das outras células em relação à da célula servidora na fronteira da célula.

Os valores utilizado para o cálculo encontra-se na Tabela 3.6, tendo em conta uma antena tri-sectorizadas com 30m de altura. Esses valores são baseados no sistema de simulações [8].

Considerando uma antena com um *tilt* de 6° o parâmetro F_c vai ser de 2.3.

Tabela 3.6 – Parâmetro F_c no limite da célula variando o *tilt* (extraído de [8]).

Raio da célula [m]	Tilt [°]									
	0.0	2.0	4.0	6.0	8.0	9.9	11.9	13.8	15.7	
500	0.0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	
1000	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	
2000	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	
5000	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	
Parâmetro F_c	2.8	2.7	2.5	2.3	2.1	1.8	1.6	1.5	1.4	

Para antena com altura diferente de 30m o *tilt* corresponde ao *tilt* equivalente (θ_{eq}), é dada pela equação (3.15), é calculado fixando o raio da célula nos 1000m e altura de antena de 30m variando o *tilt* (θ).

$$\theta_{eq} = \theta \frac{d_{max}}{1000} \frac{30}{h_{eNB}} \quad (3.15)$$

Onde, d_{max} , é obtida através da perda de propagação máxima, h_{eNB} é a altura da estação base.

Tal como foi definido no UL a margem de desvanecimento log-normal no DL depende da probabilidade de cobertura, do ambiente de propagação e do desvio padrão, conforme se ilustra na Tabela 3.3. Por exemplo num ambiente rural para uma probabilidade de cobertura de 95% apresenta uma margem de desvanecimento de 2.9 dB.

A atenuação do sinal no limite da célula no DL é calculada com recurso a equação (3.16). Essa perda no limite da célula vai permitir calcular a margem de interferência no DL.

$$L_{range}_{[dB]} = MAPL_{UL} + L_{BL} + L_{CPL} + L_{BPL} - G_a + L_j \quad (3.16)$$

O SINR estimado no limite da célula, dada pela equação (3.13) vai definir o débito oferecido por RB em kbps, equação (3.17).

O débito resultante é assim multiplicado pelo número de RBs de acordo com a largura de banda oferecida, resultando no débito máximo oferecido na fronteira da célula, equação (3.20).

$$\begin{cases} R_{RB}_{[kbps]} = a_3 + (a_0 + a_3) \exp^{-\ln(2) \times \left[\frac{SINR_{DL} - a_1}{a_2} \right]^2}, & SINR_{DL} < a_1 \\ R_{RB}_{[kbps]} = a_0, & SINR_{DL} \geq a_1 \end{cases} \quad (3.17)$$

$$a_{0[kbps]} = a_{0,max} \times \left(1 - \frac{n_{PDCCH}}{14} - \frac{n_{ant}}{28} - \frac{48 - n_{ant}}{140 \times n_{RB}} \right) \quad (3.18)$$

$$a_{3[kbps]} = a_{3,max} \times \left(1 - \frac{n_{PDCCH}}{14} - \frac{n_{ant}}{28} - \frac{48 - n_{ant}}{140 \times n_{RB}} \right) \quad (3.19)$$

$$R_{max,RB}_{[Mbps]} = R_{RB} \times n_{RB} \quad (3.20)$$

De acordo com [8] os parâmetros a_1 , $a_{3,max}$, a_2 e $a_{0,max}$, são parâmetros semi-empíricas, que dependem do tipo de canal de modulação se é EPA5, EVA70 ou ETU 300 Hz e do tipo de antena (n_{ant}), se é SIMO 1x2, Tx div 2x2 ou OLSM 2x2.

O n_{PDCCH} é o número de símbolos alocados para PDCCH, e varia entre 1 a 3 para larguras de banda maiores do que 1.4 MHz e 2 a 4 para 1.4 MHz.

Tabela 3.7 – Parâmetro Semi – Empíricas a1, a3,max, a2 e a0,max no DL [8].

Configuração das Antenas	SIMO 1x2			Tx div 2x2			OLSM 2x2		
	EPA	EVA	ETU	EPA	EVA	ETU	EPA	EVA	ETU
Modelo de canal / Frequência Doppler	5	70	300	5	70	300	5	70	300
a0,max [kbps]	912.10	912.4	799.9	914.2	913.8	887.7	1583.8	1409.5	1162.8
a1 [dB]	27.00	29.3	27.75	25.92	27.17	27.70	34.03	34.99	31.93
a2 [dB]	16.03	15.9	15.34	16.01	15.38	15.49	18.37	18.16	16.84
a3, max [kbps]	-10.50	-4.4	-5.3	-16.2	-6.40	-7.30	-18.60	-10.20	-8.40

A partir do valor do débito binário calculado, para o limite da célula é possível observar se a ligação é limitada por UL ou por DL isto porque, caso o débito binário calculado for superior ao débito oferecido, R_{breq} , a ligação é limitada por UL e o *link-budget* está terminado. Caso contrário a ligação é limitada por DL, neste caso vai ser preciso recalcular o raio máximo da célula, através do valor de R_{breq} , e os restantes parâmetros do *link-budget* no DL [8].

3.3.3. Modelo de Propagação

A propagação nos serviços móveis é afetado pelas condições atmosféricas, pela topografia e morfografia do terreno, o que muitas das vezes temos que escolher o modelo de propagação adequado a utilizar. Através do modelo de propagação e com base no MAPL, que é estimado o raio de cada célula ou seja, o alcance máximo de uma ligação rádio, a distância entre os *sites* e o número das células necessárias para servir uma determinada área.

A aplicação de modelos com uma componente empírica requer a classificação de ambientes. É usual distinguir três grandes categorias:

- Rural;
- Suburbano;
- Urbano.

Existem vários tipos de classificações, geralmente associadas a modelos de propagação distintos. A classificação de ambientes considera, entre outros, os seguintes parâmetros:

- Ondulação do terreno;

- Densidade da vegetação;
- Densidade e altura dos edifícios;
- Existência de áreas abertas;
- Existência de superfícies aquáticas.

Os modelos de propagação usados atualmente são modelos híbridos e contemplam as perspectivas empíricas e teóricas.

Os modelos apresentados são os mais utilizados no planeamento de sistemas celulares e é baseado em fórmulas empíricas, derivadas a partir de medidas experimentais.

❖ Modelo de *Okumura-Hata*

Okumura apresenta os resultados sob a forma de curvas. Hata em 1980 estabeleceu expressões que aproximam algumas dessas curvas. Foram realizados dois testes em larga escala entre 1962 e 1965 com várias estações emisoras transmitindo em várias bandas numa grande variedade de ambientes de propagação, tentando explorar os fatores fundamentais que influenciam a propagação desde a morfologia do terreno à existência de edifícios, orientação das ruas, existência de superfícies abertas, superfícies aquáticas, etc... [21].

O modelo Okumura-Hata é utilizado no planeamento de redes celulares para prever o comportamento do canal na banda dos [150, 2000] MHz, para raios de célula entre 1 e 20 km.

Uma vez que LTE já opera nos 800MHz, este modelo é útil no planeamento do sistema. A fórmula geral é dada pela equação (3.21).

$$MAPL_{[dB]} = A + B \times \log(d_{[km]}) + C \quad (3.21)$$

Em que A é o parâmetro de atenuação, pode ser considerada de acordo com a Tabela 3.8, consoante a frequência utilizada e o ambiente de propagação, ou calculado com recurso a equação (3.22) e B é dado pela equação (3.23).

Tabela 3.8 – Atenuação A baseado no modelo de Okumura-Hata (adaptado de [8]).

Ambiente	Parâmetro de atenuação – A								
	Frequência [MHz]	700	850	900	1700	1800	1900	2100	2600
Urbano	144.3	146.2	146.8	153.2	153.8	154.3	155.1	157.5	
Suburbano	133.5	136.1	136.9	145.4	146.2	146.9	147.9	151.1	
Rural	125.1	127	127.5	133.6	134.1	134.6	135.3	137.6	
Aberto	116.1	117.8	118.3	123.8	124.3	124.8	125.4	127.5	

$$A = 69.55 + 26.16 \log(f_c) - 13.82 \log(h_{BS}) - \alpha(h_{UE}) \quad (3.22)$$

$$B = 44.9 - 6.55 \log(h_{BS}) \quad (3.23)$$

onde,

- f_c → Frequência central da portadora, em que $f_c \in [400, 1500]$ MHz;
- d → Distância entre eNodeB e UE, em que $d \in [1, 20]$ km;
- h_{BS} → Altura do eNodeB, em que $h_{BS} \in [30, 200]$ m;
- h_{UE} → Altura da antena do UE, em que $h_{UE} \in [1, 10]$ m, tipicamente usa 1.5m;
- $\alpha(h_{UE})$ → Fator de correção da altura da antena do UE, expressa em dB.

A variável C e o parâmetro $\alpha(h_{UE})$, dependem do tipo do ambiente considerado para o planejamento.

- **Ambiente Urbano**

Num ambiente urbano com a existência dos edifícios, estes vão provocar a existência de numerosos raios refletidos causando desvanecimento, e de zonas onde a atenuação é grande. A atenuação e reflexão variam de acordo com os materiais de construção.

Devido a estas características, a tarefa de aferição do modelo de propagação com base em medidas reais é extraordinariamente dificultada, pelo que ocorrem sempre desvios significativos entre a previsão de sinal e a realidade posteriormente implementada [21].

$$\alpha(h_{UE}) = \begin{cases} 3.2[\log(11.75 \times h_m)]^2 - 4.97, & f \geq 400\text{MHz}, \text{Urbano denso} \\ [1.1 \log(f_{c[\text{MHz}]}) - 0.7] h_{UE} - [1.56 \log(f_{c[\text{MHz}]}) - 0.8], & \text{Urbano} \end{cases} \quad (3.24)$$

$C = 0$

- **Ambiente Suburbano:**

$$\alpha(h_{UE})_{[\text{dB}]} = [1.1 \log(f_{c[\text{MHz}]}) - 0.7] h_{UE} - [1.56 \log(f_{c[\text{MHz}]}) - 0.8] \quad (3.25)$$

$$C_{[\text{dB}]} = 2 \left[\log\left(\frac{f_c}{28}\right)^2 - 5.4 \right] \quad (3.26)$$

- **Ambiente Rural:**

$$\alpha(h_{UE})_{[\text{dB}]} = [1.1 \log(f_{c[\text{MHz}]}) - 0.7] h_{UE} - [1.56 \log(f_{c[\text{MHz}]}) - 0.8] \quad (3.27)$$

$$C_{[\text{dB}]} = 18.33 \log(f_{c[\text{MHz}]}) - 4.78 [\log(f_{c[\text{MHz}]})]^2 - 40.98 \quad (3.28)$$

Rescrevendo a equação (3.21) em ordem à distância (d), resulta na expressão para o cálculo do raio da célula, de acordo com a equação (3.29).

$$R_{[\text{km}]} = d = 10^{\frac{MAPL - A - C}{B}} \quad (3.29)$$

Tendo o raio da célula consegue-se calcular a distância entre as estações base, e a área de cobertura da célula. O raio da célula vai permitir estimar o número de estações base necessárias para dar cobertura a uma determinada área geográfica.

3.3.4. Área de cobertura

Obtido o raio da célula, poderemos aferir a área de cobertura de cada estação base em função da sua configuração, se é Omnidirecional ou tri-sectorizada e a distância entre os mesmos, com recurso às equações apresentadas na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 – Equação para o cálculo da área do site e distância entre sites.

	Omni	2-Sectores	3-Sectores
Área do site	$2.6 \times d^2$	$1.3 \times d^2$	$1.95 \times d^2$
Intersite_distance (ISD)	$0.87 \times d$	$2 \times d$	$1.5 \times d$

A estrutura da célula pode ser circular ou hexagonal. Ambos são a representação ideal, onde a célula circular dá análise mais simples e hexagonal dá cobertura local mais adequado, sem lacunas no meio.

Sites tri-setorizadas são comumente usados para oferecer cobertura 3G e este é também o caso de LTE. A Figura 3.5 representa um exemplo do dimensionamento do raio da célula e distância entre estações base.

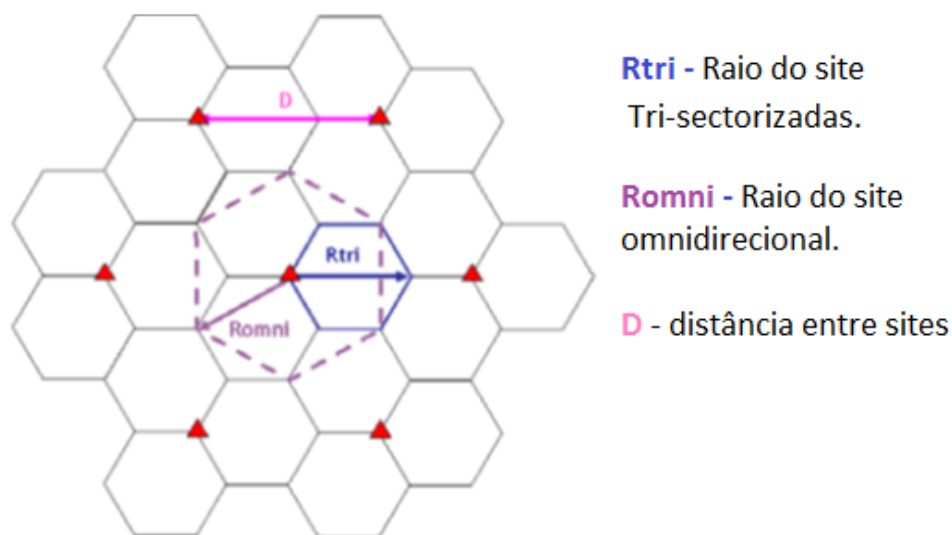


Figura 3.5 – ISD e área do eNodeB (extraído de [19]).

Tendo a área de cobertura da estação base, calcula-se o número total da estação base necessário para a cobertura na área pretendida através da equação (3.30).

$$N_{total_eNB} = \frac{\text{Área total [km}^2\text{]}}{\text{Área Site [km}^2\text{]}} \quad (3.30)$$

3.4. Planeamento por Capacidade

O planeamento de capacidade permite obter informação acerca do dimensionamento dos eNodeB's e da carga da célula. A capacidade é o número de ligações que o canal pode suportar sem degradar indevidamente os serviços realizados no canal.

A densidade populacional e o tráfego dos utilizadores são os principais requisitos para o planeamento da capacidade.

Sabendo a capacidade da célula, é possível estimar o número de utilizadores por eNodeB, através do volume de tráfego mensal ou débito binário oferecido.

Para determinar a capacidade de uma célula é necessário considerar inúmeros fatores que incluem a densidade populacional a utilizar o serviço, o tráfego diário do utilizador, nível de interferência e esquemas de modulação e codificação usados. A avaliação da capacidade necessária no processo de planeamento deverá compreender as seguintes tarefas [22]:

- Ser capaz de estimar o débito/capacidade da célula correspondente às configurações usadas para o cálculo do raio de célula;
- Analisar estatísticas de tráfego previsto incluindo número de utilizadores (U), tipo de tráfego, densidade de tráfego, tráfego diário ou mensal, etc.

De seguida é calculado a capacidade do tráfego agregado. No caso da capacidade do tráfego agregado seja superior à capacidade fornecida pela estação base da célula, é necessário fazer algumas reconfigurações de modo a se conseguir uma capacidade da célula capaz de suportar as necessidades dos utilizadores. Na Tabela 3.10 encontra-se algumas características da área de cobertura utilizada para o dimensionamento da capacidade.

Tabela 3.10 – Características principais da área de cobertura.

Características	Área de cobertura
Morfologia	Rural
Área [km ²]	137.6
População –Total [hab]	7000
Densidade Populacional [hab/ km ²]	51

3.4.1. Capacidade em uplink

O dimensionamento da capacidade dá uma estimativa dos recursos necessários para disponibilizar tráfego numa célula, com um determinado nível de qualidade de serviço (QoS).

O planeamento de capacidade tanto no DL como no UL é calculado partindo do tráfego diário por utilizador, do tráfego na *busy hour* e no fator de carga. No LTE, o principal indicador da capacidade é a distribuição de SINR na célula. Segundo [23] o tráfego mensal por utilizador em África é de 298 *Mbyte*, o que corresponde a um tráfego diário por utilizador de 919.75 bps (T_U).

Para determinar a estimativa do tráfego total, tem que se ter em conta o número total de utilizador (U) a servir e é dada pela equação (3.31). Para um planeamento mais conservativo, i.e., deve ser considerando o período de maior ocorrência do tráfego para que, durante este período, a rede de comunicações não entre em sobrecarga.

$$T_{total[\text{Mbps}]} = U \times T_U \quad (3.31)$$

A probabilidade de que todas as células do sistema estejam completamente carregadas na mesma altura é muito baixa. Deste modo, para determinar a capacidade em UL, é necessário efetuar o cálculo do SINR e do débito máximo de cada célula.

O método de dimensionamento por capacidade permite obter a capacidade máxima que pode ser suportada momentaneamente por uma célula, dado a carga do sistema das células adjacentes.

O débito binário médio por utilizador por célula no UL ($R_{avg,UL}$), é dimensionado de forma proporcional ao número de RB correspondente à largura de banda utilizada.

Em UL um ou mais blocos de recursos são reservados para o canal PUCCH, para os utilizadores que se encontram em modo *idle*. Por esta razão, segundo [8], o número de RB

disponível em UL para o cálculo da capacidade são reduzido pelo número de PUCCH que é de 4, o mesmo acontece com o canal PRACH, que é de 0.6.

Em UL a capacidade é calculada partindo da equação (3.32), que corresponde ao débito binário médio.

$$R_{avg,UL} [\text{kbps}] = R_{RB,UL} \times (n_{RB} - n_{PUCCH} - n_{PRACH}) \quad (3.32)$$

O débito binário por RB ($R_{RB,UL}$) é idêntico ao débito binário correspondente ao SINR e o número de RB alocados, equação (3.8). Para a obtenção da SINR é usado a mesma abordagem utilizada no planeamento de cobertura, ou seja, a SINR é estimada para a fronteira da célula, equação (3.7).

Tendo o débito binário médio em UL e considerando a carga Q_{UL} , a capacidade média da célula em UL (T_{cell}) é dada pela equação (3.33) [8].

$$T_{cell} [\text{kbps}] = Q_{UL} \times R_{avg,UL} \quad (3.33)$$

A capacidade do *site* (T_{site}) é o múltiplo da capacidade média da célula, no qual depende do número de célula por site. Para uma célula omnidirecional a capacidade do *site* é dada pela equação (3.34) e no caso de uma célula com 3 sectores é dada pela equação (3.35) [38].

$$T_{site} [\text{kbps}] = T_{cell} \quad (3.34)$$

$$T_{site} [\text{kbps}] = 3 \times T_{cell} \quad (3.35)$$

Tendo o tráfego total e a capacidade do *site*, obtém-se o número de eNodeB necessário para cobertura de capacidade, com recurso à equação (3.36).

$$N_{eNB} = \frac{\text{Tráfego total}}{\text{Capacidade do eNodeB}} = \frac{T_{total}}{T_{site}} \quad (3.36)$$

3.4.2. Capacidade em Downlink

Da mesma forma que foi calculada a capacidade no UL também é necessário calcular a capacidade no DL, mas neste caso o SINR considerado não é na fronteira da célula mas sim o SINR médio da célula ($SINR_{ave}$), sendo assim é necessário definir a margem de interferência média, com recurso à equação (3.37).

$$IM_{DL[dB]} = 1 + \frac{P_{txeNB, RB} \times Q_{DL} \times F}{N_{RB, DL} \times L_{range}} \quad (3.37)$$

Onde, L_{range} , corresponde à perda do sinal no limite da célula, dada pela equação (3.16).

$$SINR_{ave[dB]} = \frac{P_{tx, RB}}{IM_{DL} \times N_{RB, DL} \times H \times L_{range}} \quad (3.38)$$

Onde, o parâmetro H corresponde ao fator de atenuação média. H vai representar a relação entre a atenuação média do sinal da célula de serviço e a atenuação média do sinal a uma determinada distância da antena do eNodeB. Este fator vai depender da geometria do *site*, do diagrama de radiação da antena, do expoente de propagação do sinal e da altura da antena do eNodeB, de acordo com [8] o valor recomendado é de 0.36.

O débito binário médio, tal como em UL dependem do número de RB e do débito por RB em DL e é dada pela equação (3.39), onde o número de RB disponível é reduzido pelo número de PDCCH que varia entre 1 a 3 para largura de banda maior do que 1.4 MHz e entre 2 a 4 para largura de banda de 1.4MHz.

$$R_{avg, DL[kbps]} = R_{RB, DL} \times (n_{RB} - n_{PDCCH}) \quad (3.39)$$

O débito binário por RB em DL ($R_{RB, DL}$) é dada pela equação (3.17). A capacidade da célula em DL depende da carga do sistema e é calculada com recurso à equação (3.40).

$$T_{cell, DL[kbps]} = Q_{DL} \times R_{avg, DL} \quad (3.40)$$

A capacidade da estação base no DL também depende do tipo de célula a ser utilizado. Para célula omnidirecional baseia-se na equação (3.41) e para células com 3 sectores baseia-se na equação (3.42).

$$T_{site,DL[\text{kbps}]} = T_{cell} \quad (3.41)$$

$$T_{site,DL[\text{kbps}]} = 3 \times T_{cell} \quad (3.42)$$

O número de estação base necessário para a capacidade é calculado com recurso á equação (3.43).

$$N_{eNB} = \frac{\text{Tráfego total}}{\text{Capacidade do eNodeB}} = \frac{T_{total}}{T_{site,DL}} \quad (3.43)$$

3.5. Planeamento de Frequência

O LTE funciona em diferentes bandas de frequências, dependendo do modo *duplex* (FDD ou TDD). Essas bandas de frequências encontram-se ilustradas na tabela em Anexo B [3].

O LTE é projetado para reutilização de frequência, 1 o que significa que todos os setores da estação base usa a mesma largura de banda do sistema alocada, o que é bastante atrativo em questão do custo, mas esta abordagem precisa de uma coordenação de interferência porque usar o mesmo canal nas Macro e Pico células ou *Femto* células faz uma interferência maior no limite da célula. Esta coordenação de interferência é designada de *intercell interference coordination* (ICIC).

Em redes LTE, o novo desenho da camada física permite partilha de recursos rádio. Esta flexibilidade permite que as células macros pico e *femto* atribui diferentes blocos de recursos de tempo-frequência dentro de uma portadora ou de portadoras diferentes se disponível, para o respetivo UE. Esta é uma das técnicas *intercell interference coordination* que podem ser utilizadas no DL para minimizar a interferência de dados [24].

A Figura 3.6 mostra um resumo dos métodos de divisão da frequência. Esses métodos ICIC descrevem as regras básicas sobre como um aumento de desempenho do sistema pode ser alcançado por meio da gestão da largura de banda do sistema.

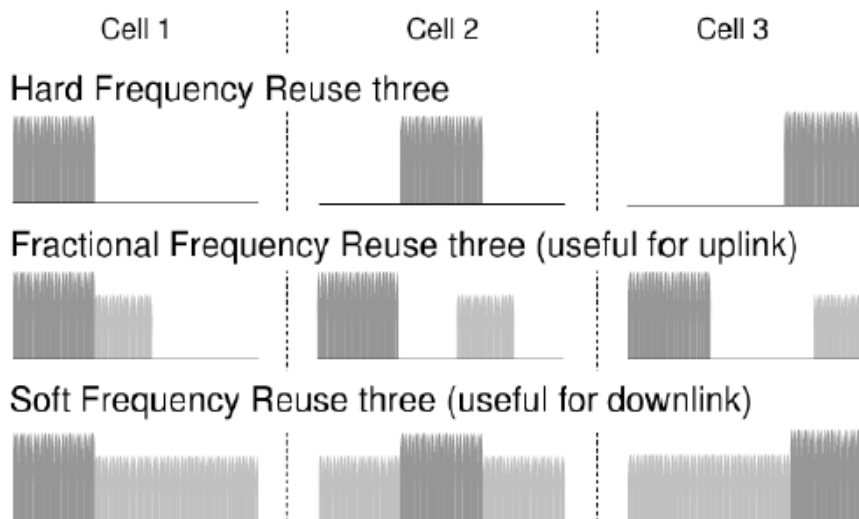


Figura 3.6 – Diferentes esquemas de *inter-cell interference coordination* [24].

No que se refere a **Hard Frequency Reuse (HFR)**, a largura de banda disponível é dividida em segmentos exclusivos, atribuídos as células individuais de maneira que, as células adjacentes não utilizam a mesma largura de banda do segmento. Um parâmetro mostrado como factor de reutilização define o número de segmentos de frequência com a reutilização *Hard frequency*. A interferência pode ser diminuída eficazmente tanto em UL e DL, mas à custa de uma grande redução na capacidade do sistema, uma vez que apenas uma parte da largura de banda total pode ser utilizado em uma célula individual [24].

Para o **Fractional Frequency Reuse (FFR)** a largura de banda disponível é dividido em segmentos, em que diferentes esquemas de reutilização de frequências são utilizados. Tipicamente a largura de banda é dividida em duas partes: Na primeira parte a largura de banda é atribuída aos utilizadores que se encontra no centro da célula e a segunda aos utilizadores que se encontram no limite da célula. Como os utilizadores que se encontram no limite da célula, são os que mais sofrem das interferências em relação aos do centro da célula, é importante usarem maior fator de reutilização [24].

Para o esquema de **soft frequency reuse (SFR)**, todas as células utilizam a totalidade da largura de banda disponível, mas para cada célula é definido um espectro de potência individual. Com este método, a probabilidade das células vizinhas utilizarem o mesmo bloco de recurso não diminui, mas os efeitos de uma colisão são menores. Como resultado, a interferência diminui efetivamente em UL e DL e a eficiência espectral aumenta [24].

O planeamento de frequência permite determinar a largura de banda que será disponibilizada para cada célula.

A cada operador móvel é atribuída um espectro RF pela agência nacional das comunicações, permitindo assim a cada operador planejar a sua banda de frequência de acordo com as suas necessidades.

Na Figura 3.7 é possível ver um exemplo de como é feito o planeamento. A cor amarela representa-se a largura de banda de todo o canal e as outras cores representam um planeamento de reutilização de frequências de forma a evitar a interferência inter-simbólica no limite da célula [11].

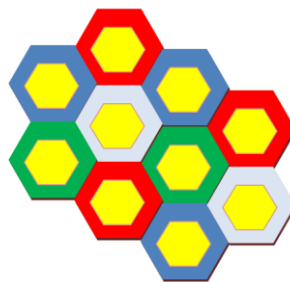


Figura 3.7 – Exemplo do planeamento de frequências (extraído de [11]).

Para este projecto, no planeamento de frequência foi escolhida a banda dos 800MHz com a frequência a variar entre os 791- 862MHz. De acordo com a tabelas das bandas de frequência, disponível no anexo B.

Para sistema FDD no DL é considerado a sub-banda 791-821 MHz e 832-862MHz para o UL.

Tendo em conta as duas operadoras móveis existentes em Cabo Verde, sabendo que a banda 20 tem uma largura de banda de 2x30MHz, a divisão da banda de frequência pode ser feita de acordo com um exemplo apresentado na Figura 3.8, onde é atribuída uma banda de 10MHz de largura de banda a cada operadora e é reservada uma largura de banda de 10MHz.

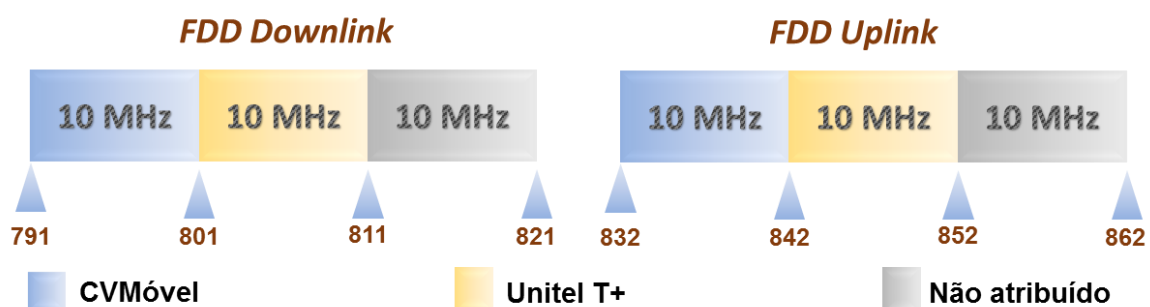


Figura 3.8 – Divisão de largura de banda.

Considerando a banda que varia entre 801 – 811 MHz no DL e 842 – 852 MHz no UL, a cada banda é dividida em vários sub-bandas atribuindo a cada sector uma frequência, para o caso de uma estação base de 3 sectores pode ser utilizados o padrão de frequências F1/F2/F3.



Figura 3.9 – Divisão da largura de banda utilizada.

Mas também podia ser utilizado a mesma frequência nos 3 sectores, o que trás mais vantagens a nível de utilização de recursos, maior eficiência espectral. Mas contudo, isso trás o problema de interferência quando aumenta o número de utilizadores e a SINR diminui principalmente na fronteira da célula.

O resultado da divisão da banda de frequência utilizada, encontra-se na Tabela 3.11.

Tabela 3.11 – Sub-bandas de frequência [791 – 862] MHz.

Frequência do DL (Tx) [MHz]	Frequência do UL (Rx) [MHz]
801	842
804.3	845.3
807.6	848.6
810.9	851.9

Considerando uma rede OFDMA, em que cada célula é dividida em 3 sectores, utilizando a opção de planeamento de frequência disponível na ferramenta de planeamento (*Coverage – Network planning – Network frequency assignment*), foi planeada e atribuída uma sub-banda da banda de frequência a cada sector, onde o resultado se encontra na Tabela 3.12.

Tabela 3.12 – Frequência atribuída a cada sector.

Atribuição de frequência		
	Frequência DL (Tx) [MHz]	Frequência UL (Rx) [MHz]
Sector 1	801	842
Sector 2	804.3	845.3
Sector 3	807.6	848.6

3.6. Planeamento de *Physical Layer Cell Identities*

Para identificar cada sector do eNodeB, é atribuído um ID que se encontra dentro da gama de 0 – 503, que faz um total de 504 IDs. Esse ID é designado de *Physical Layer Cell Identities* (PCI). Os PCIs são agrupados em 168 grupos (*Cell-group ID*), com 3 PCIs cada ($3 \times 168 = 504$). Em LTE a atribuição da PCI é semelhante ao *scrambling code* em WCDMA. É através do PCI que a célula vizinha é identificada para a célula servidora no processo do *handover*.

A Tabela 3.13 apresenta o número de PCI e os parâmetros relacionados a ele, tais como *Cell-group ID*, *Local ID* e *Hopping pattern*. Esses IDs devem ser reutilizados de acordo com o número total do sector, atribuído dentro de uma área LTE.

A reutilização dos 504 diferentes valores de PCI devem ser suficientemente distanciados para evitar a duplicação de PCI entre sectores vizinhos, uma vez que isso pode causar a interferência e diminuir a qualidade do serviço. Esta parte da atribuição dos PCIs não deve representar um problema, já que existem 504 PCIs definido.

Segundo [25] para prevenir eficazmente o problema de interferência é atribuída uma técnica de agrupar um máximo de 30 sectores vizinhos (*Uplink sequence shift*) sob o mesmo *Hopping pattern*, de modo que a quantidade de interferência no UL vindo do UEs, detetado do lado do eNodeB pode ser controlada.

Tabela 3.13 – PCI e os Parâmetros associados ao PCI, (adaptado de [26] [[25]]).

PCI		0	1	2	3	4	5	...	27	28	29	...	480	481	482	...	501	502	503									
DL	Cell-group ID	0			1			...			9			...			160			...			167					
	Local ID	0	1	2	0	1	2	...	0	1	2	...	0	1	2	...	0	1	2									
UL	Hopping pattern	0									...									16								
	Sequence shift	0	1	2	3	4	5	...	27	28	29	...	0	1	2	...	21	22	23									

Segundo [27] O PCI também tem a finalidade de servir como parâmetros alocador de recurso para RS no DL e no UL. No DL as RSs são alocados em função do tempo e da frequência, conforme se pode ver na Figura 3.10. No domínio do tempo as RSs são sempre transmitidos no mesmo símbolo OFDM, contudo no domínio da frequência cada célula tem uma deslocação diferente, determinado pelo modulo-3 do PCI denominado de PCI mod3. A Figura 3.10 mostra 3 células com diferentes PCIs (1, 2 e 3), na célula 1 tem o PCI mod3=0, na célula 2 o PCI mod3=1 e na célula 3 o PCI mod3=2.

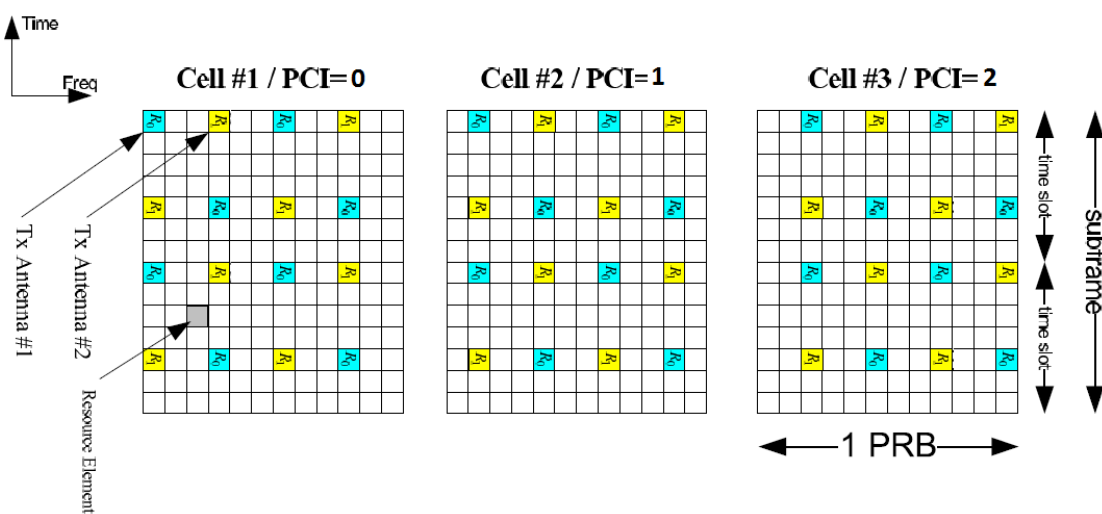


Figura 3.10 – Localização de RS dentro de um RB para diferentes PCIs ([27]).

Com esta atribuição dos PCIs evita que os sinais de referência das diferentes células sobrepõem na frequência, o que resulta numa baixa interferência na estimativa de canal do UE [27]. No UL RS, o PUSCH transporta símbolos de referência para desmodulação do sinal à chegada ao eNodeB. Estes símbolos de referência são construídos através de sequências Zandoff-Chu¹, nos quais estão divididas em 30 grupos. Isto significa na prática que, para um dado PRB existem dois grupos de 30 sequências diferentes para atribuir, como se pode verificar na Tabela 3.13, pelo que dificilmente haverá 2 sequências iguais, o que é benéfico para a limitação da interferência inter-célula. Para que isto seja possível é necessário que, às células vizinhas, sejam atribuídas diferentes sequências base [27].

Através da ferramenta de planeamento *ICS designer* utilizada neste trabalho, no menu “Coverage – Network planning – Physical layer cell identities...” permite planear o PCI e Physical Layer Cell Identity Group (PHY Group ID) de maneira a evitar qualquer risco de colisão entre as células vizinhas.

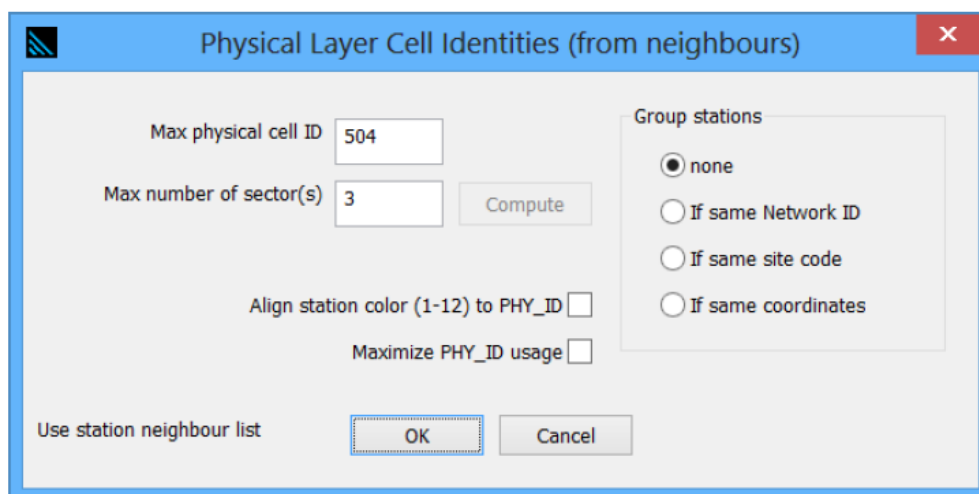


Figura 3.11 – Planeamento da PCI no ICS designer.

Foram feitos o planeamento de PCI de maneira a atribuir 3 PCIs, uma a cada sector do eNodeB, e uma a cada repetidor, conforme se ilustra na Tabela 3.14.

¹ Também designada de **Chu sequence** ou **Frank-Zadoff-Chu (FCZ) sequence** é uma sequência pertencente à classe de sequências ortogonais complexas cujo, sua auto correlação discreta em sinais não desfasados é nula. Em adição, as sequências Zandoff-Chu possuem uma amplitude constante.

Tabela 3.14 – PCIs atribuídas a cada sector do eNodeB.

Sectores	PHY CELL ID	PHY GROUP ID	PCI MODn
Sector1	0	0	0
Sector2	1	0	1
Sector3	2	0	2
RN 1	3	1	0
RN 2	4	1	1

3.7. Localização do Repetidor

A opção pela implementação ou não do repetidor geralmente depende de duas considerações:

- Capacidade da região para suportar a introdução do repetidor: O tráfego processado nas possíveis eNodeB servidoras deve ser inferior ao tráfego máximo suportado, pois o repetidor possibilita um aumento na área de cobertura sem, contudo, aumentar a capacidade de tráfego. Caso o eNodeB doadora esteja operando próximo do seu limite de capacidade o aumento na cobertura, irá gerar um tráfego adicional que não poderá ser suportado, provocando o bloqueio dos serviços e conseqüentemente uma queda no nível de QoS.
- Tempo de implementação e local de instalação: Como o repetidor não necessita de integração à rede de transmissão, sua infra-estrutura é simplificada, reduzindo assim o tempo de implementação do equipamento. No que se refere ao local de instalação os repetidores podem ser instalados em postes de iluminação.

O aumento de raio da célula depende da posição do *Repeater Node* (RN) na célula, uma vez que a localização de um RN afeta SINR do sinal recebido nas ligações eNodeB – *Repeater Node* (eNB-RN) e do *Repeater Node* – UE (RN-UE).

Um RN colocado perto da fronteira da célula, irá resultar numa baixa SINR recebida da ligação eNB-RN e também poderá causar maior interferência nas células vizinhas. Por outro lado, a colocação dos RNs distante da fronteira da célula, resultará numa SINR baixo na ligação RN-UE, fazendo com que os utilizadores na fronteira da célula estarem mais sujeitos

a falha. Assim, a fim de alcançar o raio máximo da célula existe uma necessidade de determinar a localização ótima do RN.

A localização do repetidor depende do número de população a ser servido pelo repetidor, do tráfego total do utilizador, da SINR e do nível de sinal do eNodeB.

A Figura 3.12 mostra um exemplo de como o débito binário da estação base no *DL* varia com a distância. Isso mostra que quanto mais próximo do centro da célula estiverem os utilizadores, maior será a SINR recebida, dependendo da largura de banda e do tipo de modulação.

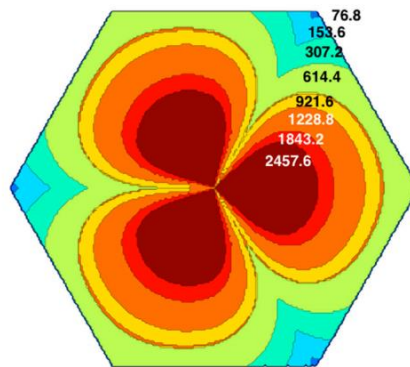


Figura 3.12 – Exemplo da Distribuição da taxa de dados ao longo da célula [28].

O débito binário do repetidor baseia-se no número de população a servir e do tráfego do mesmo e é calculada com recurso à equação (3.44).

$$R_{bRN}[\text{Kbps}] = n_{User} \times T_{DUser} \quad (3.44)$$

Onde o n_{User} , corresponde ao número de utilizador a ser servido pelo repetidor, T_{DUser} corresponde ao tráfego diário pelo utilizador. Tendo o débito binário, obtêm o SINR com recurso à equação (3.45).

$$SINR_{RN}[\text{dB}] = a_1 - a_2 \sqrt{\ln\left(\frac{a_0 - a_3}{R_{bRN} - a_3}\right) / \ln 2}; \quad 0 \leq R_b \leq a_0 \quad (3.45)$$

Os parâmetros a_0 , a_1 e a_2 , são parâmetros semi-empíricas que dependem do tipo de canal de modulação, se é EPA5, EVA70 ou ETU 300 Hz, segundo a Tabela 3.2, a_0 representa o débito binário máximo por RB [8].

Conhecendo os valores de $SINR_{RN}$ e da potência do ruído consegue-se obter o nível de sinal do repetidor, dependendo do nível de sinal do eNodeB e do ganho do repetidor.

O repetidor é localizado no ponto cujo a SINR seja suficientemente aceitável, ou seja no ponto em que o débito binário seja suficiente para servir a população em causa.

$$S_{RN[dB]} = Sens_{RN} = SINR_{RN} + N \quad (3.46)$$

Onde o S_{RN} , corresponde ao nível de sinal recebido do eNodeB e N a Potência do ruído.

3.8. Dimensionamento do Repetidor

Tendo a localização dos repetidores a uma distância D , calcula-se a potência recebida nos utilizadores com a utilização do repetidor, as perdas entre o eNodeB e o RN e entre o RN e o UE.

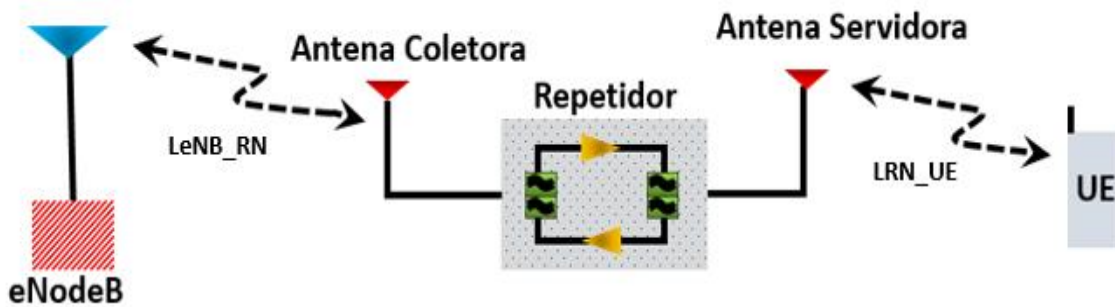


Figura 3.13 – Ligação entre eNodeB-RN e RN-UE.

A potência recebida nos utilizadores numa ligação rádio com a implementação do repetidor é dada pela equação (3.47) a (3.49).

$$P_{RxUE[dBm]} = EIRP_{DL} + G_{UE} + G_{Rep} - L_{eNB_RN} - L_{RN_UE} \quad (3.47)$$

$$EIRP_{DL[dBm]} = P_{TxeNB} + G_{eNB} \quad (3.48)$$

$$G_{Rep[dBi]} = G_{Colet} + G_{serv} + G_{amp} \quad (3.49)$$

Para o caso da ligação no UL a potência recebida no eNodeB é dada pela equação (3.50).

$$P_{RxeNB[\text{dBm}]} = EIRP_{UL} + G_{eNB} - L_{RNUE} + G_{rep} - L_{eNB RN} \quad (3.50)$$

$$EIRP_{UL[\text{dBm}]} = P_{TxUE} + G_{UE} \quad (3.51)$$

Onde, P_{TxUE} e P_{TxNB} corresponde a potência de emissão do UE e do eNodeB respectivamente. O G_{eNB} e G_{UE} são os ganhos das antenas do UE e do eNodeB e o G_{Rep} é o somatório dos ganhos da antena coletora, antena servidora e do amplificador.

No que diz respeito às perdas de propagações entre o eNodeB e o RN ou entre o RN e o UE de uma forma geral, é dada pela equação (3.52), contudo isto depende se os dois se encontram em linha de vista (LOS) ou não em linha de vista (NLOS) [29].

$$P_L = P_{rob}(D) \times P_L(LOS) + P_{rob}(D) \times P_L(NLOS) \quad (3.52)$$

A probabilidade de um do eNodeB estar em LOS ou NLOS é determinada pela função de probabilidade LOS ($Prob(D)$), e que depende do tipo de ambiente de propagação.

De acordo com [30], as perdas de propagações em LOS e NLOS na ligação *backhaul* (eNB-RN), baseando no modelo 3GPP, são dadas pela equação (3.53) e equação (3.54) e a probabilidade é dada pela equação (3.55).

$$P_L(LOS) = 100.7 + 23.5 \log_{10}(D) \quad (3.53)$$

$$P_L(NLOS) = 125.2 + 36.3 \log_{10}(D) \quad (3.54)$$

$$P_{rob}(D) = e^{\left(\frac{-(D-0.01)}{1.15}\right)} \quad (3.55)$$

Quando se trata da ligação entre RN-UE, é designada de *access link*, as perdas LOS e NLOS são calculadas com recurso à equação (3.56) e (3.57).

$$P_L(LOS) = 103.8 + 20.9 \log_{10}(D) \quad (3.56)$$

$$P_L(NLOS) = 145.4 + 37.5 \log_{10}(D) \quad (3.57)$$

$$P_{rob}(D) = 0.5 - \min\left(3e^{-\frac{0.3}{D}}, 0.5\right) + \min\left(3e^{-\frac{D}{0.095}}, 0.5\right) \quad (3.58)$$

Onde, o D corresponde a distância entre o emissor e o recetor.

3.9. Ferramenta de Simulação – *ICS Designer*

Para o planeamento de rede foi escolhido o simulador *ICS Designer* da *ATDI advanced radio communications*, disponível através do contacto com o fabricante pelo *web site* disponível em [31], de forma a ser possível a realização das configurações, simulações e testes, conforme pode verificar no fluxograma geral apresentado na Figura 3.16. A ferramenta de simulação permite simular tanto a rede 2G, 3G e LTE.

Após abrir o *software*, a janela do *Project Manager* é aberto automaticamente. Esta janela permite fazer a alteração dos projetos, a representação da estrutura de rede na área geográfica.

O Projecto, que corresponde ao espaço do trabalho no *ICS designer*, é armazenado no disco do computador como um ficheiro de extensão “.PRO”. O ficheiro armazena as ligações para outros ficheiros que contêm informações utilizadas para construir e analisar uma rede RF.

A Figura 3.14 representa a organização das várias camadas do projecto, em diferentes extensão.

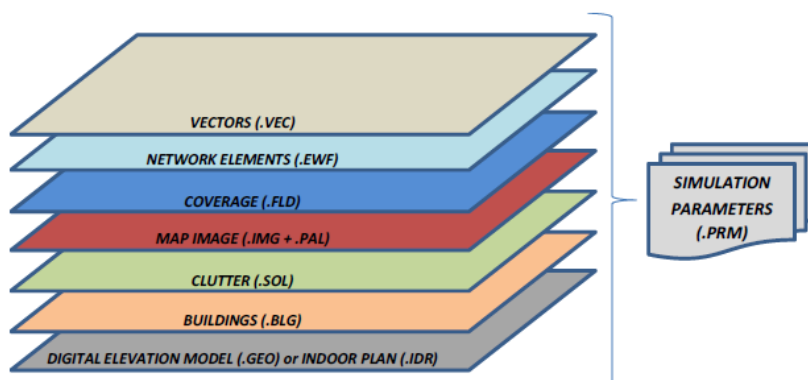


Figura 3.14 – Organização das camadas do projecto [15].

O ficheiro obrigatório para criar e carregar o projeto é o *digital elevation model (.GEO)*. Tendo este ficheiro, permite criar o eNodeB no mapa.

Tendo as várias camadas do projeto criado e com estado *OK*, permite abrir o projeto carregando na opção *Load*.

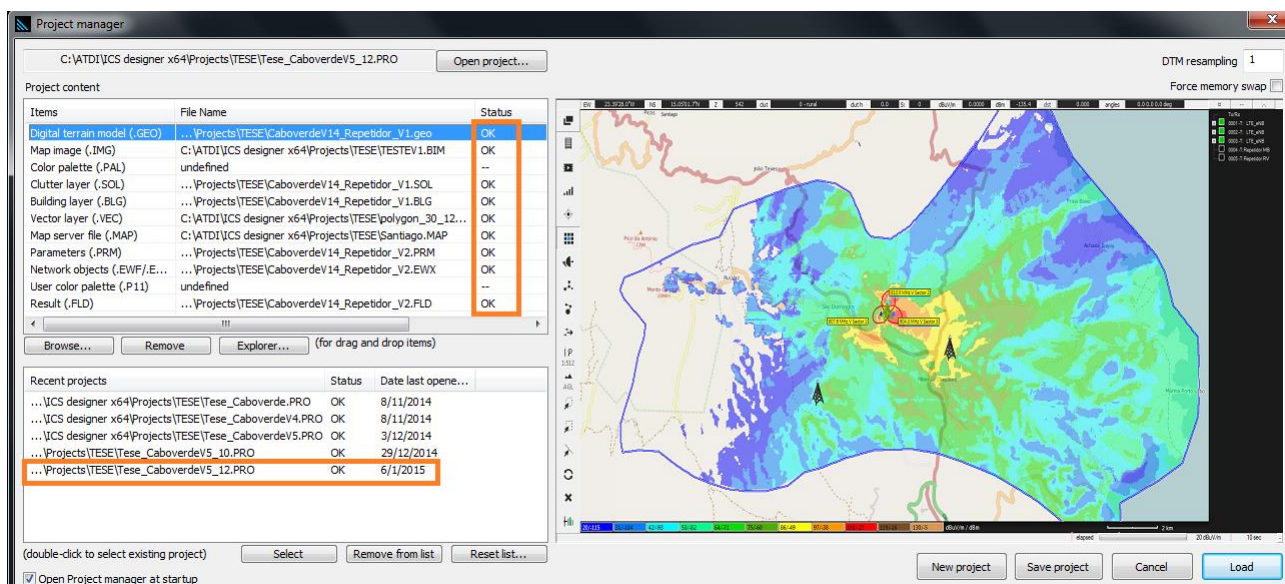


Figura 3.15 – Janela do Project Manager no ICS designer.

Os objetos serão colocados no mapa de acordo com as coordenadas geográficas e com parâmetros técnicos especificados pelo utilizador para cada objeto, através da janela *Tx/Rx parameters*. A janela *Tx/Rx parameters* permite configurar todos os parâmetros técnicos e geral do elemento da rede, apresentado em vários separadores tais como, 'General', 'Patterns', 'Channels', 'Site' e 'Advanced'. Esta janela é ajustada de acordo com o tipo de elemento da rede inicialmente escolhida, por exemplo se escolher a opção LTE FDD um novo separador eNodeB aparece, conforme se ilustra no Anexo D.

O procedimento seguinte indica os passos essenciais para adicionar o eNodeB no mapa:

1. Pressionar o botão direito do rato no mapa "Add station – Tx/Rx" no ambiente principal da ferramenta;
2. Na opção *signal*, escolher LTE FDD e prosseguir com as configurações;
3. Na opção *site* é onde escolhe a localização do eNodeB de acordo com a coordenada geográfica. Em Anexo D encontra-se as várias janelas de configuração do eNodeB e dos parâmetros do sistema.

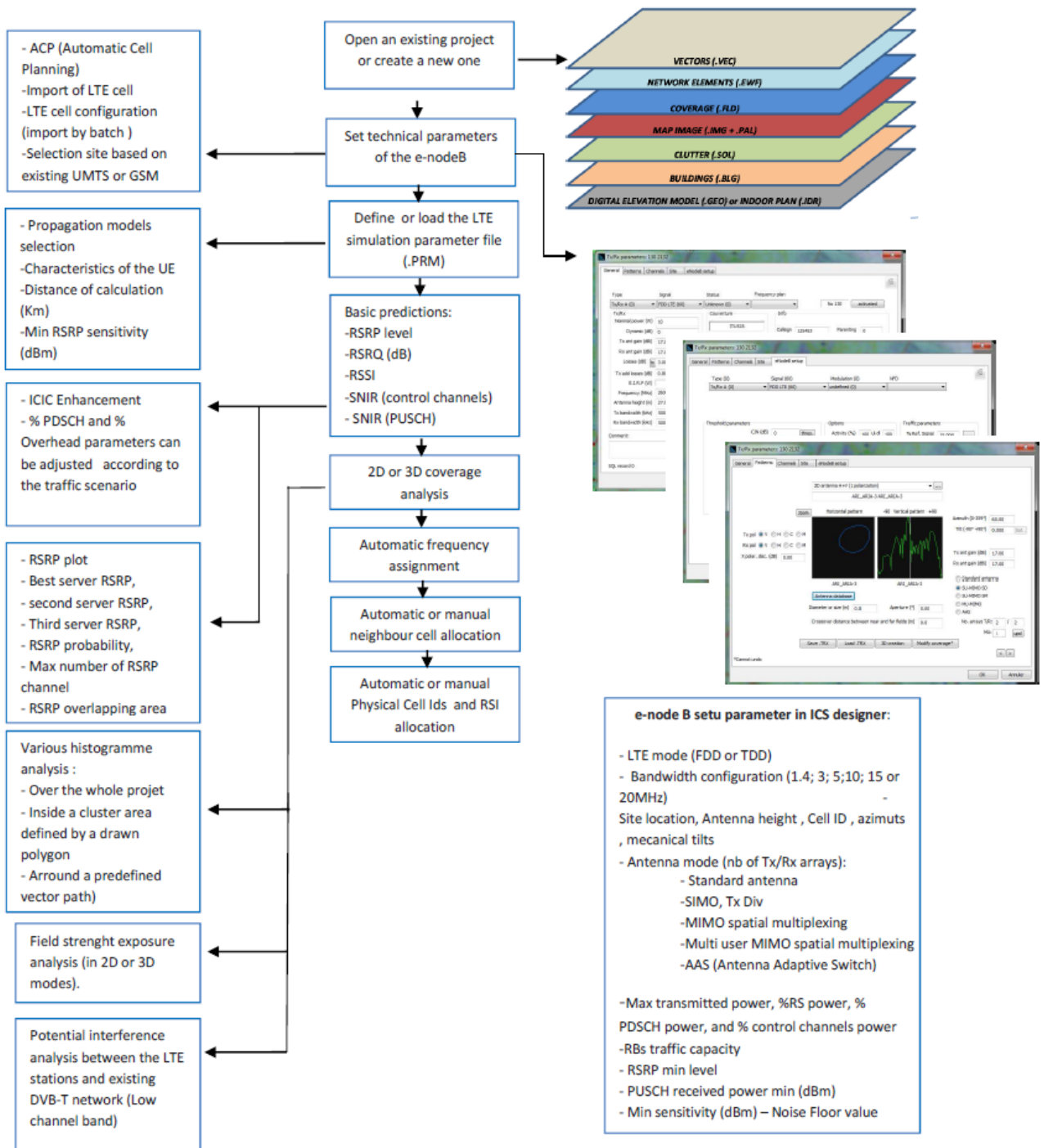


Figura 3.16 – Fluxograma geral do LTE no ICS designer [15].

O fluxograma da Figura 3.16, ilustra os diversos *inputs* e *outputs* que podem ser explorados na ferramenta de planeamento *ICS designer*. Um dos principais *outputs* é o *field strength*, que corresponde ao nível de sinal em dBm, a SINR, a RSRP e o *throughput*.

Esta ferramenta de planeamento suporta vários modelos de propagação incluindo o modelo Okumura-Hata como se pode ver na Figura 3.17.

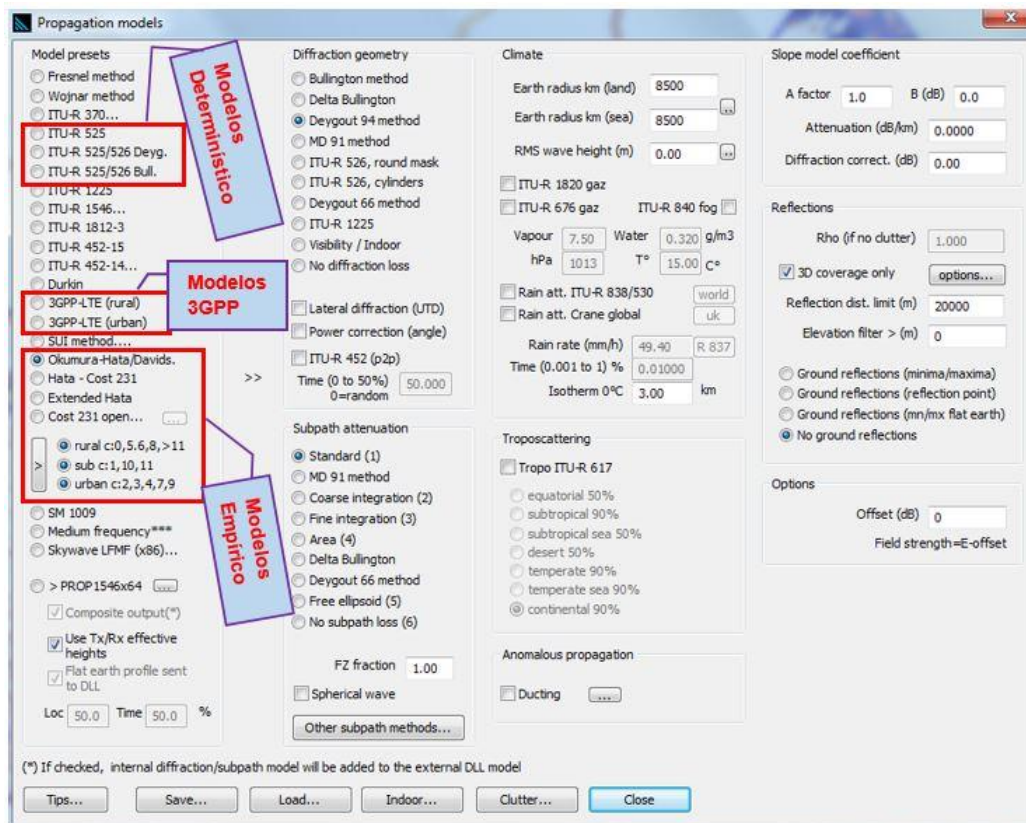


Figura 3.17 – Modelos de Propagação disponível no ICS designer [15].

Todas as características LTE no ICS Designer foram implementadas de acordo com as especificações técnicas do 3GPP Release 9 segundo [15], especialmente os seguintes pontos:

- OFDMA e SC-FDMA;
- Suporte da estrutura da trama FDD e TDD;
- Mapeamento do RBs;
- Largura de banda do canal (1.4, 3, 5, 10, 15 and 20 MHz);
- *Cyclic prefix* longo e curto;
- Suporta modulação QPSK, 16QAM e 64 QAM;
- Definições dos canais físicos e de controlo (*Reference signal*, PDSCH, *control channels*);
- *Multiple Input Multiple Output* (MIMO);
- *Single antenna port*, MISO:
 - *MIMO Spatial Diversity*;
 - *Tx Div (Transmit diversity)*;
 - *MIMO Spatial Multiplexing*;

- *Multi user MIMO*;
- *AAS (Antenna Adaptive Switch)*.
- Planeamento automática de frequência;
- Planeamento das células vizinha;

Após a simulação da rede pode obter os resultados dos seguintes parâmetros LTE:

- RSRP (dBm), best RSRP, second best RSRP, RSRP overlapping, etc...
- *Received Signal Strength indicator (RSSI)* (dBm);
- RSRQ (dB);
- SNIR (PDSCH);
- SNIR (*Control Channels*);
- SNIR (PUSCH) baseado no *Noise Rise* (dB) ou método Monte Carlo.

Também existe a opção do método estatístico baseado no método de MONTE CARLO. O método de Monte Carlo é muito útil e eficiente para validar ou melhorar os parâmetros de rede LTE, a fim de atingir os objetivos de cobertura e de interferência para uma dada população. Tipicamente, os simuladores LTE Monte Carlo pode ser usado para validar os seguintes critérios [15]:

- No DL: RSRP, RSRQ e SNIR.
- No UL: PUSCH.

O simulador Monte Carlo, também pode ser utilizado para otimizar a configuração do eNodeB, de maneira a melhorar a cobertura e parâmetros de interferência KPI.

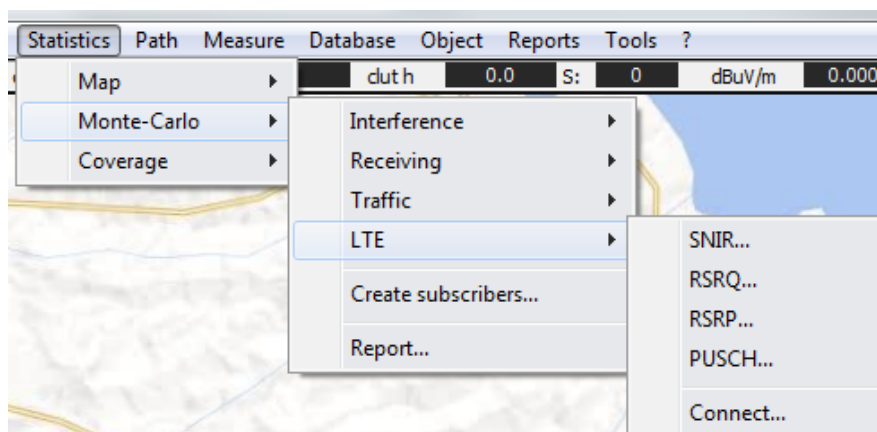


Figura 3.18 – Opção Monte Carlo no ICS designer.

Na opção “*Reports*” existe a possibilidade de exportar para o formato CSV os parâmetros de configuração do eNodeB e os resultados de simulação, permitindo assim analisar os resultados com maior precisão.

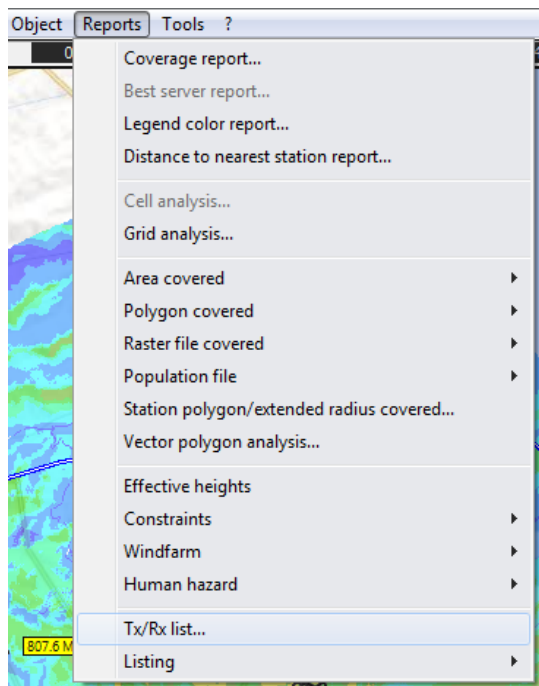


Figura 3.19 – Opção para exportar as configurações da rede.

Como *output* existe ainda a possibilidade de exportar os resultados para que possam ser visualizados e analisados com maior precisão, geograficamente no *Google Earth*, pressionando o botão direito do rato no mapa e seguindo as opções apresentada na Figura 3.20.

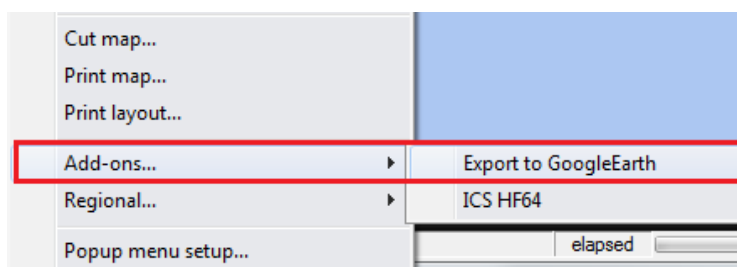


Figura 3.20 – Opção para exportar o ficheiro para o GE.

A ferramenta também permite definir os intervalos dos valores da potência, RSRP, SINR, percentagem de cobertura pretendido usando a opção “*Tools – User palette*”, ou permitir o ajuste de forma automático pelo *ICS designer*. O nível de sinal também pode ser visualizado no mapa em modo 3D seguindo a opção “*Map - 3D display*”.

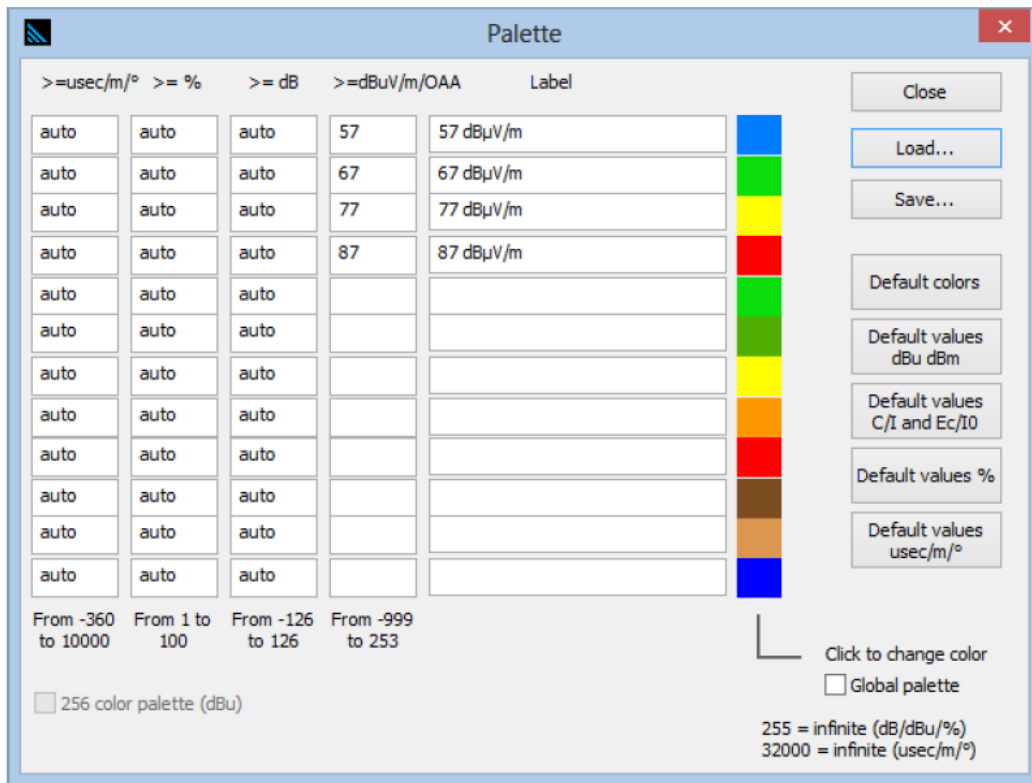


Figura 3.21 – Janela que permite definir os intervalos de valores.

Uma vez que a rede está construída no mapa, pode prosseguir com a simulação de cobertura, seguindo as seguintes opções, “Coverage” – Network calculation” – “Tx/Rx FS coverage” no menu principal, aparece a janela para preencher com a altura da antena Rx, a distância de cobertura e o *threshold*, seguida do *Start*.

Capítulo 4

4. Análise de Resultados

4.1. Planeamento LTE com uso de Repetidor

A primeira etapa no planeamento de cobertura será a de tomada de decisão em relação a localização da estação base, tendo como objetivo garantir a melhor cobertura possível.

O resultado principal de um planeamento de rede é uma estimativa dos equipamentos necessários para atender aos seguintes requisitos:

- ✓ Capacidade;
- ✓ Cobertura;
- ✓ Qualidade.

A área considerada é uma zona rural no Município de São Domingos na ilha de Santiago em Cabo Verde, cuja morfologia do terreno requer uma análise cuidadosa no que diz respeito à localização da estação base. A Figura 4.1 apresenta a região sinalizada onde se fez o planeamento, com uma área de cerca de 137.6 km² cuja latitude é de 15.023448° e longitude -23.530046°.



Figura 4.1 – Área do planeamento em Cabo Verde.

Para saber o raio de cobertura e as perdas de propagação foram feito os cálculos teóricos do *link budget* no UL recorrendo à ferramenta excel, utilizando as equações mencionadas no capítulo 3 onde, os resultados se encontram apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Resultado do *Link Budget* no UL.

LTE Uplink Radio Link Budget		
Largura de Banda [MHz]	10	
Nº de RBs	50	A
Ptx UE [dBm]	23	B
Ptx por RB do UE [dBm]	6.01	C
Factor de ruído eNodeB [dB]	2.50	D
Densidade de ruído térmico [dBm/Hz]	-174.00	E
Largura de banda por RB [dBm]	52.55	F
Ruído Térmico por RB [dBm]	-118.95	G
Débito Binário por RB [kbps]	10	H
SINR target [dB]	-7.00	I
Sensibilidade eNodeB [dBm]	-125.95	J
Carga no sistema [%]	50	K
Margem de interferência [dB]	0.31	L
Ganho da antena do eNodeB [dB]	17.15	M
Perdas de inserção e <i>jumpers</i> [dB]	2	N
Perdas devido ao corpo humano [dB]	3	O
Perdas por penetração em edifícios [dB]	8	P
Perdas por penetração nos carros [dB]	0	Q
Margem de desvanecimento [dB]	2.9	R
Máx Path Loss [dB]	135.89	S
Alcance [km]	12.70	T
Distância entre eNodeB's [km]	19.04	
Área de cobertura do eNodeB [km ²]	314.04	

- $F = 10 \cdot \log(180 \text{kHz})$

- $J = G + I$

- $G = D + E + F$

Considerando uma largura de banda de 10 MHz ($n_{RB}=50$), com a potência do utilizador de 23dBm e uma carga do sistema de 50%, obtém-se uma perda máxima de propagação de 135.89 dBm e um raio de célula de 12.70 km.

Para saber a sensibilidade do UE é preciso calcular o *link budget* no DL, tendo em conta a máxima perda de propagação calculada no UL. Os resultados dos cálculos teóricos do *link budget* no DL, são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Resultado do *Link Budget* no DL.

LTE Downlink Radio Link Budget		
Maximum allowed Path Loss [dB]	135.89	A
Margem de Desvanecimento [dB]	2.9	B
Perdas devido ao corpo humano [dB]	3	C
Perdas por penetração em edifícios [dB]	8	D
Perdas por penetração nos carros [dB]	0	E
Ganho da antena [dBi]	17.15	F
Perdas de inserção de <i>jumpers</i> [dB]	2	G
Atenuação no limite da célula [dB]	128.74	H
Potência de transmissão [W]	39.81	I
Potência de transmissão por RB [W]	0.80	J
Carga do sistema [%]	35	K
Factor de Ruído do UE [dB]	7	L
Densidade de ruído térmico [dBm/Hz]	-174	M
Potência de ruído [dBm]	52.55	N
Ruído térmico por RB [dBm]	-114.45	O
Margem de interferência [dB]	13.95	P
Sensibilidade do UE [dBm]	-116.58	Q
SINR no limite da célula [dB]	-2.14	R
Débito binário por RB no limite da célula [kbps]	77	S
Débito binário no limite da célula para o total dos utiliz. [Mbps]	3.85	T

$$\bullet H = A + C + D + E - F + G$$

$$\bullet Q = J - P - B - C - D - E + F - G - A$$

$$\bullet J = I/n_{RB}$$

$$\bullet P = 1 + ((J * K * 2,3)/(H * O))$$

$$\bullet O = L + M + N \quad T = S * n_{RB}$$

Após os resultados do *link budget*, onde foi calculado as perdas de propagação e o alcance da estação base, Tabela 4.1, foram calculados a capacidade da estação base e o número da estação base necessária para a capacidade.

Na *Busy Hour*, que corresponde à hora de maior tráfego durante 24 horas, considerando uma carga de 50% nesse período resulta num tráfego diário de 3.22 Mbps e um tráfego diário por utilizador de 919.75bps. Existindo duas operadoras no país, fazendo uma estimativa de que uma operadora contem 7000 assinantes dentro da área total (metade da população), logo o tráfego total é de 9.66 Mbps, os resultados se encontram na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Resultado do cálculo do tráfego dos utilizadores.

Parâmetros	Valores
Assinantes [hab]	7000
Densidade Populacional [hab / km ²]	51
Tráfego utilizador (mensal) [Mbyte]	298
Tráfego utilizador (diário) [bps]	919.75
Tráfego área [kbps / km ²]	46.79
Tráfego total [Mbps]	6.44
Tráfego <i>busy hour</i> [Mbps]	3.22
Tráfego diário (total) [Mbps]	9.66

Depois de saber qual a capacidade requerida, torna-se necessário descobrir qual a capacidade que cada eNodeB suporta no UL e no DL, o resultado encontra-se na Tabela 4.4 e Tabela 4.5.

Tabela 4.4 – Resultado do cálculo da Capacidade em UL.

Capacidade em UL	
Débito binário médio do utilizador por célula [Kbps]	454
Carga da célula [%]	50
Capacidade média da célula em UL [Kbps]	227

Assumindo 50% da carga do sistema no UL, resulta numa capacidade média da célula de 227 Kbps.

Tabela 4.5 – Resultado do cálculo da Capacidade em DL.

Capacidade em DL		
Factor de atenuação (H) [dB]	0,36	A
Noise rise médio [dB]	9.17	B
SINR médio [dB]	9.98	C
Débito binário por RB [kbps]	399.81	D
Débito binário médio do utilizador por célula [Mbps]	19.59	E
Capacidade da célula [Mbps]	6.86	F
Sector	3	G
MIMO (2x2)	2	H
Capacidade eNodeB [Mbps]	41.34	I

• $E = D * nRB$ $F = E * carga$ $I = F * G * H$

Tendo a capacidade e o tráfego resulta no número da estação base necessária para capacidade.

$$N_{eNB} = \frac{9.66}{41.34} = 0.24$$

De acordo com os resultados da capacidade do eNodeB em DL apresentado na Tabela 4.5, conclui que apenas uma estação base é suficiente a nível de capacidade para um total de 7000 utilizadores, ou seja, apenas 24% de capacidade diária é utilizada para servir a população naquela área.

Sendo a capacidade de uma estação base suficiente para garantir o serviço numa área de 137.6 km², assim justifica a utilização do repetidor para ampliar a cobertura, uma vez que o repetidor depende da capacidade da célula servidora.

Depois de calcular a capacidade da célula realizou-se uma análise teórica ao SINR nos vários pontos dentro do raio da célula, utilizando a modulação 64QAM, o pior caso como é de esperar aconteceu, aos utilizadores que se encontram na fronteira da célula conforme é ilustrado na Figura 4.2.

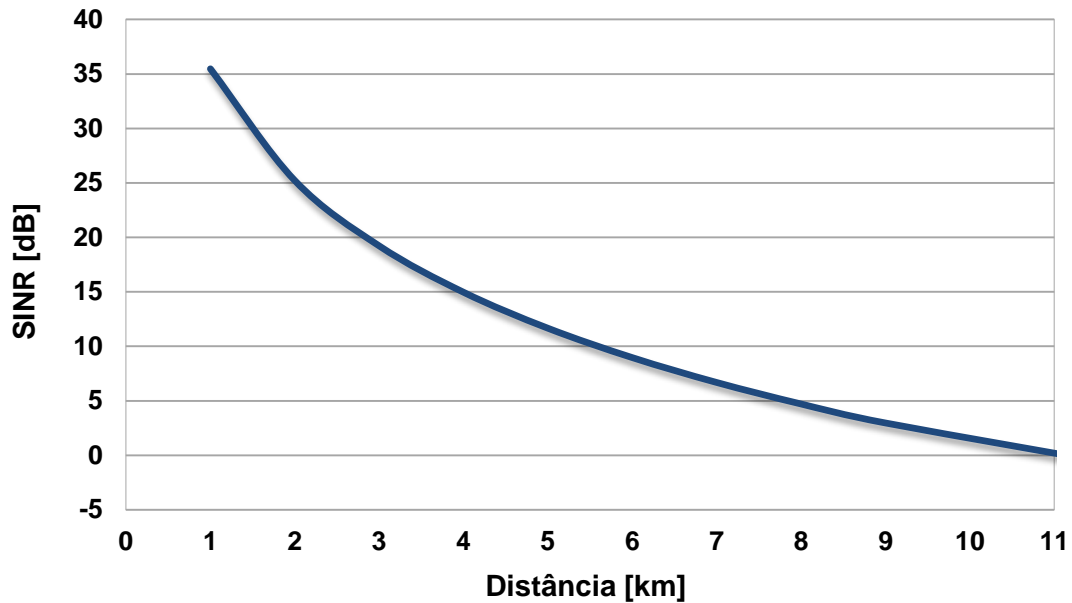


Figura 4.2 – SINR em função da distância do eNodeB .

Observando a Figura 4.2, à medida que se aproxima do limite da célula, a SINR diminuí e consequentemente teremos um débito binário bastante mais baixo, o que implica uma baixa qualidade de serviço.

Uma vez que o débito binário varia com a SINR, é necessário calcular para cada valor de SINR o débito binário correspondente, o resultado teórico encontra-se na Figura 4.3.

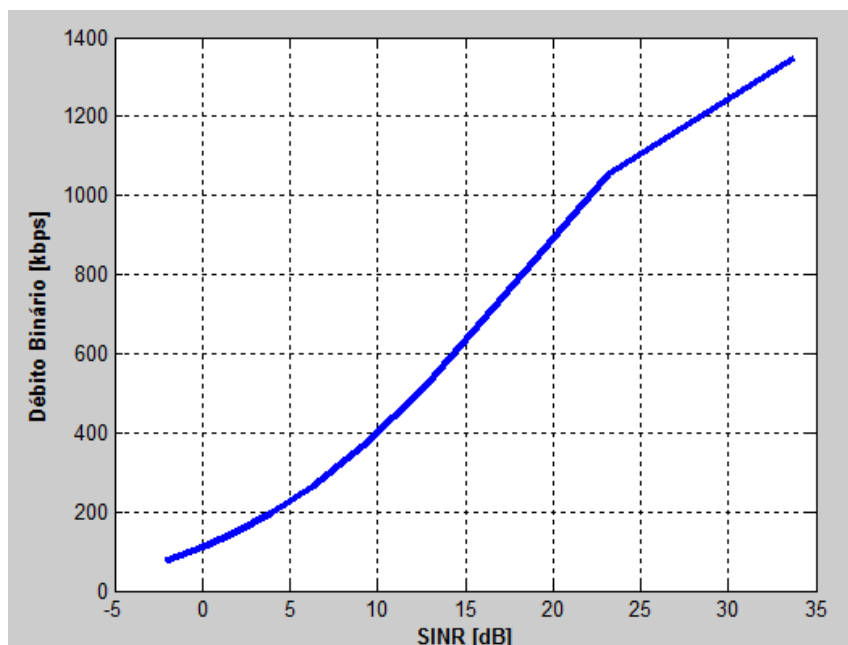


Figura 4.3 – Débito binário teórico por utilizador em função da SINR do eNodeB.

Através da Figura 4.3, conclui-se que o débito binário aumenta com o aumento da SINR, isto ajuda na tomada de decisão para resolver o problema de cobertura em algumas zonas de sombra no que diz respeito à localização dos repetidores. Isto porque, para instalar o repetidor num determinado ponto, tem que garantir que naquele ponto de instalação existe débito binário suficiente para garantir o funcionamento do repetidor.

A capacidade da estação base também varia com a largura de banda, a Figura 4.4 ilustra a capacidade de uma estação base a variar com a largura de banda para cada tipo de modulação. Para uma modulação de 64QAM com diferentes largura de banda, apresenta maior *throughput* comparando com outras modulações, isto devido ao maior bit por símbolo utilizado na modulação 64QAM.

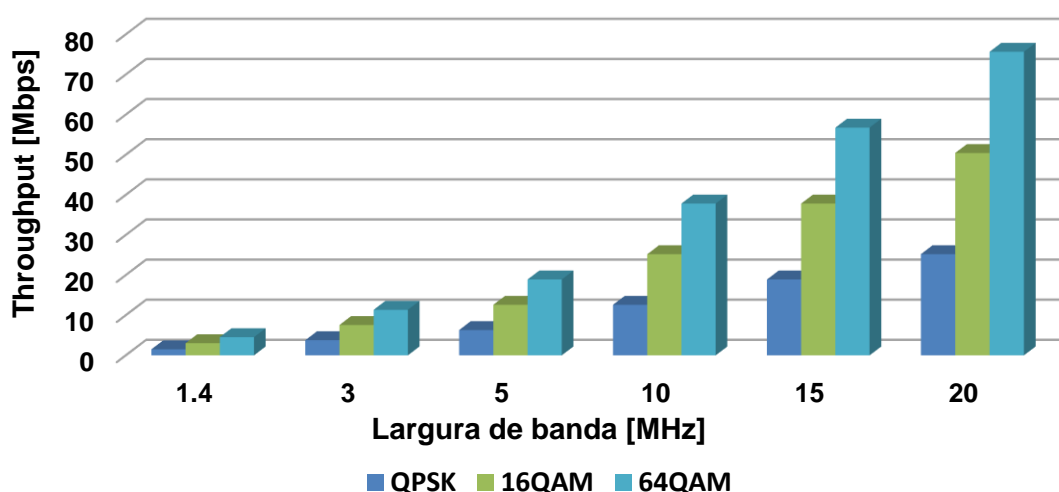


Figura 4.4 – *Throughput* da estação base em função da Largura de banda.

A taxa de código utilizado nas configurações do eNodeB também influencia o resultado da relação sinal ruído ao longo da célula para cada tipo de modulação. Na Figura 4.5 é apresentado o resultado do cálculo da relação sinal ruído mais interferência para cada tipo de modulação e taxa de código, conclui-se que a SINR aumenta com o aumento da taxa de código, para a modulação 64QAM apresenta maior SINR para qualquer taxa de código disponível.

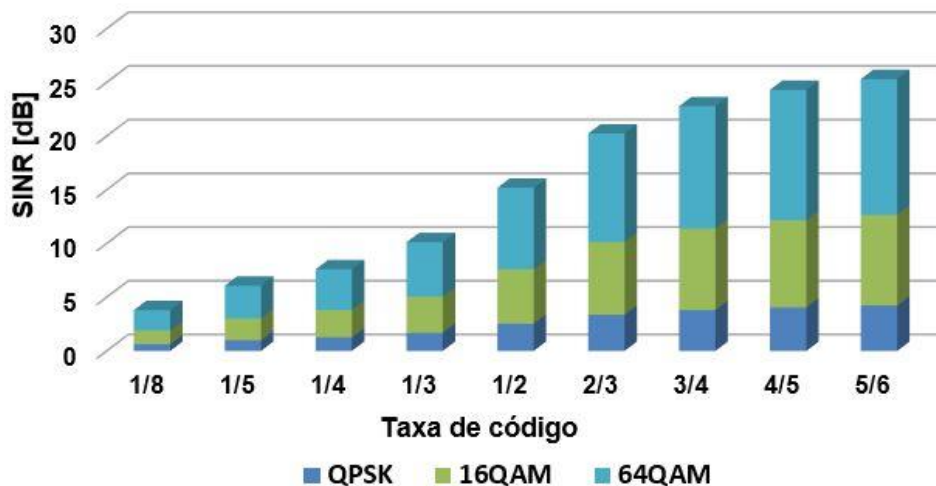


Figura 4.5 – SINR em função da taxa de código.

No que se refere a largura de banda, quanto maior for a largura de banda e o *bit* associado, maior será a capacidade da estação base, conseqüentemente maior é a eficiência espectral e a SINR. A Figura 4.6 apresenta o valor da eficiência espectral calculado para cada tipo de modulação, considerando uma largura de banda de 10 MHz.

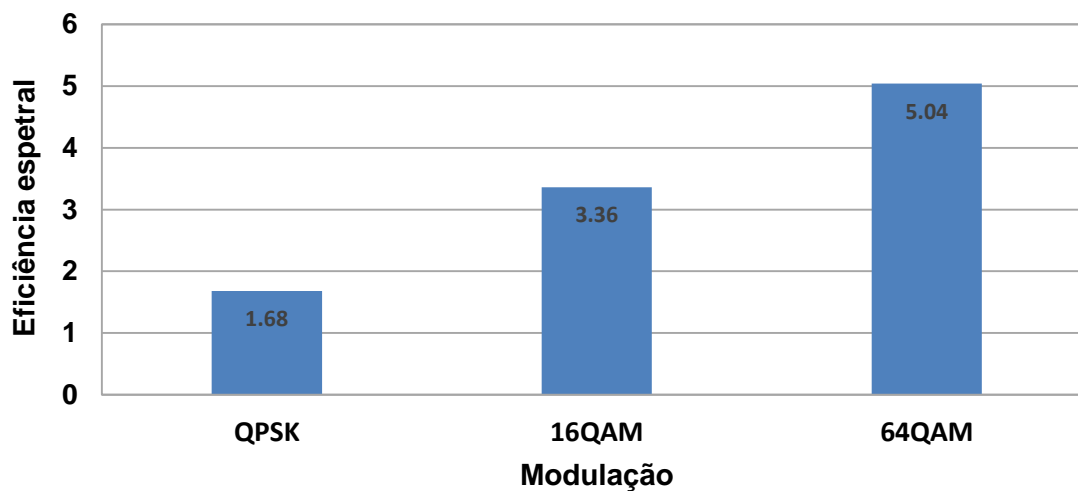


Figura 4.6 – Eficiência espectral em função do tipo de modulação.

A modulação 64QAM apresenta maior eficiência espectral devido ao *bit* por símbolo.

Depois de obter os resultados teóricos incluindo o número da estação base a ser utilizado, o primeiro passo foi encontrar a localização certa para a estação base, criar e configurar a estação base LTE com os parâmetros técnicos descritos na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Parâmetros de configuração do eNodeB.

Parâmetros do eNodeB			
Altura da antena [m]	30		
Ganho da antena [dBi]	17.15 (k_80010303)		
Perdas dos cabos e conectores [dB]	0.4		
Largura de banda total no DL	10MHz (nRB=50)		
Tipo de Antena	2x2 MIMO		
Tilt Eléctrico [-90° +90°]	-6		
Azimute [0 – 359°]	Sector 1	Sector 2	Sector 3
	120	240	360
PCI	0	1	2
PGI	0	0	0
Noise floor [dB]	-114		
Canal RS [%]	9.524		
Canal PD SCH [%]	70.771		
Canal de modulação	EPA 5 HZ		
Potência do eNodeB [dBm]	46		
Banda de Frequência – 20 [MHz]	DL	[791– 821]	
	UL	[832 – 862]	
Modulação / taxa de código	64 QAM 3/4		

Após a configuração do eNodeB foram feitas as simulações de cobertura utilizando a ferramenta de planeamento *ICS designer*. Os resultados de simulação encontram-se apresentados em dois cenários, cujo primeiro cenário corresponde aos resultados com apenas eNodeB e o segundo com a implementação do repetidor.

4.2. Definição dos cenários

De forma a justificar a utilização do repetidor, é comparado os resultados de planeamento nos seguintes cenários:

- 1) Utilização de um eNodeB com 3 sectores;
- 2) Utilização de repetidores.

4.2.1. Análise dos resultados em cenários com eNodeB

Depois de calcular a capacidade e a cobertura recorreu-se à ferramenta de planeamento para iniciar a localização do eNodeB.

Na Prática durante a implementação LTE a maioria dos sites são sites já existentes com outras tecnologias (2G ou 3G).

A verificação do posicionamento geográfico do eNodeB, no qual foi utilizado o programa de mapeamento geográfico o *Google Earth* (GE), foi escolhida de forma a cobrir a zona com maior concentração de população e conseqüentemente maior volume de tráfego e com menor obstáculo possível, sem a intervenção do repetidor como se pode observar na Figura 4.7. Na Tabela 4.7 encontra-se as coordenadas geográficas da localização do eNodeB.

Tabela 4.7 – Localização do eNodeB no mapa.

Localização do eNodeB			
eNodeB	Latitude	Longitude	Alturas [m]
1	15.013356239°	-23.323516824°	30

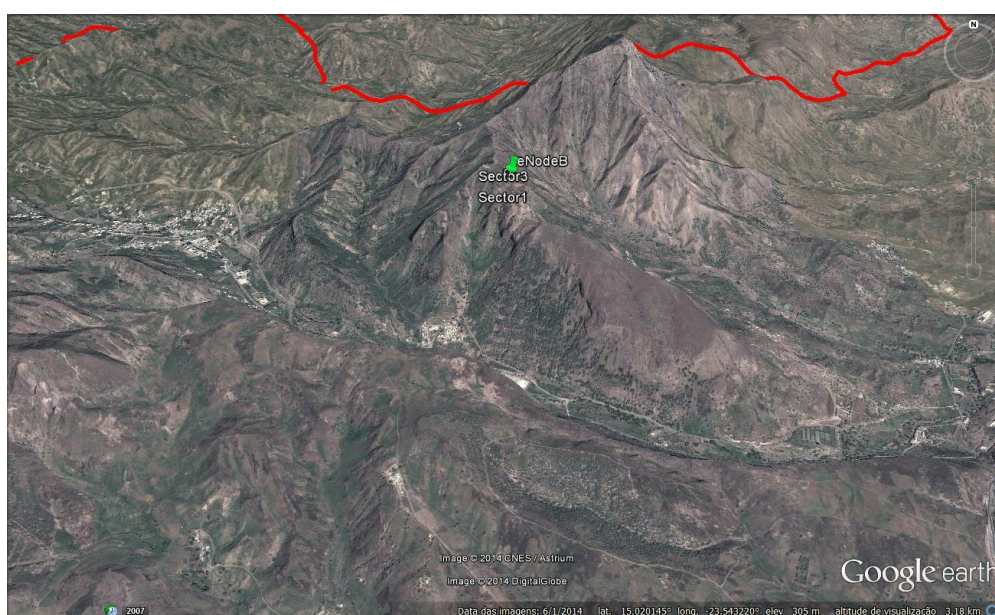


Figura 4.7 – Posicionamento geográfico do eNodeB no GE.

Neste cenário, como sendo o cenário de referência, é considerado a transmissão direta do eNodeB para o UE localizado a uma distância d de 12.70 km com uma potência de transmissão de 46 dBm, os restantes parâmetros encontram-se descritas na Tabela 4.6.

Uma vez que a rede do eNodeB está configurada, os utilizadores podem ser gerados e distribuídos aleatoriamente no mapa, pela densidade por km², por *cluster* ou por célula. Uma vez gerados os utilizadores, a ferramenta permite calcular os vários parâmetros, como por exemplo:

- ✓ Potência recebida nos utilizadores;
- ✓ RSRP;
- ✓ RSRQ;
- ✓ SNIR PDSCH e PUSCH;
- ✓ *Throughput* por RB;
- ✓ *Bit rate*.

Através da ferramenta de planeamento, foram estimados os níveis de sinal transmitido pelo eNodeB usando a opção, “*Coverage – Network Calculation – Tx/Rx FS coverage*”, esta opção permite calcular o *Field Strength Coverage* (FSC) em dBuV/m e a potência recebida em dBm. O *Field Strength Coverage* corresponde ao nível de sinal recebido na antena sem considerar os parâmetros do recetor, Figura 4.8. Esta medida pode ser utilizada para descrever área de serviço, envolvendo diferentes equipamentos, tecnologias, banda de frequências. Na Figura 4.9 é ilustrada o nível de sinal que corresponde a potência recebida nos utilizadores a variar entre [-115 a -5] dBm dentro da área de planeamento.

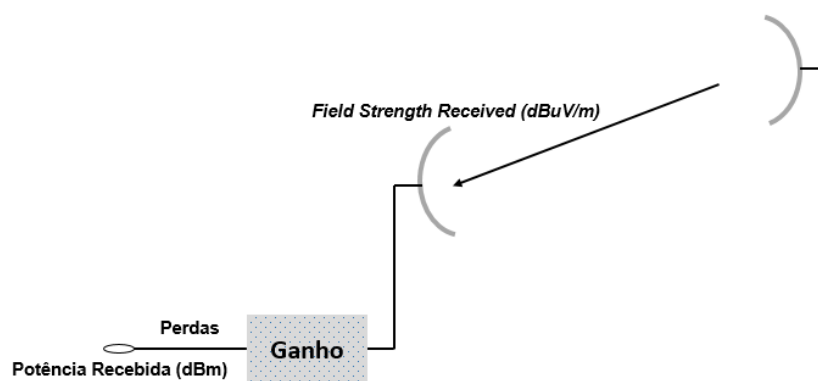


Figura 4.8 – Esquema de percurso do FSR e da Potência Recebida.

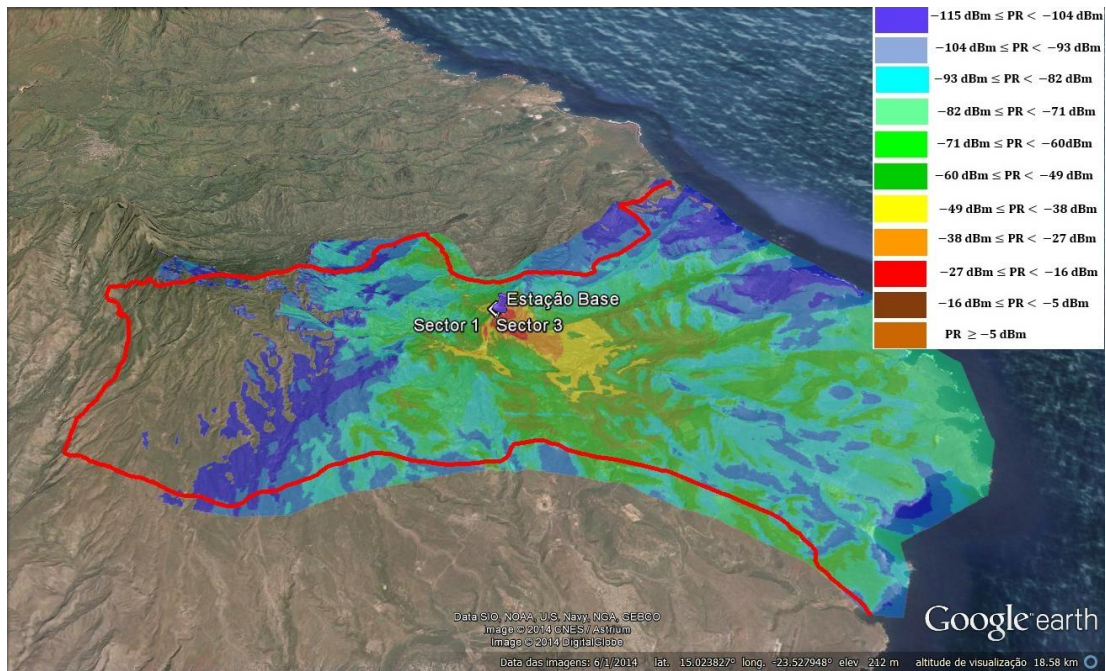


Figura 4.9 – Nível de sinal recebido, apresentado no GE.

Baseando no resultado do cálculo do *link budget*, a área de cobertura do eNodeB é de 314.04 km², o que parece suficiente para cobrir uma área de 137.6 km², mas devido a morfologia do terreno, existem zonas de sombra com a potência recebida menor do que -100 dBm, ou seja, pode observar que existe sector que apresenta melhores condições no que se refere a nível de sinal a um determinado ponto dentro da área de cobertura, Figura 4.9.

Para analisar a variação da potência recebida nos utilizadores, foram feitas as médias dos valores da potência recebida a variar com a distância dentro do raio da célula com um *step* de 1 km. O gráfico da Figura 4.10 apresenta a variação da potência média recebida em função da distância do utilizador relativamente ao eNodeB.

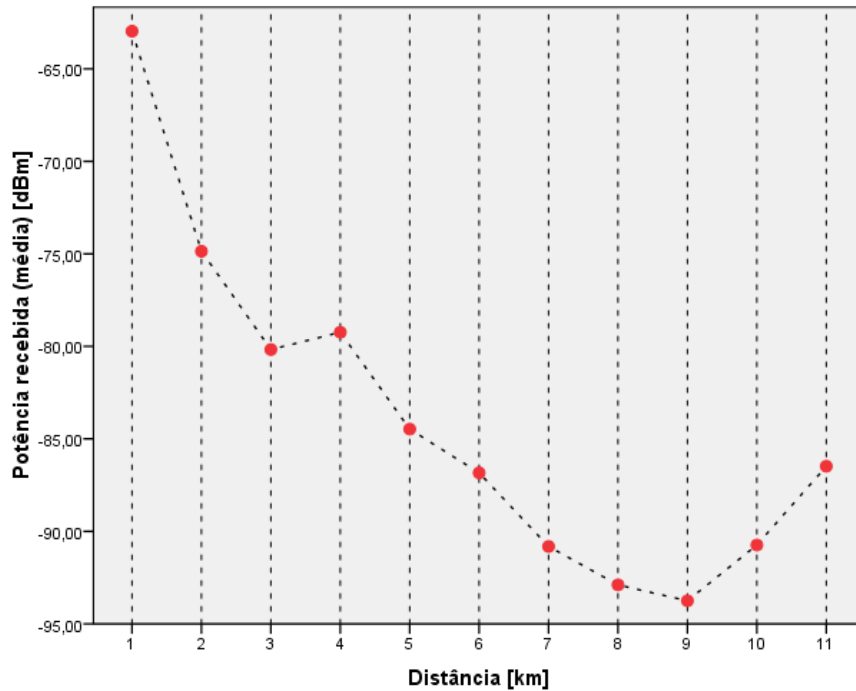


Figura 4.10 – Variação da potência recebida ao longo da área de cobertura.

Analisando a Figura 4.10 conclui-se que à medida que se aproxima do limite da célula a potência diminui. Houve alguns pontos no mapa, que para a mesma distância do eNodeB apresenta o valor da potência bastante diferenciada, isto acontece porque a potência não é recebida de forma uniforme, devido a morfologia do terreno.

Para medir a cobertura LTE no DL simulou-se o nível de potência recebida por sinal de referência, designada de *Reference Signal Received Power* (RSRP).

- ***Reference Signal Received Power***

A RSRP é a potência média recebida dos sinais de referência da largura de banda utilizada, ou seja, a RSRP representa a potência média medida pelo UE. O UE envia relatórios de medidas *Radio Resource Control* (RRC) que incluem os valores medidos de RSRP dentro da gama [-140,- 44] dBm. A principal funcionalidade do RSRP é determinar qual é a célula com melhor cobertura em DL e selecionar essa célula como *Serving Cell* [32].

Teoricamente, tendo em conta a largura de banda utilizada de 10MHz, que corresponde a 50 RBs com 12 sub-portadoras em cada RB, com espaçamento de 15KHz, assim, com a potência de transmissão de 46dBm, resulta numa potência de transmissão da *reference signal* ($P_{Tx_{RS}}$) de 18.22 dBm ($46-10\log(12*50)$). Tendo a $P_{Tx_{RS}}$ e as perdas de propagação

obtêm-se a potência recebida em sinais de referência nos utilizadores, que corresponde ao RSRP. O 3GPP define o RSRP como a potência recebida de um único *resource element*.

$$\text{RSRP [dBm]} = P_{\text{Tx_RS}} - L_p \quad (4.1)$$

A Figura 4.11 representa o nível de sinal RSRP do eNodeB a variar entre [-115, -35] dBm. Os níveis de sinais RSRP apresentados, estão ligeiramente baixos, o que poderá ser causado pelas perdas existentes na ligação entre o eNodeB e o UE.

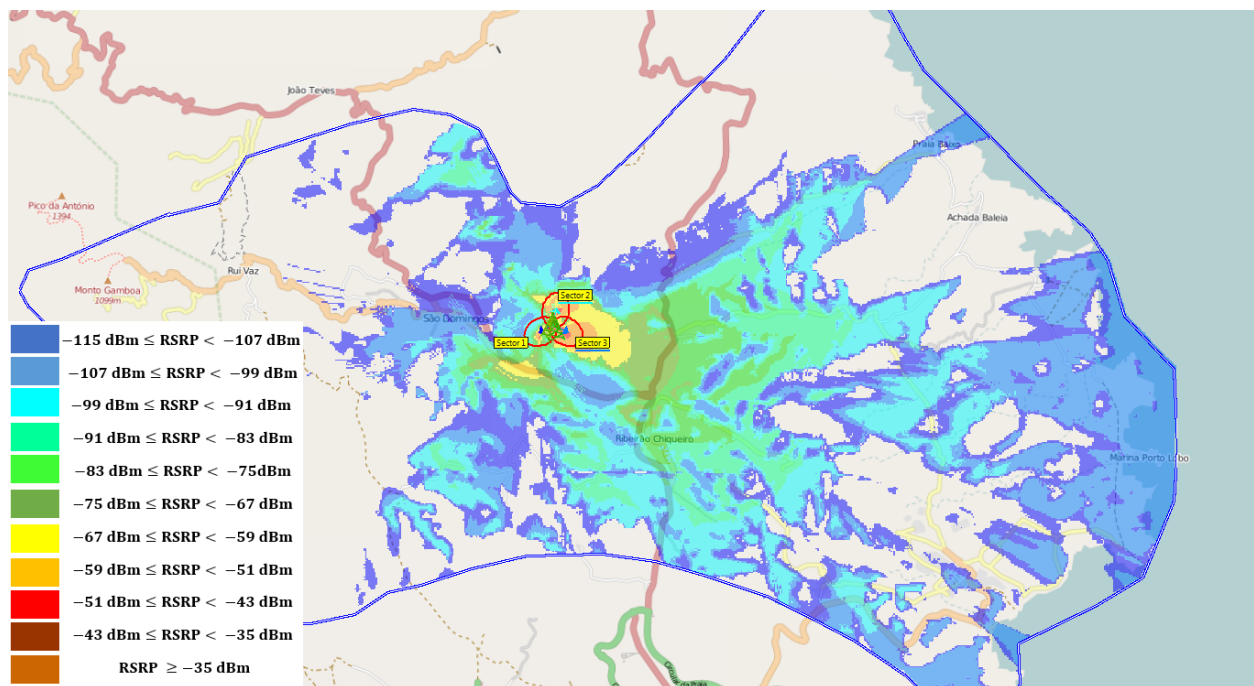


Figura 4.11 – Nível de cobertura RSRP do eNodeB.

Através da Figura 4.11, consegue verificar maior intensidade do sinal na direção de cada sector mais propriamente no centro da célula. Na direção do sector 3 apresenta maior intensidade devido à morfologia do terreno, uma vez que na direção do sector 1 e sector 2 apresentam maiores obstáculos que provocam maiores perdas.

Se o RSRP for maior do que -75dBm pode resultar num excelente QoS, desde que não haja muitos utilizadores ativos a partilharem a mesma largura de banda disponível da célula.

Na faixa dos -75 dBm e -95 dBm, pode esperar uma ligeira degradação da QoS, por exemplo o *throughput* vai diminuir. Para o RSRP abaixo dos -95 dBm a QoS se torna inaceitável e o *throughput* tende a diminuir para zero.

A RSRP é uma medida importante, mas por si só não dá nenhuma indicação da qualidade do sinal. Para a indicação da qualidade existe a *Reference Signal Reference Quality* (RSRQ).

- ***Reference Signal Received Quality***

A RSRQ é semelhante ao E_c/N_0 em 3G e representa a qualidade do sinal de referência que o UE recebe da célula candidata.

Tal como na RSRP, a RSRQ é usado para determinar a melhor célula LTE dentro da área geográfica, também serve de critério para a escolha da célula para o processo de *handover*. De acordo com [5] é definida pela equação (4.2), como se pode ver esta não é uma medição direta, depende da RSRP, da RSSI e do RB que por sua vez depende da largura de banda. O RSSI indica o nível de potência recebida pelo utilizador.

$$RSRQ = n_{RB} \times \frac{RSRP}{RSSI} \quad (4.2)$$

Medindo a RSRQ torna-se particularmente importante perto da fronteira da célula quando é necessário tomar a decisão no caso de *handover* de uma célula para outra, porque a RSRQ combina a força do sinal bem como o nível de interferência. A RSRQ é usada apenas durante o estado *connected*.

A RSRQ é definida dentro da gama [-19.5,-3] dB com uma resolução de 0.5 dB [32]. A RSRQ da célula aumenta com o aumento da RSRP e tende a diminuir até sair da gama, caso a RSRP for muito baixa.

Quando são comparados indicadores de RSRQ e RSRP registados na mesma localização geográfica, é possível determinar se existem problemas de cobertura ou de interferência nessa localização. Na Figura 4.12, pode observar o resultado de simulação da variação da RSRQ e RSRP ao longo da distância de cobertura.

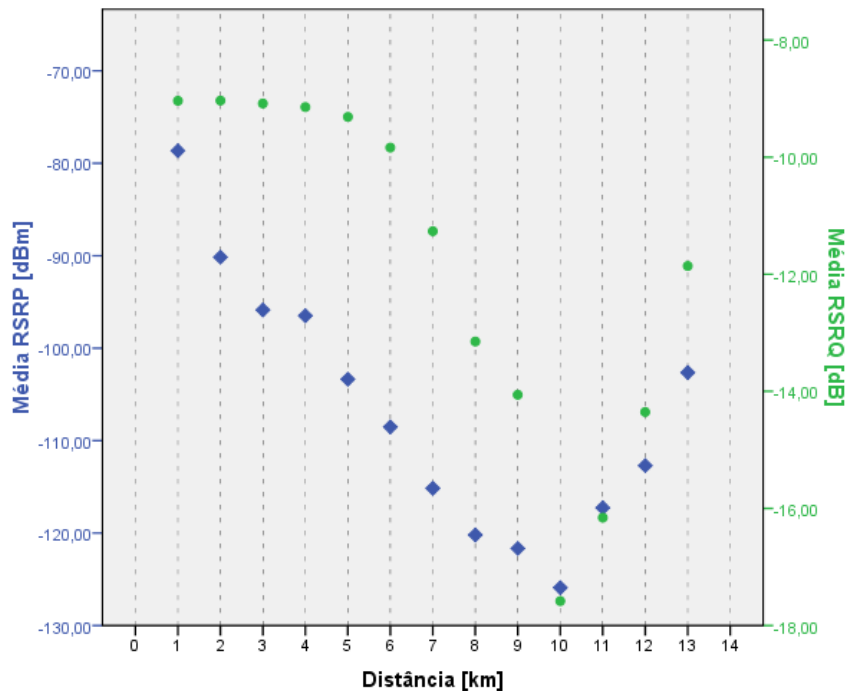


Figura 4.12 – Comparação entre RSRQ e RSRP.

Se um utilizador mudar de localização ou se as condições rádio se alterarem e a RSRP melhorar ou permanecer estável, quando a RSRQ se deteriora, é sinal de que houve um aumento de interferência naquela zona. Caso a RSRP e a RSRQ se decrescem ao mesmo tempo, é sinal de que existem problemas de cobertura na localização, como se pode ver na Figura 4.12. A ligação do utilizador para uma célula LTE pode ser feita apenas se os níveis mínimos de RSRP e RSRQ forem alcançados.

Para resolver o problema de cobertura nas zonas de sombra que se verificou na Figura 4.9 é preciso implementar outras estações base, ou ampliar a cobertura da célula servidora utilizando o repetidor de sinal.

Antes de instalar o repetidor foi analisada a variação da SINR da estação base ao longo da área de cobertura. Uma vez que com a SINR consegue saber qual o débito binário no ponto de instalação do repetidor

- **Signal to Interference plus Noise Ratio**

A SINR no DL, conforme foi explicado anteriormente e na Figura 4.2, vai depender do sinal transmitido pelo eNodeB, da perda de propagação entre eNodeB – UE, que por sua vez depende da distância entre eles e do ruído térmico. O resultado da SINR da estação base encontra-se apresentado na Figura 4.13.

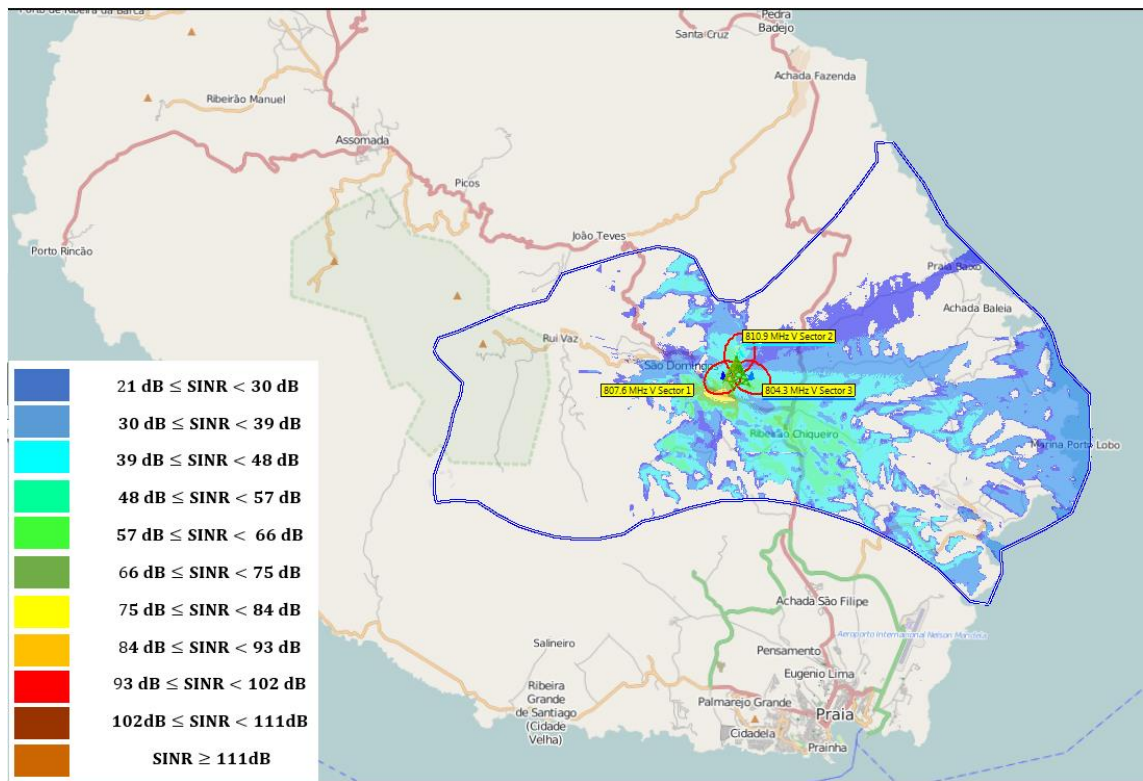


Figura 4.13 – Mapa da cobertura da SINR do eNodeB.

Os valores de SINR para serem considerados bons devem estar acima dos 0 dB. É possível observar na Figura 4.13, que o valor da SINR na área de cobertura pretendida, atinge o seu valor máximo no centro da célula, onde está localizado o eNodeB. Por outro lado, na fronteira da célula, o valor da SINR é mínimo. Nos locais onde o SINR é muito fraco pode ser reforçada com a implementação do repetidor, uma vez que na área de cobertura existe apenas uma estação base, faz com que a interferência seja baixa ou nenhuma e a SINR seja alta.

Um utilizador que se encontra na periferia da célula será sempre aquele que mais sofrerá interferência e conseqüentemente terá a pior cobertura do sistema.

Depois de gerar os 7000 utilizadores de forma aleatória ao longo da área de cobertura, foram analisadas os valores de *throughput* da célula e por RB em função da SINR, onde foi elaborado o gráfico da Figura 4.14.

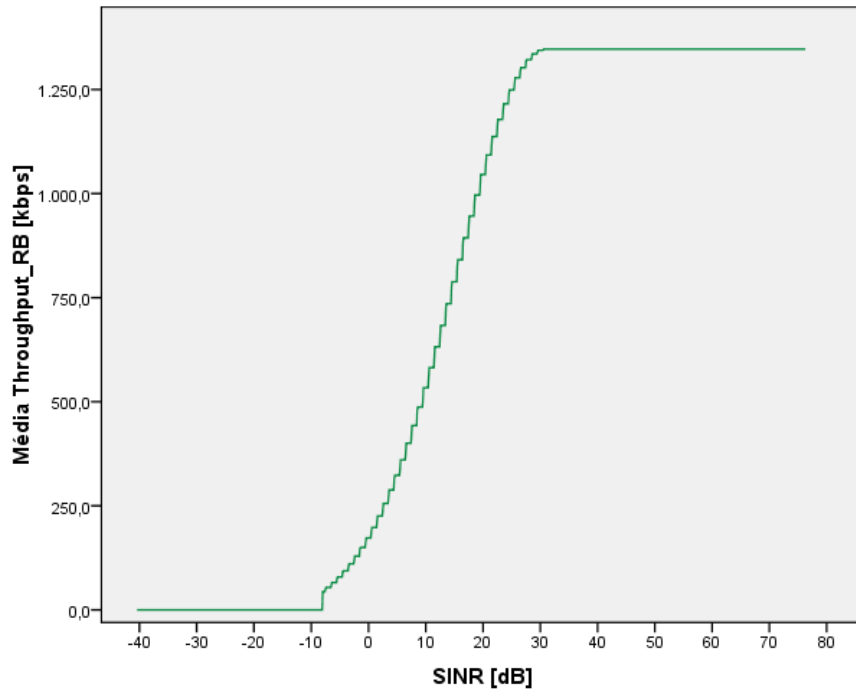


Figura 4.14 – Relação do *Throughput* por RB vs SINR.

Fazendo uma análise gráfica da média do *throughput* por RB a variar com a SINR, apresentado na Figura 4.14, verifica-se que os utilizadores que se encontram na área com menor SINR são os que apresentam *throughput* mais baixo. É possível observar que existe um aumento do *throughput* por RB, com o aumento da SINR, tal como era espectável, isto comprova os resultados teóricos obtidos anteriormente.

Para perceber melhor a variação média do *throughput* por RB em cada sector, construiu o gráfico da Figura 4.15.

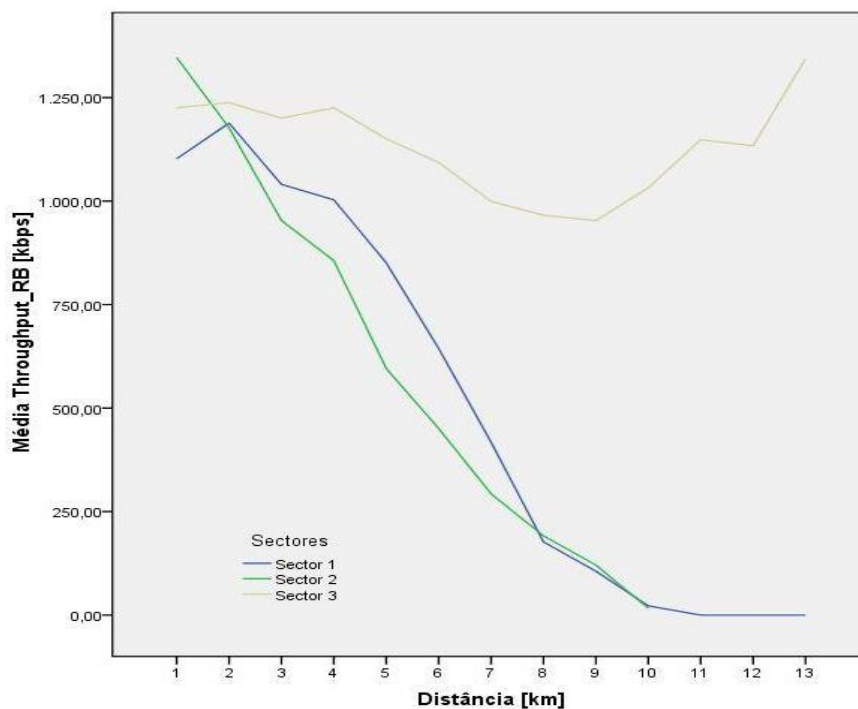


Figura 4.15 – Variação do *Throughput* por RB vs. Distância em cada sector.

Na Figura 4.15 pode observar a média do *throughput* por RB de cada sector em função da distância. O sector 3 é o que apresenta a maior variação do *throughput* devido a existência de menos obstáculos, provocando assim menos perdas, isto comprova o resultado do SINR obtido na Figura 4.13.

Uma vez analisado o *throughput* por RB também é necessário verificar o débito binário de cada sector após a simulação da rede, e o resultado se encontra na Figura 4.16.

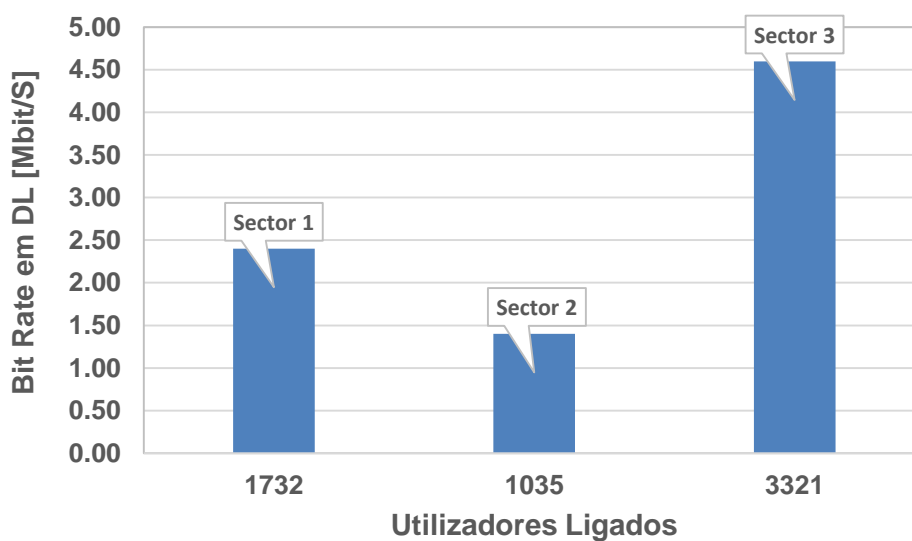


Figura 4.16 – Bit Rate por sector em DL.

O gráfico da Figura 4.16 representa o débito binário de cada sector em *downlink*, e o número de utilizadores ligado a cada sector depois da simulação, como se pode observar existem um total de 6088 utilizadores ligado a estação base, o que quer dizer que apenas 912 utilizadores dos 7000, não conseguiram receber o sinal do eNodeB, ou seja, 87% dos utilizadores no mapa conseguem receber o sinal.

Através de simulação do tráfego, é apresentado o resultado do tráfego oferecido e solicitado por cada sector na Tabela 4.8, ou seja dos cada sector oferece um tráfego de 14.82Mbps no qual apenas 15.18 kbps foram utilizadas naquele instante.

Tabela 4.8 – Tráfego oferecido por cada sector.

Sectores	Total RB	RB alocado	Tráfego solicitado [kbps]	Tráfego oferecido [Mbps]
Sector 1	11	11	15.18	14.82
Sector 2	11	11	15.18	14.82
Sector 3	11	11	15.18	14.82

Depois de analisar os parâmetros de cobertura, foi necessário analisar a percentagem da área coberta pelo eNodeB, e o resultado de simulação encontra-se na Figura 4.17.

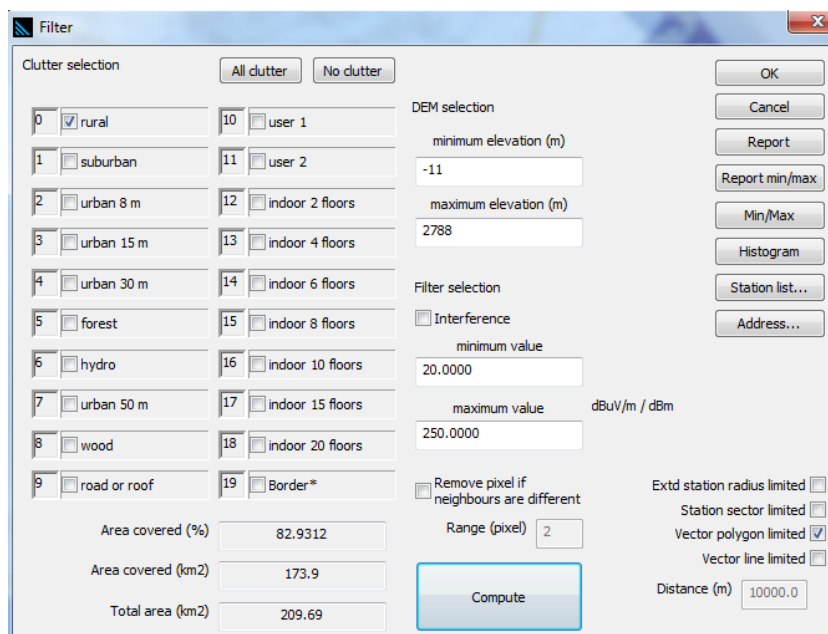


Figura 4.17 – Percentagem da área coberta pelo eNodeB.

Também é possível ver a percentagem de cobertura por cada sector, como era de esperar o sector 1 é o que apresenta a menor percentagem de cobertura devido à presença dos obstáculos, Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Percentagem de cobertura por sector.

Sectores	Área de cobertura [km ²]	Área coberta [km ²]	Percentagem de	Percentagem de
			cobertura [%]	interferência [%]
Sector 1	209.6	132	62.96	0.00
Sector 2	209.6	146	69.42	0.00
Sector 3	209.6	147	70.12	0.00

Nos cálculos teóricos considerou-se uma percentagem de cobertura de 95%. Depois de simulação da rede, com uma estação base, 82.9% da área ficou coberta.

A Figura 4.18, apresenta os utilizadores distribuídos ao longo da área de cobertura.

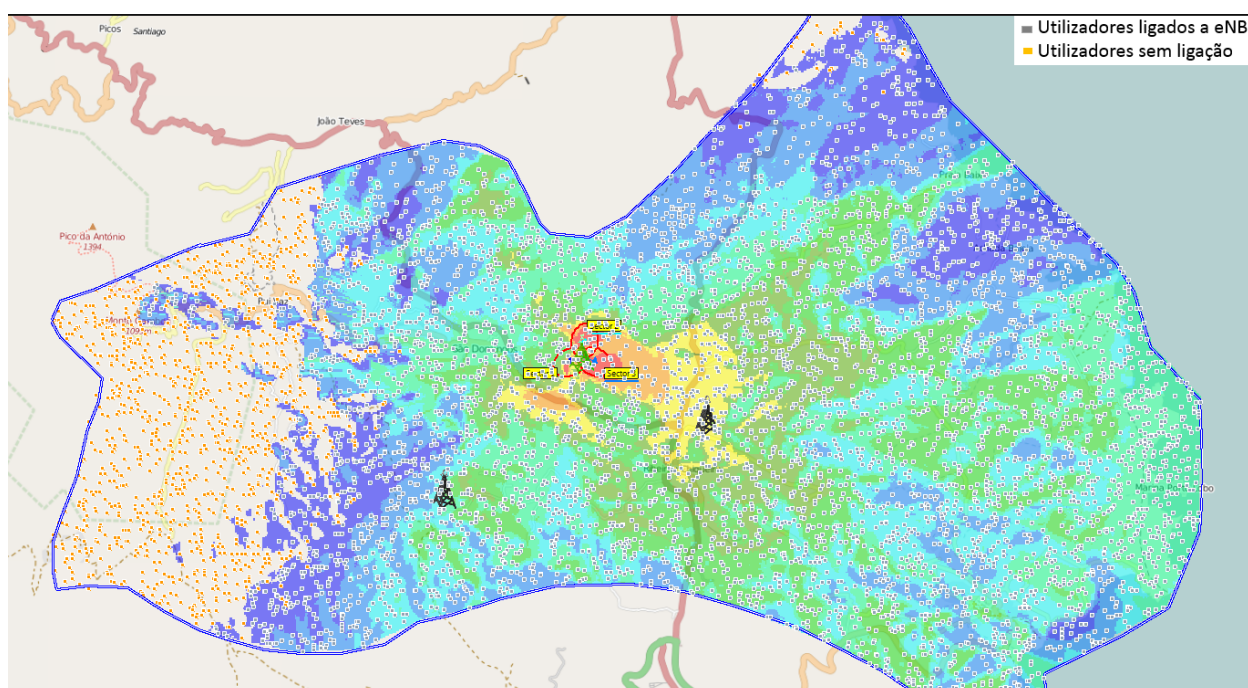


Figura 4.18 – Utilizadores ligados à estação base.

Após a simulação da rede permitindo a ligação dos utilizadores com a estação base, pode observar os vários utilizadores ligados à estação base (pontos cinzas) e os que não conseguiram obter sinal proveniente do eNodeB (pontos laranja) ou o nível de sinal é muito baixo (abaixo dos -100dBm). Esses utilizadores encontram-se nas zonas consideradas zonas de sombra.

4.2.2. Cobertura com Repetidores nas áreas de sombra

Neste cenário vai ser utilizado o repetidor para resolver o problema de cobertura do cenário anterior.

Após a análise dos resultados de simulação do eNodeB chegou a conclusão que é preciso mais estações base para garantir a cobertura pretendida devido à morfologia do terreno.

Sendo a capacidade do eNodeB calculada, suficiente para garantir o serviço com apenas uma estação base, vai ser utilizado o repetidor para melhorar a cobertura.

Dentro da área de planejamento existe utilizadores em que o *throughput* recebido aproxima dos zeros kbps conforme se verificou no gráfico da Figura 4.14, logo nessas zonas é que vai haver a necessidade de ampliar a cobertura.

A Figura 4.19 mostra o fluxograma dos principais pontos focados na decisão do uso do repetidor.

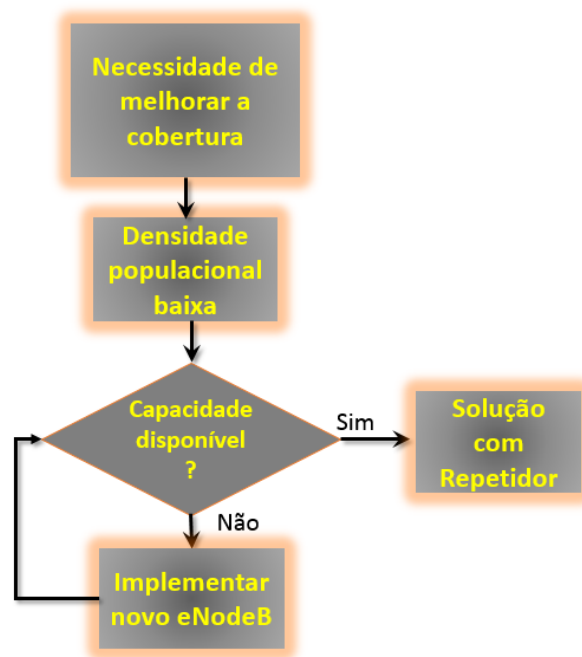


Figura 4.19 – Fluxograma da decisão do uso do repetidor.

O funcionamento do repetidor é de forma dependente da estação base, ou seja só reenvia o sinal para o utilizador se conseguir receber o sinal da estação base, para isso é preciso localizar o repetidor no ponto cujo a SINR seja aceitável, para garantir um débito binário que

seja capaz de servir a população em causa, ou seja, o débito binário do eNodeB vai ser maior ou igual ao débito binário do repetidor.

Antes de iniciar com a configuração dos repetidores foram feitas os cálculos teóricos do débito binário e da SINR de acordo com o número de utilizadores, onde os resultados se encontram apresentados na Tabela 4.10. Esses resultados abrangem a zona de Rui Vaz, Milho Branco e Praia Formosa, onde apresenta maior lacuna de cobertura.

Tabela 4.10 – Débito binário e SINR do repetidor.

Parâmetros	Rui Vaz	Milho Branco / Praia formosa
Utilizadores a serem servidas	457	498
Tráfego mensal por utilizador [Mbyte]	298	298
Tráfego diário por utilizador [kbps]	0.92	0.92
Débito Binário [Kbps]	420.3	458.0
SINR [dB]	15.98	19.74

O gráfico da Figura 4.20 ilustra a variação do débito binário do repetidor em função do número de utilizadores.

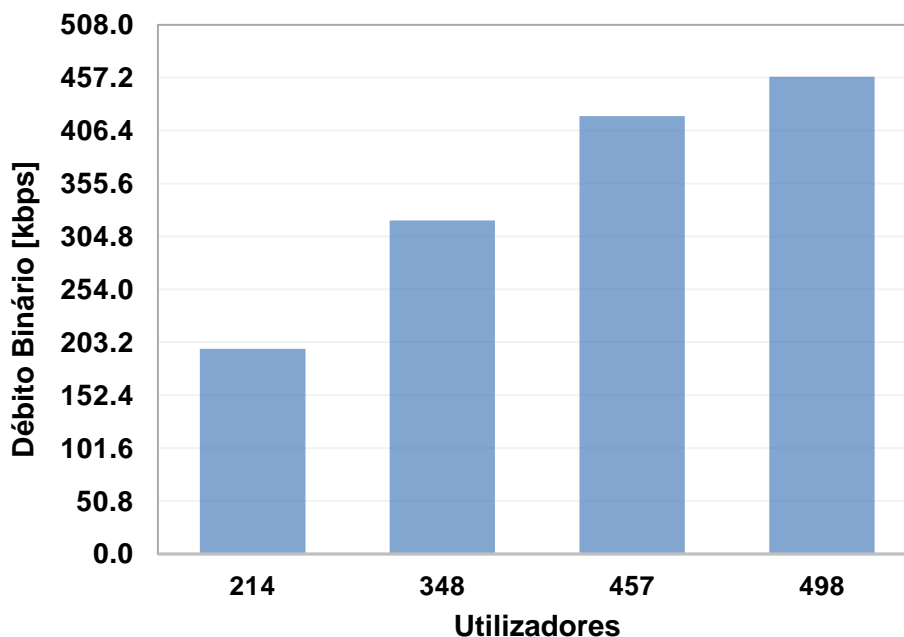


Figura 4.20 – Débito binário do repetidor em função do número de utilizadores.

O gráfico da Figura 4.20, serve para demonstrar a variação do débito binário com o número dos utilizadores. Quanto maior for o número de utilizadores maior será o débito binário necessário.

Para um débito binário elevado é preciso que a SINR seja elevada. O gráfico da Figura 4.21 ilustra a variação do débito binário com a SINR do repetidor, á medida que aumenta o número de utilizadores.

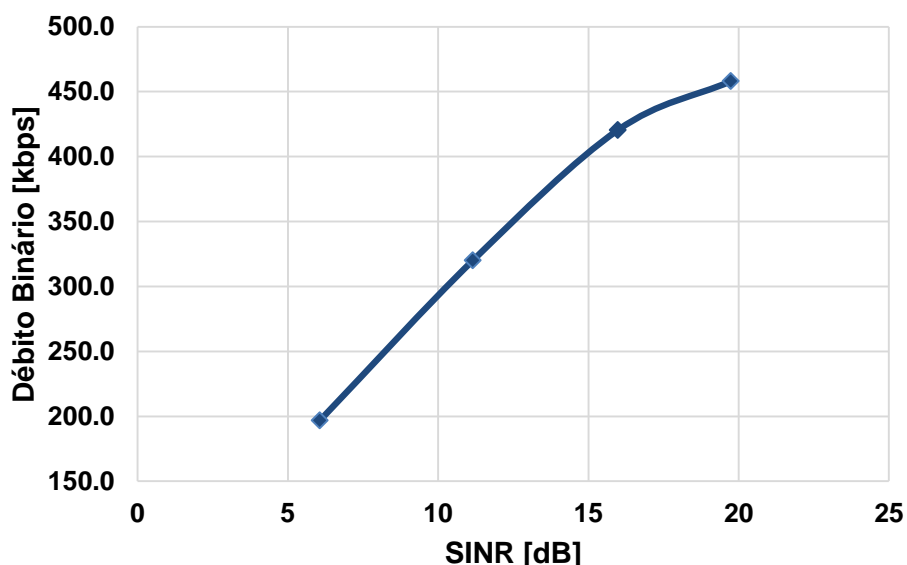


Figura 4.21 – SINR vs. Débito binário do repetidor.

Como é de esperar o débito binário do repetidor aumenta com o aumento da SINR o que quer dizer que quanto mais afastados estiverem os utilizadores, menor será a SINR e consequentemente menor será o débito binário disponível para esses utilizadores.

Baseando no débito binário e no valor da SINR, consegue encontrar uma localização para os repetidores no mapa.

As localizações dos repetidores foram feitas de acordo com o nível de sinal recebida nos utilizadores, a SINR do eNodeB e do repetidor e os obstáculos existentes, ou seja, a localização também foi escolhida de maneira que o repetidor se encontra em linha de vista com a célula servidora, para evitar maiores perdas.

No ponto de localização do repetidor o valor do SINR tem que ser elevado, para que o débito binário seja suficiente para garantir o serviço aos utilizadores.

Antes da instalação dos repetidores, foram medidas a intensidade do sinal, a RSRP, RSRQ e SINR na área de instalação dos repetidores. Os resultados obtidos encontram-se apresentados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Resultados de simulação no ponto de localização do repetidor.

Parâmetros	Células a Repetir	
	Sector 1 (Repetidor 2)	Sector 3 (Repetidor 1)
Distância da célula servidora [km]	3.9	2.83
Potência Recebida [dBm]	- 65.00	-44.40
RS [dBm]	-73.58	-56.79
RSRP [dBm]	-94.16	-77.12
RSSI [dBm]	-63.36	-46.33
RSRQ [dB]	-9.03	-9.54
SNIR PDSCH [dB]	40.35	46.66
SNIR PDCCH [dB]	31.73	38.00
SNIR PBCH [dB]	18.85	20.17
Frequência [MHz]	801	807.6

Na Tabela 4.12 estão apresentados as coordenadas geográficas das localizações dos repetidores no mapa.

Tabela 4.12 – Coordenadas geográficas da localização dos Repetidores.

Localização dos repetidores		
Repetidores	Latitude	Longitude
1	15.005310228°	-23.311050405°
2	15.000274643°	-23.340661998°

A Figura 4.22, ilustra a imagem das localizações dos repetidores no *Google Earth* de acordo com o nível de SINR das células servidoras.

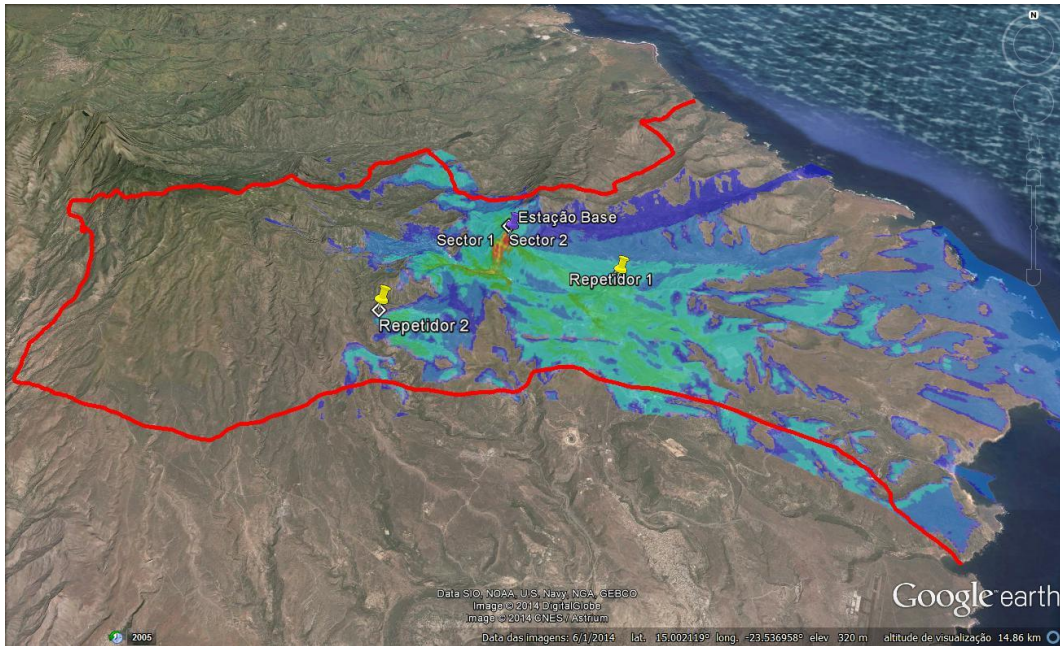


Figura 4.22 – Localização dos repetidores no GE de acordo com o SINR.

Para configurar os repetidores recorreu-se ao *datasheet* do anexo F e aos parâmetros ilustradas na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 – Especificação técnica do Repetidor.

Parâmetros do Repetidor	
Potência [dBm]	32
Largura de banda [MHz]	10
Ganho máximo do repetidor [dB]	80
Configuração da antena e	(Donor Antenna) RN-eNB → Yagi → 18
Ganhos [dBi]	(Service Antenna) RN-UE → diretivas → 18
Banda de frequência [MHz]	[791-821] [832-862]
Altura das antenas [m]	15
Configuração da antena	Tx-2, Rx-2 (MIMO)
Figura do Ruído [dB]	5
Modo <i>Duplex</i> LTE	FDD
Ganho do amplificador	75
Isolamento [dB]	25
<i>Shadowing standard deviation</i>	eNB-UE: 8 dB
	RN-UE: 10 dB

O ganho da antena do repetidor deverá ser alta, para poder amplificar o sinal recebido, que pode ser baixo. Segundo o *datasheet* em anexo F ganho do repetidor varia entre 50 a 80 dB. O Padrão de antena é altamente diretiva com lobos secundários nulo. O azimute e o *tilt* das antenas têm que estar orientado para a zona a cobrir.

Após as localizações e configurações dos repetidores, foram efetuadas uma nova simulação, no qual o resultado do nível de sinal recebido/potência recebida é ilustrado na Figura 4.23.

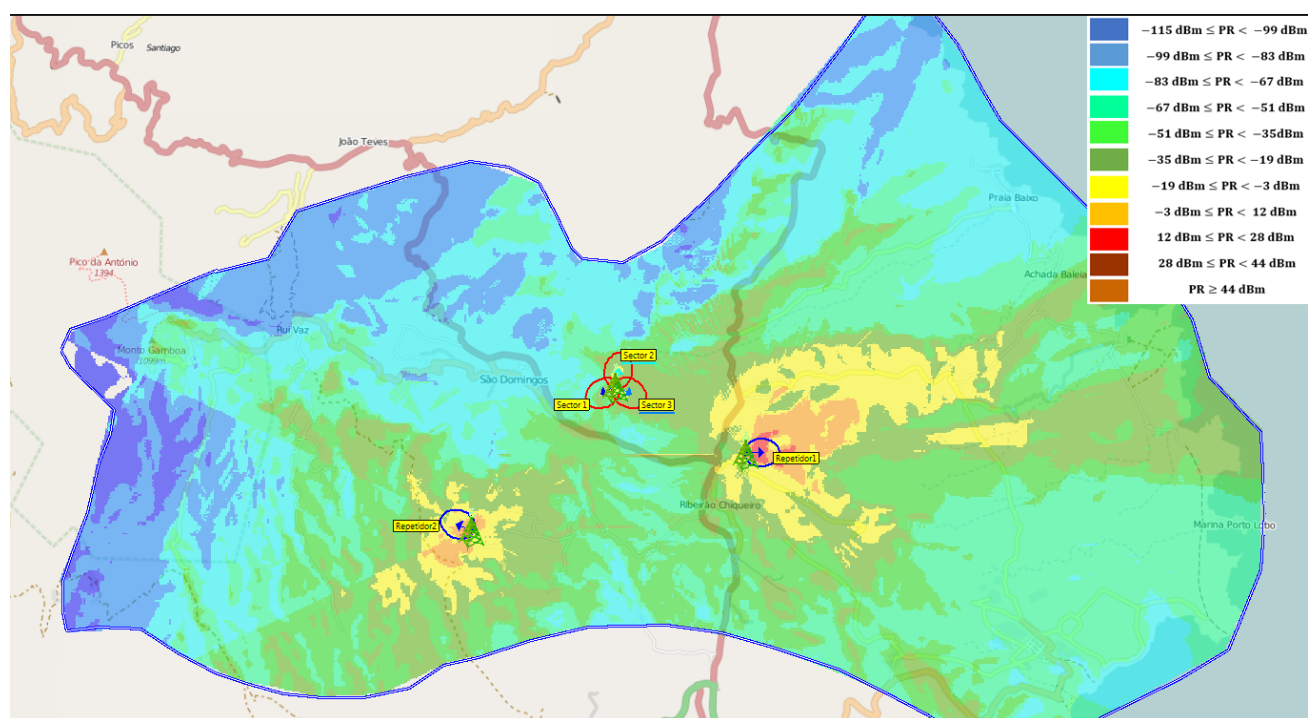


Figura 4.23 – Nível de Potência recebida com o uso do Repetidor.

Como se pode observar, com a instalação do repetidor, consegue ampliar o sinal do eNodeB para a fronteira da célula, onde apresentava maior lacuna de cobertura. E a percentagem de cobertura conseguida é de 99,85%, Figura 4.24, com um nível de potência a variar entre [-115 a 44] dBm.

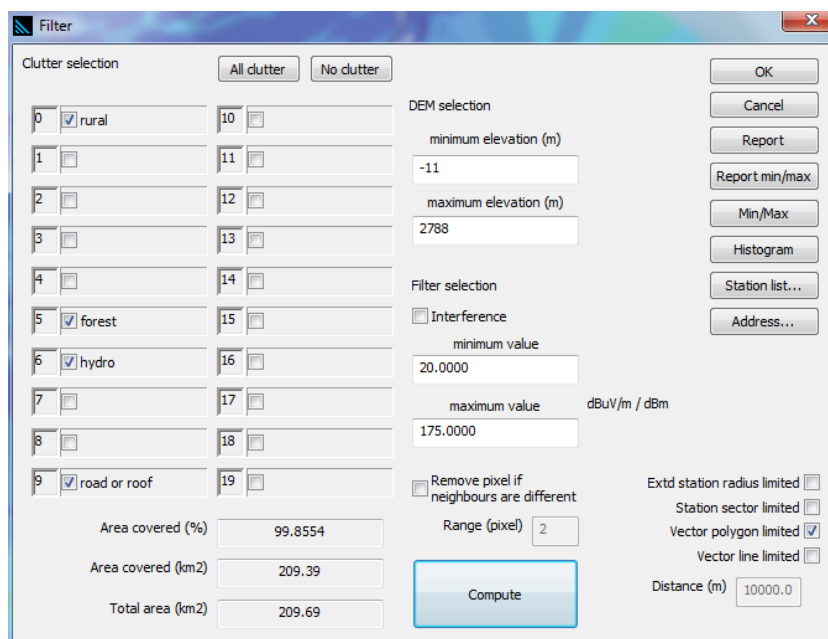


Figura 4.24 – Percentagem de cobertura após a instalação do repetidor.

De acordo com a simulação feita, com a utilização do repetidor, pode observar a distribuição do nível de sinal RSRP a variar entre [-115 a 24] dBm, Figura 4.25.

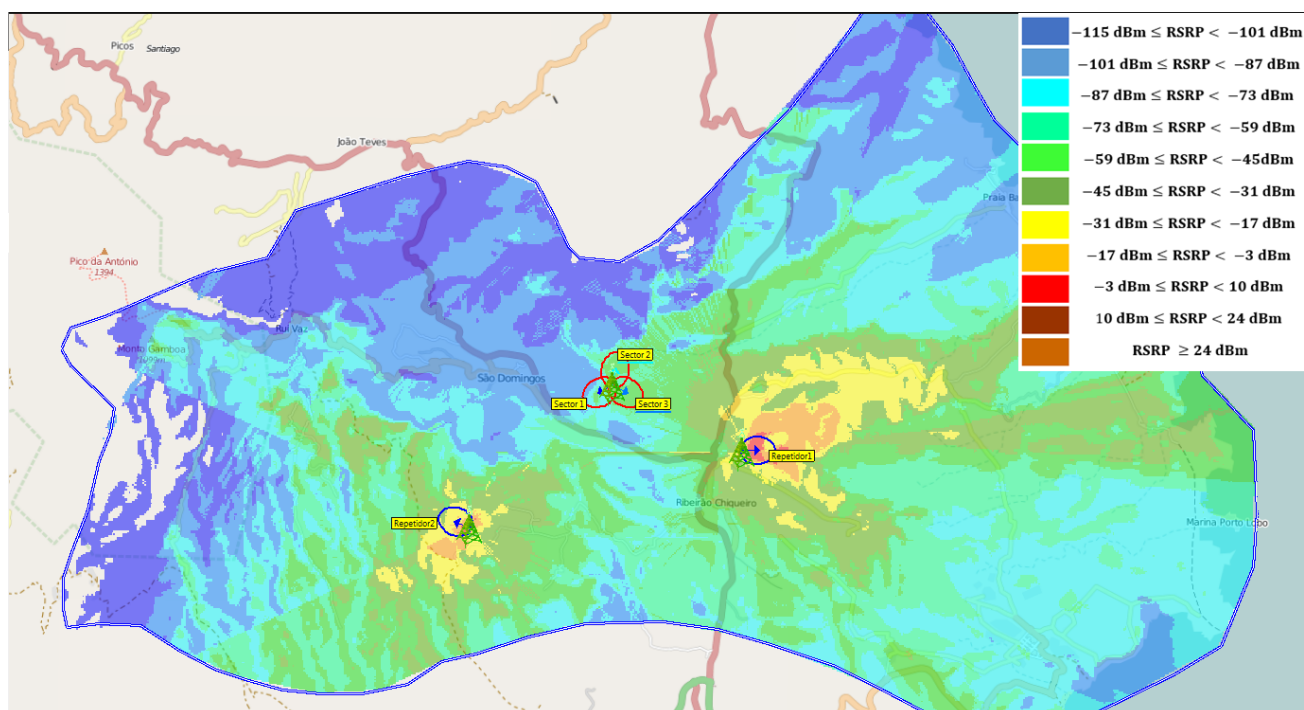


Figura 4.25 – Nível de sinal RSRP com o uso do Repetidor.

Após análise ao resultado da RSRP com a instalação do repetidor, comparando com o resultado obtido da simulação do eNodeB, verifica-se que os níveis de RSRP estão ligeiramente acima, o que poderá ter aumentado devido ao ganho do amplificador e das antenas do repetidor.

A Figura 4.26 mostra os resultados de simulação do SINR com a implementação dos repetidores.

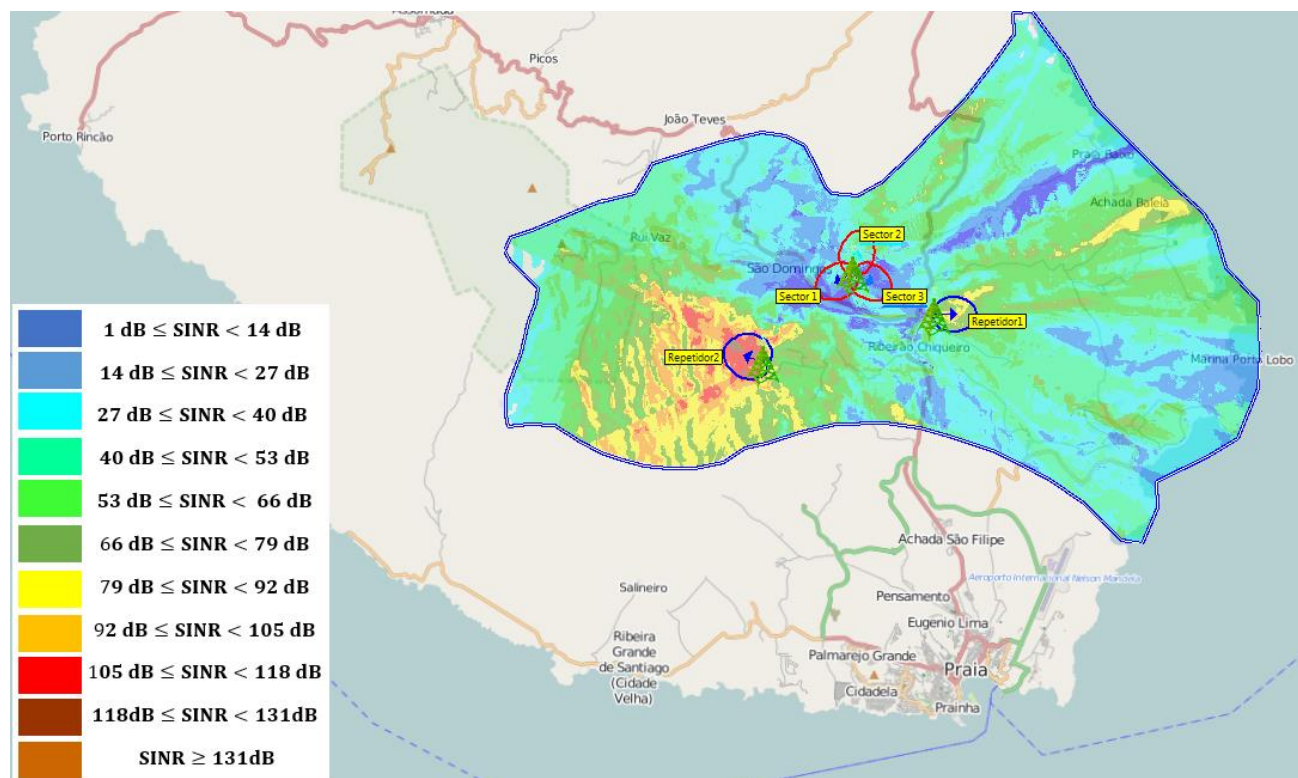


Figura 4.26 – Nível de SINR com o uso do Repetidor.

Uma vez que a SINR varia de acordo com a carga existente na rede e com a taxa de dados que está a ser solicitada pelos utilizadores num determinado momento, analisando a Figura 4.26, observa-se que a SINR na fronteira da célula, com a instalação dos repetidores, é superior ao presente na área do eNodeB, ou seja, da mesma forma que aconteceu no resultado de simulação da RSRP, o repetidor ao receber o sinal adiciona o ganho das antenas e o ganho do amplificador, e isto “compensa” as perdas obtidas entre o repetidor e o eNodeB.

Com o sistema completo a funcionar e os utilizadores na rede, analisou-se o débito binário oferecido por cada sector da estação base e do repetidor, o resultado encontra-se na Figura 4.27.

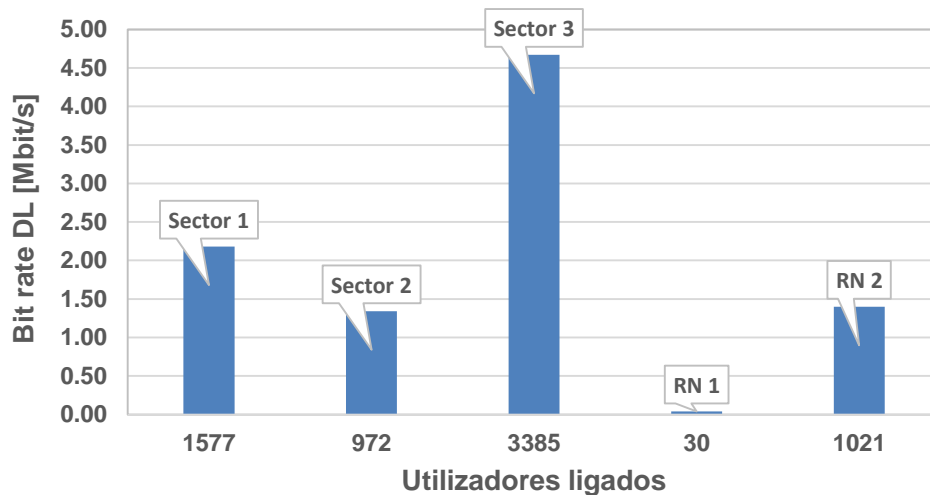


Figura 4.27 - Débito binário dos sectores e dos repetidores.

Através da Figura 4.27, observa-se que o sector com maior débito binário continua a ser o sector 3 visto que é o sector que apresenta maior SINR, Figura 4.13.

No que se refere ao *throughput* da célula esta é definida como sendo o número total de bits numa célula transferidos pelos utilizadores para a situação do DL, e no UL, a definição é o mesmo, mas os utilizadores fazem o *upload* em vez de *download*.

A Figura 4.28 apresenta o resultado do nível de *throughput* ao longo da área de cobertura obtida a partir de simulação da rede, onde as diferentes cores representam os diferentes valores de *throughput* calculado pela ferramenta.

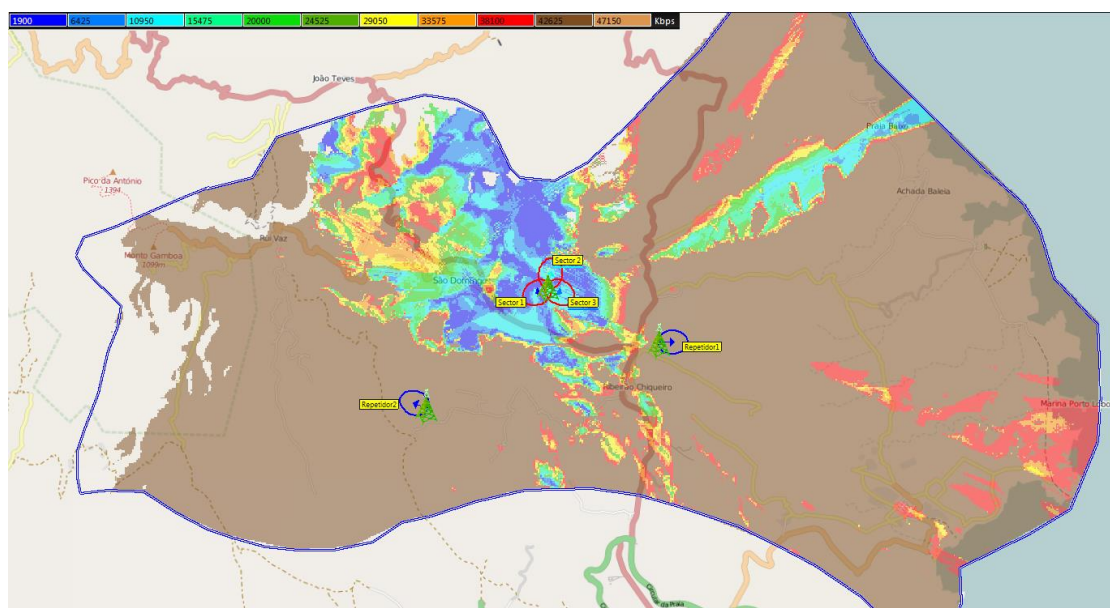


Figura 4.28 – *Throughput* dentro da área de cobertura usando antena 2x2 MIMO.

Como se pode observar com a instalação do repetidor o *throughput* da célula aumentou, principalmente na fronteira das células onde estão instalados os repetidores, para os valores a variar entre [1.9 a 4.7] Mbps, o que não aconteceu no primeiro cenário com apenas uma estação base.

Capítulo 5

5. Conclusões

O objetivo principal desta dissertação é realizar um planeamento de rede LTE de baixo custo para zona rural mas propriamente para uma pequena aldeia em Cabo Verde, cuja morfologia do terreno implica um planeamento cuidadosa tendo em conta a localização das populações.

Um dos principais objetivos é efetuar um planeamento que seja aceitável a nível de qualidade do serviço e a nível económico. Para cumprir esses objetivos de qualidade e o preço é proposto a solução de uso do repetidor. Para isso foi realizado um estudo teórico no âmbito do planeamento LTE, em geral, focado para zonas rurais. Depois de perceber o planeamento para zonas rurais iniciou-se o estudo dos tipos de repetidores que podiam ser utilizados no planeamento LTE e qual seria o mais apropriado tanto a nível das características técnicas, no modo de funcionamento e a nível económico.

No capítulo 3 foram apresentados os principais cálculos para identificar a localização dos repetidores bem como o débito binário e o SINR da estação base e do repetidor.

No capítulo 4 foram apresentados os resultados de vários testes a nível de cobertura e capacidade, nomeadamente o nível de sinal RSRP, o valor de SINR do eNodeB e do repetidor, a distribuição dos utilizadores ao longo da área de cobertura, o débito binário, o *throughput* por RB e o *throughput* ao longo da área de cobertura.

Em relação à capacidade da estação base perante os cálculos feitos, concluiu-se que apenas 24% da capacidade de uma estação base é suficiente para garantir o serviço a um total de 7000 utilizadores.

Concluiu-se que, em relação ao nível de sinal recebido nos utilizadores e qualidade, este de uma forma geral cumpre os requisitos teóricos relativos, tendo em conta o valor de RSRQ obtido nas simulações.

No primeiro cenário com apenas uma estação base, concluiu-se que o débito binário varia em cada sector, dependendo do número de utilizadores ligados. O *Throughput* máximo da célula apresentada é de 14.818Mbps o que permite servir uma população em que o tráfego mensal é de 9.66Mbps.

Efetou-se um estudo para ver qual seria a localização do repetidor, concluiu-se que a sua localização depende de vários fatores, tais como, a SINR do eNodeB, o número de utilizadores a serem servidos pelo próprio repetidor, a capacidade e a localização dos utilizadores.

A melhor localização do repetidor foi escolhida com base no SINR na ligação *backhaul*.

Em relação a escolha do repetidor foi tido em conta um repetidor *In-band* devido ao objetivo da dissertação, que é ampliar a cobertura da célula tendo em conta a capacidade disponível. Também uma vantagem do repetidor *In-band* e que esta funciona na mesma gama de frequência do eNodeB dispensando assim um novo planeamento de frequência.

No simulador *ICS designer*, na configuração do repetidor foi reutilizada a frequência da célula servidora. Também foi tido em atenção a utilização da antena no repetidor, de maneira a evitar a utilização das antenas omnidirecionais com lóbulos traseiros, evitando a interferência com a macro célula.

No cenário com a instalação dos dois repetidores o *throughput* aumentou nas fronteiras da célula o que permitiu um maior SINR e débito binário. Desta forma, os repetidores constituem uma boa solução para aumentar a cobertura de células já existentes, cobrindo zonas de sombra ou mesmo dar cobertura a zonas com elevadas necessidades de capacidade.

Em relação à percentagem de cobertura obtida com apenas uma estação base, conclui-se que 82% da área foi coberta ou seja 87% dos utilizadores conseguem receber o sinal e com a instalação do repetidor 99% da área foi coberta.

Como em qualquer projeto ou dissertação desenvolvida, apesar dos resultados obtidos, melhorias adicionais, poderiam ser feitas de forma a tornar o projeto mais útil e mais atrativo.

Partindo do objetivo desta dissertação, que é o planeamento de redes LTE de baixo custo para zonas rurais, sugere-se a implementação de um algoritmo que permita minimizar o consumo de energia, uma vez que, nas zonas rurais é onde há maior dificuldade no fornecimento de energia e poucos acessos durante à noite.

Também sugere-se um planeamento de rede LTE de baixo custo abrangendo a ilha toda, o que se torna mais desafiante, porque dentro da ilha existem diferentes ambientes de propagação.

Sugere-se ainda uma análise financeira a fim de comparar os custos reais ou uma estimativa, da instalação e manutenção de uma estação base com o repetidor.

Bibliografia

- [1] “CVTelecom,” [Online]. Available: <http://www.cvtelecom.cv/content/hist%C3%B3ria>. [Acedido em Abril 2014].
- [2] B. Clerckx, A. Lozano e S. Sesia, “3GPP LTE and LTE Advanced,” *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2009, p. 167, 2009.
- [3] H. Holma e A. Toskala, *LTE for UMTS - OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access*, John Wiley & Sons Ltd, 2009.
- [4] M. Sharawi S., “RF Planning and Optimization for LTE Networks,” em *Evolved Cellular Network Planning and Optimization*.
- [5] S. Sesia, I. Toufik e M. Baker, *LTE – The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*, United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd, 2009.
- [6] Shen, J., Song, L., *Evolved Cellular Network Planning and Optimization for UMTS and LTE*, CRC Press, 2011.
- [7] Cho, B. Y., *3GPP R8 LTE Overview*, Intel Corporation.
- [8] Ericsson, “Coverage and Capacity Dimensioning,” Ericsson AB, Estocolmo, 2009-2010.
- [9] H. Holma e A. Toskala, *WCDMA for UMTS – HSPA Evolution and LTE*, 4ª ed., John Wiley & Sons, Ltd, 2007.
- [10] S. Tripathi, V. Kulkarni e A. Kumar, *LTE E-UTRAN and its Access Side Protocols*, Continous Computing.
- [11] Agilent Technologies, *3GPP Long Term Evolution: System Overview, Product Development and Test Challenges*. Application Note., Jun 2009.
- [12] S. Electronics, “LTE PHY Spec,” 24 Junho, 2008.
- [13] A. Martins, “Avaliação do Impacto Económico da Utilização de Repetidores Fixos numa Rede LTE,” 03 01 2013.
- [14] “Performance of Repeaters in 3GPP LTE,” *KTH School of Information and communications Technology (ICT) Radio Communication Systems (RCS)*.
- [15] N. Sami, “LTE features – ICS designer,” *ATDI Software Solution in Radiocommunications*, 2013.

- [16] A. SIHOMBING, "Performance of Repeaters in 3GPP LTE," Master of Science Thesis, Stockholm, Sweden, 2009.
- [17] "LTE-ADVANCED AND 4G WIRELESS COMMUNICATIONS, An Operator Perspective".
- [18] S. TABBANE, Long Term Evolution:Radio Network Planning, ITU ASP COE Training on, "Wireless Broadband".
- [19] ALU, "LTE Dimensioning Guidelines – Outdoor Link Budget," Sept 2010.
- [20] J. Nascimento, "Análise de Desempenho em Redes Móveis Long Term Evolution," Lisboa, 2012.
- [21] P. Vieira, "Modelos de Propagação para Comunicações Móveis," ISEL, Rádio-Comunicações, Lisboa, 2013.
- [22] Syed, A , Dimensioning of LTE Network Description of Models and Tools, Coverage and Capacity Estimation of 3GPP Long Term Evolution, Department of Electrical and Communications Engineering, Helsinki University of Technology, 2009.
- [23] "www.cisco.com," [Online]. Available: http://www.cisco.com/assets/sol/sp/vni/forecast_highlights_mobile/index.html . [Acedido em Maio 2014].
- [24] Mawjoud, Aubida.A.Jasim and Sami A. , "LTE Heterogeneous Network: A Case Study, Electrical Engineering Department, University of Mosul, Mosul, Iraq," *International Journal of Computer Applications (0975 – 8887)*, vol. 61, 2013.
- [25] K. Takafumi, Y. Junji, U. Kenji, T. Daisuke e N. Naoki, "LTE Cell Planning Support Tool," *NTT DOCOMO Technical Journal*, vol. 13, nº PCI, p. 64, 2012.
- [26] A. A.-M. Kassab, A. M. Morsy, M. M. M. Saad, M. M. M. Tantawy, M. M. Mohamed e H. A. K. e. W. A.-E. Elawam, "Lte Coverage and Capacity Dimensioning," Gio Zakradze, Cairo, 2013.
- [27] J. Salo, M. Nur-Alam, K. Chang, "Practical Introduction to LTE Radio Planning".
- [28] FUJITSU NETWORK COMMUNICATIONS INC, "Enhancing RF Capacity via Over-the-Air Repeaters," 2801 Telecom Parkway, Richardson, Texas 75082-3515.
- [29] A. A. O. MOHAMMED, M. H. M. NERMA, M. A. A. ELMALEEH e A. B. A. M. e. M. M. AHMED, "Utilization of Relay Node in LTE Network Cellular Systems," *International Journal of Management, IT and Engineering*, vol. 3, p. 356, 2013.

- [30] Higuchi e K. T. a. Kenichi, "Adaptive Amplify-and-Forward Relaying for Cellular Downlink," 2011.
- [31] "<http://www.atdi.com>," 2013. [Online].
- [32] G. Ralf, Kreher e Karsten, LTE Signaling, Troubleshooting and Optimization,, First Edition ed., John Wiley & Sons, Ltd, 2011.
- [33] H. Holma e A. Toskala, LTE for UMTS Evolution to LTE-Advanced, SECOND EDITION ed., John Wiley & Sons Ltd, 2011.
- [34] 3GPP, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN), Overall description; 10), Stage 2 (3GPP TS 36.300 version 10.4.0 Release 10.
- [35] "<http://soquelec.com/telecom/download/RFM%20Wireless/Repeater%20solutions.pdf>," [Online].
- [36] "3GPP TS 36.101, E-UTRA: UE radio transmission and reception, Release 9, V9.0.0," June 2009.
- [37] "Computer Analysis of the COST 231 Hata Model and Least Squares Approximation for Path Loss Estimation at 900MHz on the Mountain Terrains of the Jos-Plateau, Nigeria".
- [38] "<http://pt.scribd.com/doc/166935509/Lte-Coverage-and-Capacity-Dimensioning>,". [Online], [Acedido em Maio 2014].
- [39] "<http://www.wpsantennas.com/408-yb-digitalantennalowbandyagicellular>," [Online].
- [40] I. Poole, "Radio-Electronics.com," [Online]. Available: <http://www.radio-electronics.com/info/cellulartelecomms/lte-long-term-evolution/4g-lte-advanced-relaying.php>. [Acedido em 2014].

A.Tabela do SNIR vs Throughput

Tabela do SNIR vs. Throughput utilizada no simulador ICS designer pode ser gerada manualmente e importado através do ficheiro *.CSV, ou pode utilizar a tabela implementada por default pela recomendação do fornecedor, para diferentes tipos de antenas, com SNIR a variar entre -5 a 36 espaçado de 1dB. Para este trabalho foram utilizadas a tabela implementada na ferramenta, depois de confirmar que os resultados se coincidem com os calculados.

SNIR (dB)	SIMO (Kbps)	TxDiv (Kbps)	MIMO (Kbps)	UL-STD (Kbps)
-5	42.25	45.83	43.81	39.54
	51.80	56.49	54.04	48.23
	62.73	68.62	65.68	58.36
	75.17	82.31	78.88	70.07
	89.21	97.68	93.77	83.46
	104.97	114.80	110.48	98.64
	122.54	133.75	129.13	115.67
	141.99	154.58	149.86	134.58
	163.38	177.32	172.77	155.35
	186.74	201.96	197.98	177.92
	212.05	228.46	225.55	202.18
	239.29	256.76	255.57	227.94
	268.38	286.72	288.07	254.98
	299.20	318.20	323.07	282.98
	331.60	351.01	360.54	311.61
	365.37	384.89	400.45	340.45
	400.27	419.57	442.70	369.04
	436.02	454.72	487.16	396.90
	472.28	490.00	533.68	423.52
	508.69	525.01	582.04	448.38
	544.85	559.34	631.98	470.99
	580.35	592.58	683.22	490.87
	614.74	624.28	735.42	507.58
	647.58	654.02	788.21	520.75
	678.43	681.38	841.17	530.08
	706.86	705.95	893.89	535.35
	732.44	727.38	945.88	536.56
	754.80	745.32	996.68	536.56
	773.60	759.51	1045.79	536.56
	788.55	769.71	1092.72	536.56
	799.40	775.77	1136.98	536.56
	805.99	777.60	1178.09	536.56
	808.21	777.60	1215.59	536.56
	808.21	777.60	1249.07	536.56
	808.21	777.60	1278.13	536.56
	808.21	777.60	1302.43	536.56
	808.21	777.60	1321.68	536.56
	808.21	777.60	1335.65	536.56
	808.21	777.60	1344.16	536.56
	808.21	777.60	1347.12	536.56
	808.21	777.60	1347.12	536.56
36	808.21	777.60	1347.12	536.56

Figura A. 1 - Tabela do SNIR vs. Throughput .

Os valores de *Throughput* (kbps) na tabela são definidos como a taxa de dados por RB para um determinado SINR.

O resultado do *throughput* calculado em cada *pixel* será realizado de acordo com a tabela da Figura A.1, mas também da carga da célula (número de RB utilizado para a atribuição de tráfego) especificado no separador de configuração de eNodeB conforme se ilustra na Figura A.2.

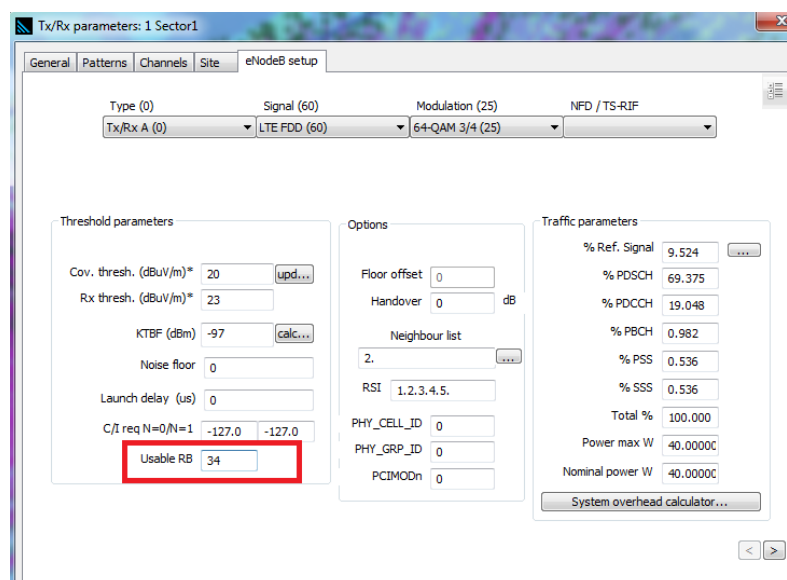


Figura A. 2 – RB utilizado para a atribuição de tráfego.

B.Bandas de Frequência no LTE

Tabela A. 1 – Tabela com as bandas de frequências utilizadas em LTE (extraído de [33]).

Band	UL(UE Tx, BS Rx) (MHz)	DL (BS Tx, UE Rx) (MHz)	Duplex Spacing (MHz)	BW (MHz)	Duplex Mode	Region
1	1920 - 1980	2110 - 2170	190	60	FDD	EU
2	1850 - 1910	1930 - 1990	80	60	FDD	US
3	1710 - 1785	1805 - 1880	95	75	FDD	EU
4	1710 - 1755	2110 - 2155	400	45	FDD	US
5	824 - 849	869 - 894	45	25	FDD	US
7	2500 - 2570	2620 - 2690	120	70	FDD	EU
8	880 - 915	925 - 960	45	35	FDD	EU
9	1749.9 - 1784.9	1844.9 - 1879.9	95	35	FDD	South Korea
10	1710 - 1770	2110 - 2170	400	60	FDD	US
11	1427.9 - 1447.9	1475.9 - 1495.9	48	20	FDD	
12	699 - 716	729 - 746	30	17	FDD	
13	777 - 787	746 - 756	-31	10	FDD	
14	788 - 798	758 - 768	-30	10	FDD	
17	704 - 716	734 - 746	30	12	FDD	
18	815 - 830	860 - 875	45	15	FDD	
19	830 - 845	875 - 890	45	15	FDD	
20	832 - 862	791 - 821	-41	30	FDD	EU
21	1447.9 - 1462.9	1495.9 - 1510.9	48	15	FDD	
22	3410 - 3490	3510 - 3590	100	80	FDD	
23	2000 - 2020	2180 - 2200	180	20	FDD	
24	1626.5 - 1660.5	1525 - 1559	-101.5	34	FDD	
25	1850 - 1915	1930 - 1995	80	65	FDD	
26	814 - 849	859 - 894	45	35	FDD	
27	807 - 824	852 - 869	45	17	FDD	
28	703 - 748	758 - 803	55	45	FDD	
33		1900 - 1920		20	TDD	
34		2010 - 2025		15	TDD	EU
35		1850 - 1910		60	TDD	
36		1930 - 1990		60	TDD	
37		1910 - 1930		20	TDD	
38		2570 - 2620		50	TDD	EU
39		1880 - 1920		40	TDD	
40		2300 - 2400		100	TDD	
41		2496 - 2690		194	TDD	
42		3400 - 3600		200	TDD	
43		3600 - 3800		200	TDD	
44		703 - 803		100	TDD	

B.1. Planejamento de frequência no *ICS designer*

A ferramenta de planejamento *ICS designer*, permite fazer o planejamento de frequência a atribuir a cada sector, conforme se pode ver na Figura B. 3, depois de configurar a banda de frequência a ser utilizada.

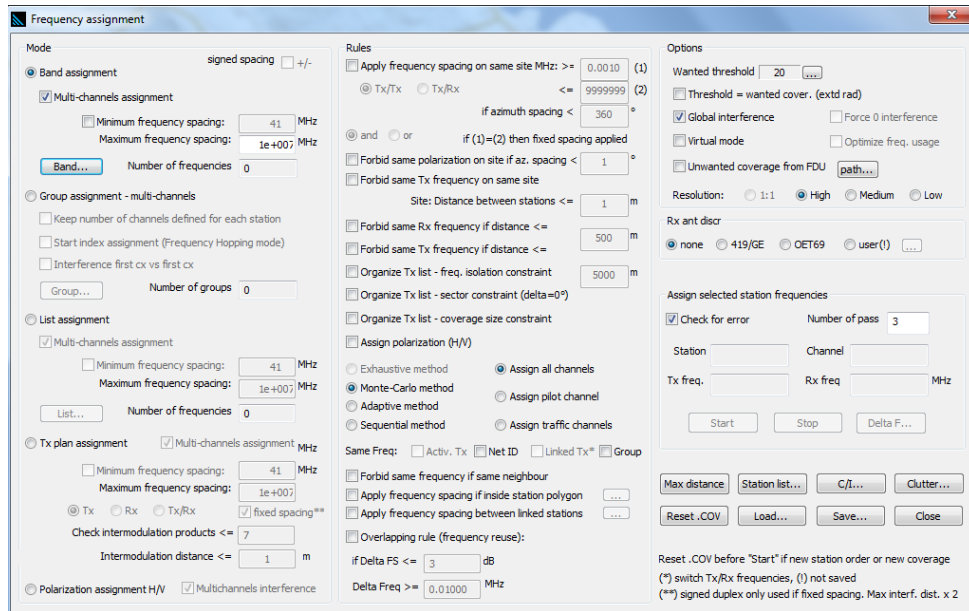


Figura B. 1 – Opções de planejamento de frequência através do *ICS designer*.

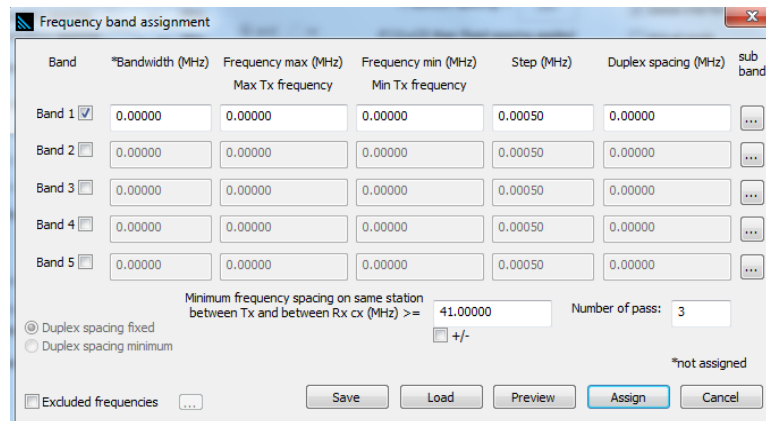


Figura B. 2 – Especificação da banda de frequência.

ATTRIBUTABLE FREQUENCY LIST

Range	Tx freq (MHz)	Rx freq (MHz)	Attributable	Attributable	Spacing
1	801.00000	842.00000	Yes	Yes	< - Allowed
2	804.30000	845.30000	Yes	Yes	
3	807.60000	848.60000	Yes	Yes	
4	810.90000	851.90000	Yes	Yes	

Total frequencies: 4

Maximum Tx frequencies to assign per station: 1

Maximum Rx frequencies to assign per station: 1

Tx frequencies to assign: 3

Rx frequencies to assign: 3

Total Tx frequencies on map: 5

Total Rx frequencies on map: 5

Figura B. 3 – Resultado do planejamento de frequência no ICS designer.

B.2. Planejamento de Vizinhas no ICS designer

Após a simulação da rede, estabeleceu a relação de vizinhanças entre as células vizinhas, através da opção “Coverage – Handover – Neighbour calculation”. A Tabela B. 1 apresenta as listas da relação de vizinhança entre células.

Tabela B. 1 - Listas de vizinhanças.

Status	Callsign	Frequency (MHz)
Reference	Sector 1	807.6
Neighbour	Sector 3	804.3
Reference	Sector 3	804.3
Neighbour	Sector 1	807.6
Reference	Sector 2	810.9
Neighbour	Sector 1	807.6

C. Distribuição dos utilizadores ao longo da rede

Depois de configurar o eNodeB, foi preciso configurar e distribuir os utilizadores no mapa de forma aleatória. Para gerar os utilizadores ao longo da área de planeamento, segue os seguintes passos:

- i. Pressionar o botão “*Polygon Draw*” do lado esquerdo do painel, para escolher a área onde pretende distribuir os utilizadores, seleccionando a opção “*Load mask*”, no qual permite seleccionar a área de planeamento, escolhendo a opção “*Continue – Generate subscribers*” e aparece a janela apresentada na Figura C. 1.

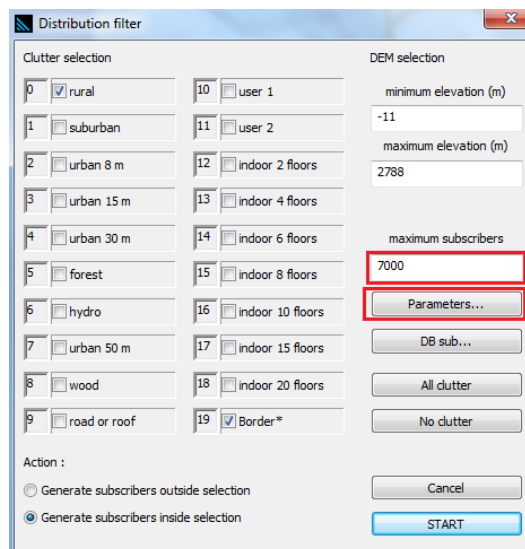


Figura C. 1 – Janela que permite gerar os utilizadores no mapa.

- ii. De seguida, é definida os parâmetros de configuração dos utilizadores carregando na opção “*Parameters*”, conforme se ilustra na janela da Figura C. 2.

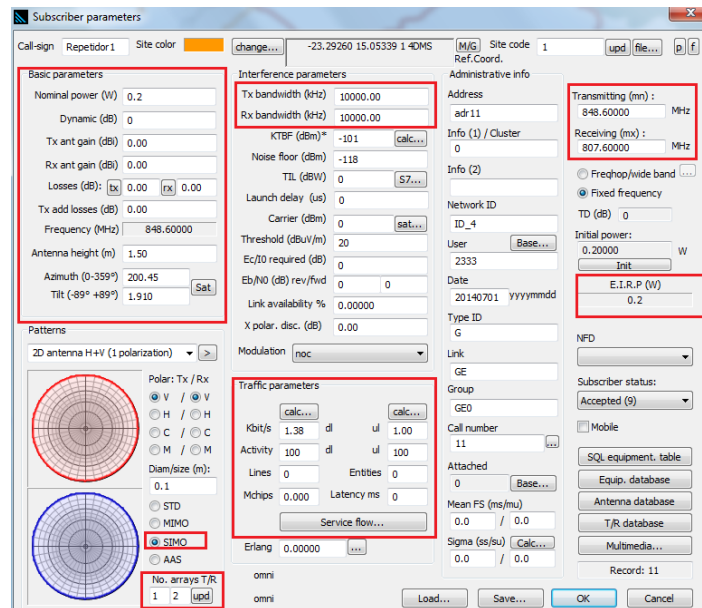


Figura C. 2 – Parâmetros dos utilizadores.

Uma vez criados os utilizadores pode-se confirmar na base de dados, como se pode ver na Figura C. 3. Caso se pretenda alterar alguns parâmetros de configuração dos utilizadores basta seleccionar e pressionar o botão direito do rato e seleccionar a opção “*parameters*”.

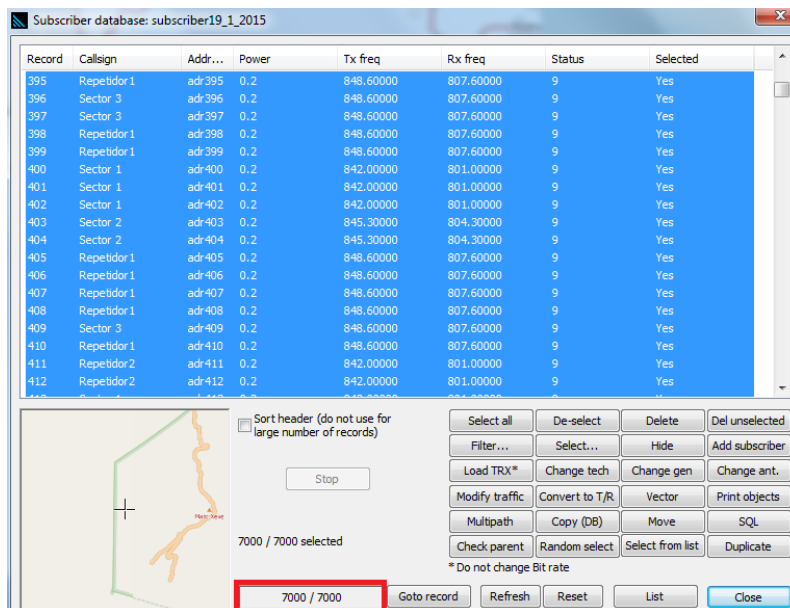


Figura C. 3 - Janela de base de dados dos utilizadores.

A Figura C. 4 apresenta o conjunto dos utilizadores gerado ao longo da área do planeamento.

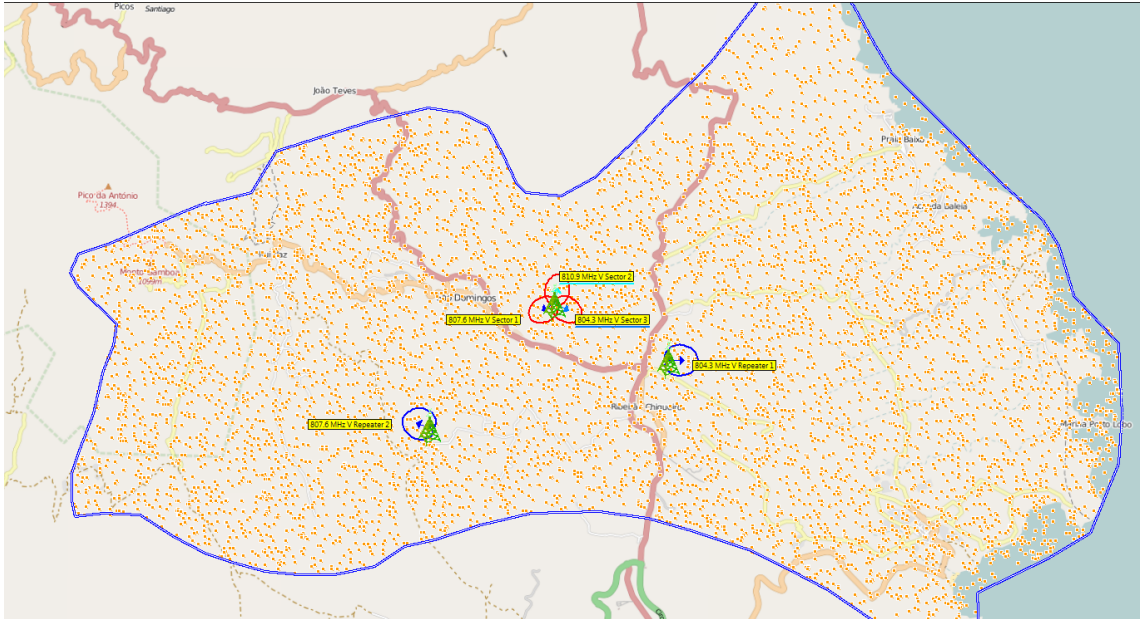


Figura C. 4 - Utilizadores distribuídos no mapa.

A maneira como os objetos são exibidos no mapa podem ser configurados utilizando a opção “Object - Object properties (F5)” e aparece a janela da Figura C. 5.

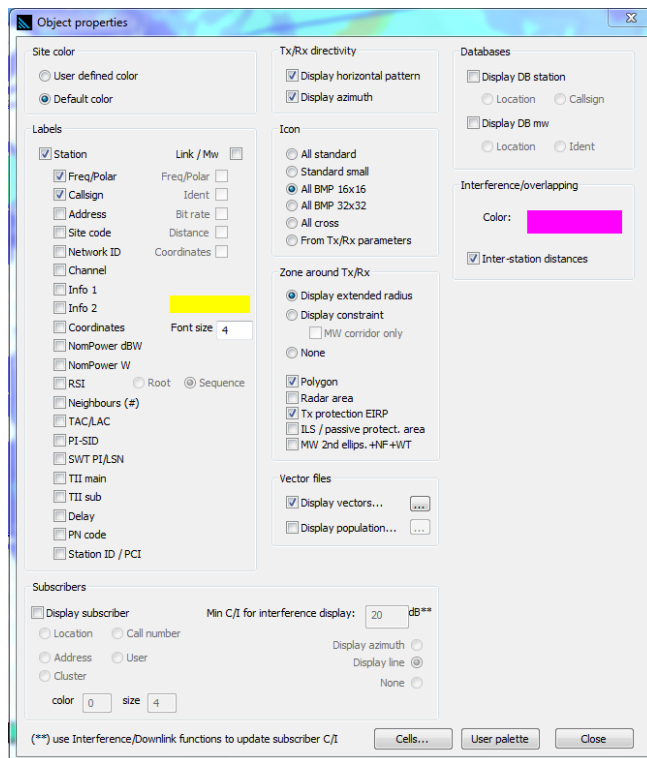


Figura C. 5 – Propriedades do projeto.

D.Parâmetros Tx/Rx

A Janela dos parâmetros Tx / Rx permite definir todos os parâmetros técnicos e gerais de um elemento de rede. A maneira como foi configurado o eNodeB é apresentada nas janelas da Figura D.1 a Figura D.6.

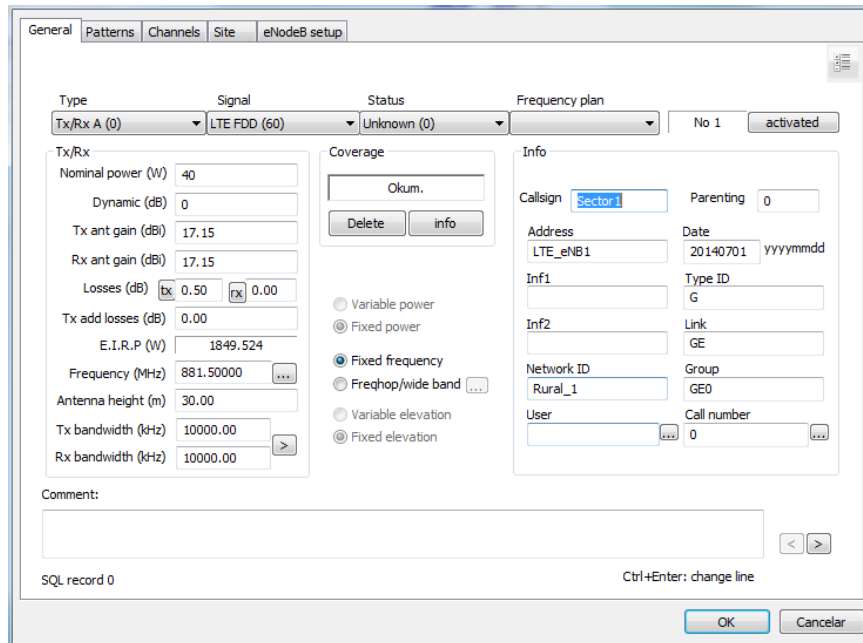


Figura D. 1 – Definições geral do eNodeB.

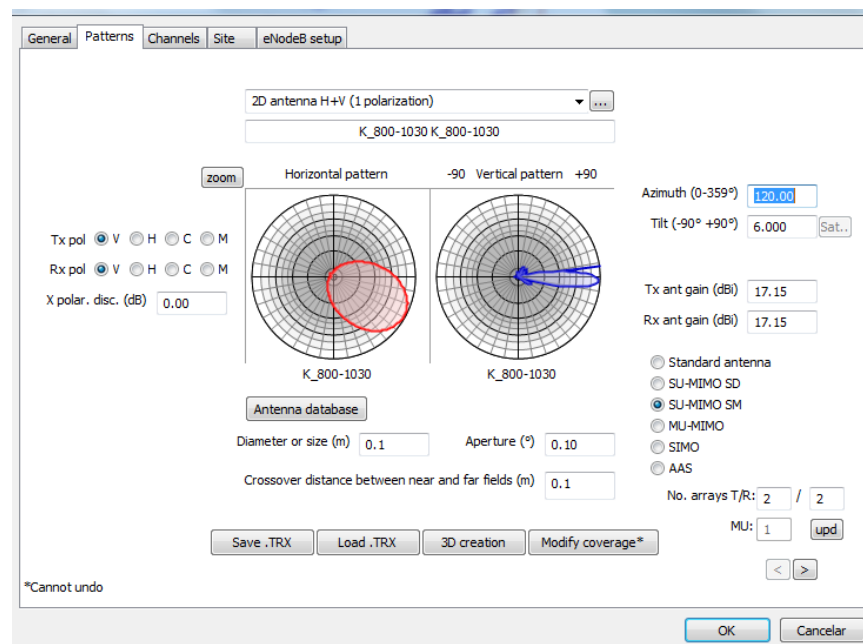


Figura D. 2 – Definições dos parâmetros da antena.

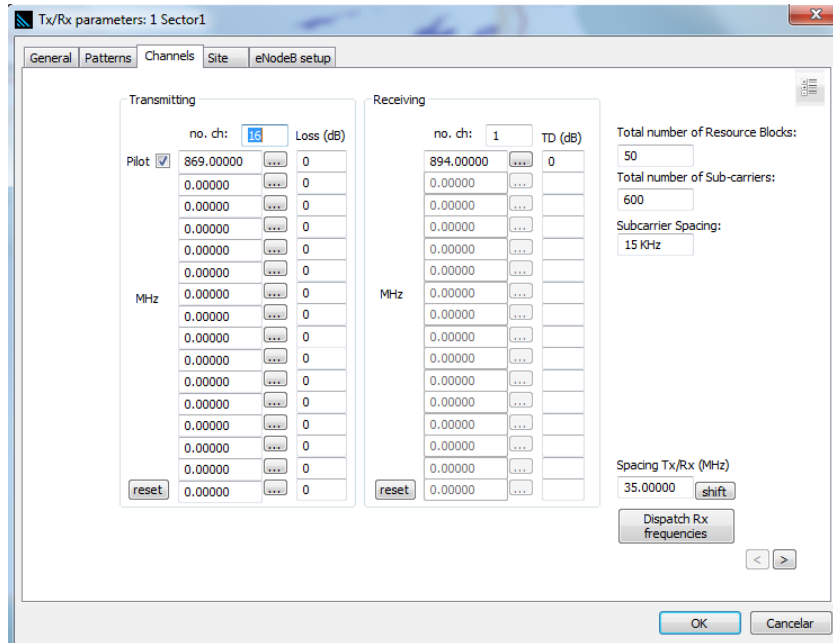


Figura D. 3 – Definições da banda de frequência.

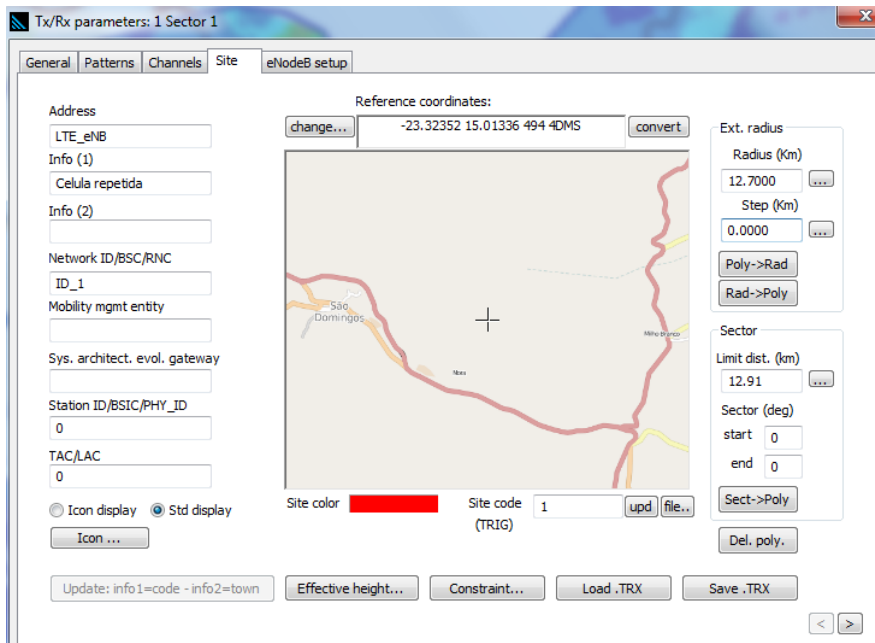


Figura D. 4 – Definições do posicionamento do eNodeB e raio da célula.

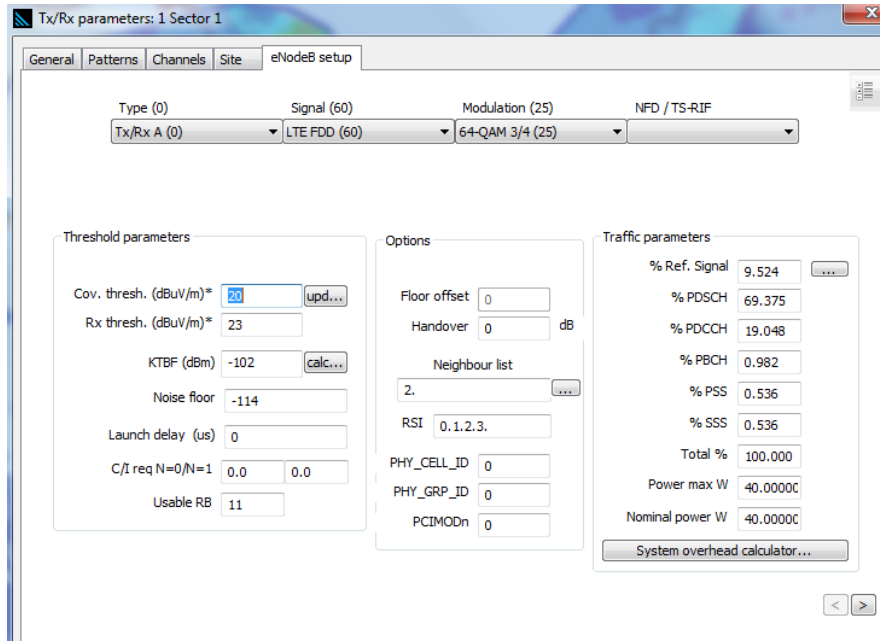


Figura D. 5 – Definições dos parâmetros do eNodeB.

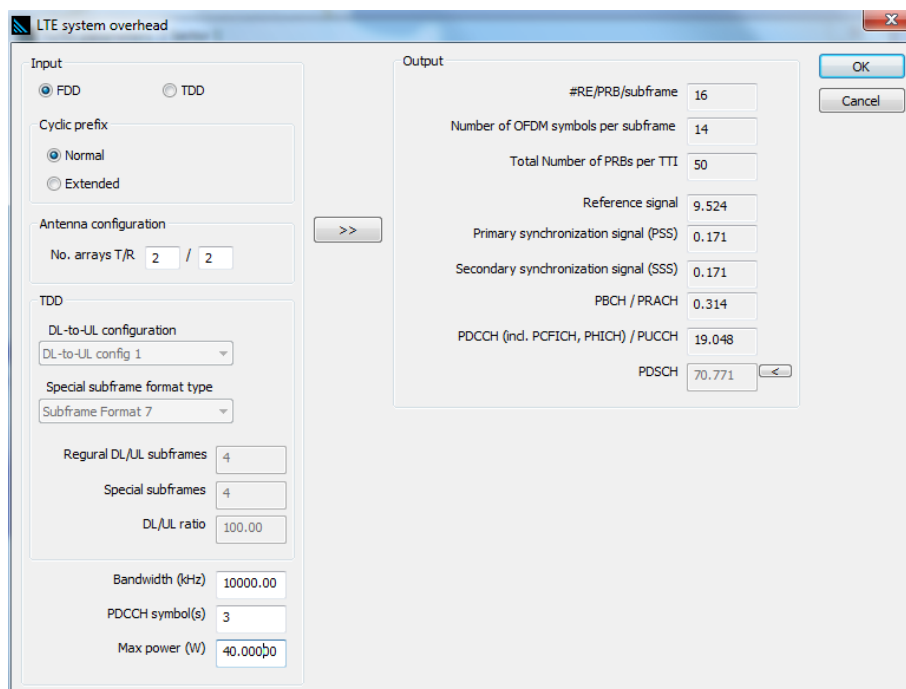


Figura D. 6 - Definições dos parâmetros do sistema LTE.

STATION NOISE

Station	BST	Callsign	Freq MHz	KTBF dBm	Psum dBm	I/N dB	TD dB
LTE_eNB	1	Sector 1	842.00000	-102	-59.64	42.36	42.36
LTE_eNB	2	Sector 3	848.60000	-102	-44.28	57.72	57.72
LTE_eNB	3	Sector 2	845.30000	-102	-46.57	55.43	55.43
Repetidor MB	4	Repetidor1	848.60000	-97	-29.44	67.56	67.56
Repetidor RV	5	Repetidor2	842.00000	-97	-38.62	58.38	58.38

Figura D. 7 – Potência recebida no UL.

SUBSCRIBER RECEIVING

Threshold: 20 dBuV/m / -115 dBm - Rx Gain: 0.00 dB

Subscriber	BST	Callsign	FSR dBuV/m	PR dBm	Margin dB	Reliab.(%)
adr1	4	Repetidor1	42.4	-93.0	22.38	99.99997
adr2	4	Repetidor1	43.1	-92.2	23.13	99.99997
adr3	4	Repetidor1	41.1	-94.2	21.13	99.99996
adr4	4	Repetidor1	43.2	-92.2	23.19	99.99997
adr5	4	Repetidor1	43.6	-91.7	23.64	99.99998
adr6	4	Repetidor1	41.7	-93.6	21.72	99.99996
adr7	4	Repetidor1	44.4	-91.0	24.39	99.99998
adr8	4	Repetidor1	53.2	-82.2	33.18	99.99999
adr9	4	Repetidor1	53.4	-81.9	33.43	99.99999
adr10	4	Repetidor1	59.5	-75.8	39.53	99.99999
adr11	4	Repetidor1	51.9	-83.4	31.92	99.99999
adr12	4	Repetidor1	53.7	-81.7	33.67	99.99999
adr13	4	Repetidor1	56.7	-78.7	36.71	99.99999
adr14	4	Repetidor1	60.6	-74.7	40.64	99.99999
adr15	4	Repetidor1	59.8	-75.6	39.79	99.99999
adr16	4	Repetidor1	61.6	-73.8	41.58	99.99999
adr17	4	Repetidor1	57.0	-78.3	37.05	99.99999
adr18	4	Repetidor1	51.4	-84.0	31.41	99.99999
adr19	4	Repetidor1	51.4	-84.0	31.39	99.99999
adr20	4	Repetidor1	43.7	-91.7	23.66	99.99998
adr21	4	Repetidor1	57.3	-78.1	37.29	99.99999
adr22	4	Repetidor1	59.0	-76.3	39.05	99.99999
adr23	4	Repetidor1	48.6	-86.7	28.63	99.99999
adr24	4	Repetidor1	55.6	-79.8	35.57	99.99999
adr25	4	Repetidor1	41.9	-93.5	21.87	99.99997
adr26	4	Repetidor1	48.7	-86.7	28.71	99.99999

Printer: hp psc 1200 series Print Setup... Print List Quit font size 7 font size 8 restart to enable modification

Figura D. 8 – Tabela com as potências recebidas no DL.

E. Datasheet da antenna utilizada no eNodeB '80010303'

Panel 806-960
Dual Polarization X
Half-power Beam Width 65°
Adjust. Electr. Downtilt 0°-14°
 set by hand or by optional RCU (Remote Control Unit)

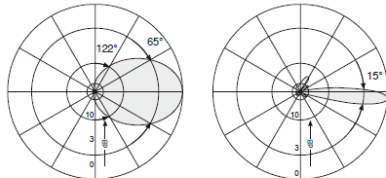
KATHREIN
 Antennen · Electronic

XPoI Panel 806-960 65° 15dBi 0°-14°T

Type No.	800 10303		
Frequency range	806 – 866 MHz	824 – 894 MHz	880 – 960 MHz
Polarization	+45°, -45°	+45°, -45°	+45°, -45°
Average gain (dBi)	14.5 ... 14.5 ... 14.2	14.7 ... 14.7 ... 14.5	15 ... 15.1 ... 14.8
Tilt	0° ... 7° ... 14°	0° ... 7° ... 14°	0° ... 7° ... 14°
Horizontal Pattern:			
Half-power beam width	69°	67°	65°
Front-to-back ratio, copolar	> 25 dB	> 25 dB	> 25 dB
Cross polar ratio			
Maindirection	0°	Typically: 25 dB	Typically: 25 dB
Sector	±60°	> 10 dB	> 10 dB
Vertical Pattern:			
Half-power beam width	16°	15.5°	15°
Electrical tilt	0°-14°, continuously adjustable		
Sidelobe suppression for first sidelobe above horizon	0° ... 7° ... 14° T 14 ... 14 ... 13 dB	0° ... 7° ... 14° T 15 ... 15 ... 14 dB	0° ... 7° ... 14° T 15 ... 15 ... 15 dB
Impedance	50 Ω		
VSWR	< 1.5		
Isolation, between ports	> 30 dB		
Intermodulation IM3	< -150 dBc (2 x 43 dBm carrier)		
Max. power per input	400 W (at 50 °C ambient temperature)		



880 – 960 MHz: +45°/-45° Polarization

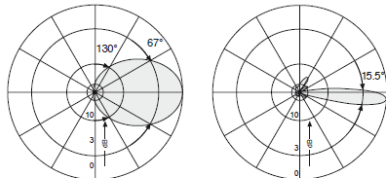


Horizontal Pattern

Vertical Pattern

0°-14° electrical downtilt

824 – 894 MHz: +45°/-45° Polarization

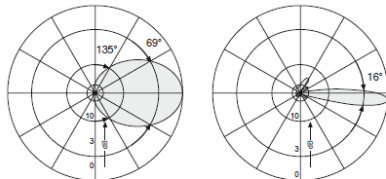


Horizontal Pattern

Vertical Pattern

0°-14° electrical downtilt

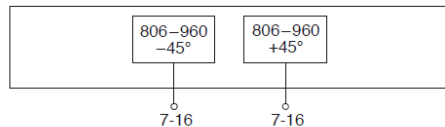
806 – 866 MHz: +45°/-45° Polarization



Horizontal Pattern

Vertical Pattern

0°-14° electrical downtilt



Mechanical specifications

Input	2 x 7-16 female
Connector position	Bottom
Adjustment mechanism	1x, Position bottom continuously adjustable
Weight	10 kg
Wind load	Frontal: 220 N (at 150 km/h) Lateral: 140 N (at 150 km/h) Rearside: 490 N (at 150 km/h)
Max. wind velocity	200 km/h
Packing size	1586 x 292 x 138 mm
Height/width/depth	1294 / 259 / 99 mm

936.2785/b Subject to alteration.

Internet: <http://www.kathrein.de>

KATHREIN-Werke KG · Anton-Kathrein-Straße 1 – 3 · P.O. Box 10 04 44 · 83004 Rosenheim · Germany · Phone +49 8031 184-0 · Fax +49 8031 184-973

800 10303 Page 1 of 3

F. Datasheet do repetidor LTE



Application

- 2G, 3G, 4G standards
- Indoor & Outdoor coverage enhancement

Key Features

- Medium & High Power
- Single or Dual-Band
- Band- & Channel-Selective
- Digital Smart Filter
- Advanced Insulation
- Outdoor IP65 cabinet
- HTTP, SNMP Monitoring

Benefits

- Cost effective alternative to BTS
- Low consumption for solar application
- Easy & quick installation

Contact us

commercial@selecom.fr
www.selecom.fr

Solution for Cellular Phone coverage

AIR Repeater™ RF/RF 2G/3G/4G



To ensure 2G, 3G, 4G coverage everywhere

The **AIR Repeater™ RF/RF Cellular** family is designed to enhance **outdoor coverage** by cell extension as a cost-effective alternative to a BTS, and **indoor coverage** such as parking, conference rooms, shopping centers, tunnels, building with a DAS (Distributed Antenna System).

This range of repeater is extremely modular, and can be equipped with the **latest technology**:

- Available in band- or channel-selective with the optional "**Digital Smart Filter**" that permits to treat up to 4 sub-bands
- "**Advanced Insulation**" algorithm, which permits to reduce up to 25 dB the constraints of insulation between RX & TX antennas
- Built in **IP65** cabinet for wall- or mast-mounted indoor and outdoor installations
- Outdoor power available in **medium or high power** to optimize the link budget

Thanks to the **gain limiter**, the equipment is able to operate with mobile phones near or far from the repeater without risk of saturation.

The **low consumption** of repeater allows the using of solar panels.

Many options are listed:

- Embedded **monitoring module** with WEB/SNMP server for local access (Ethernet) and GPRS modem for remote access
- **Cloud Monitoring** with VisiOmc™ server
- Power supply 230VAC or 48VDC
- GFCI, Lightning Protection Class, Automatic restarter, etc...



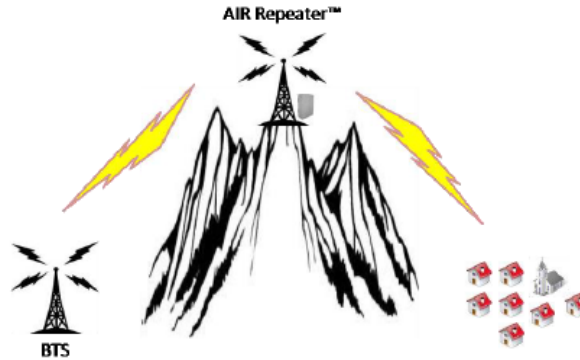
285 – AIR Repeater™ RF/RF 2G-3G-4G – ed13



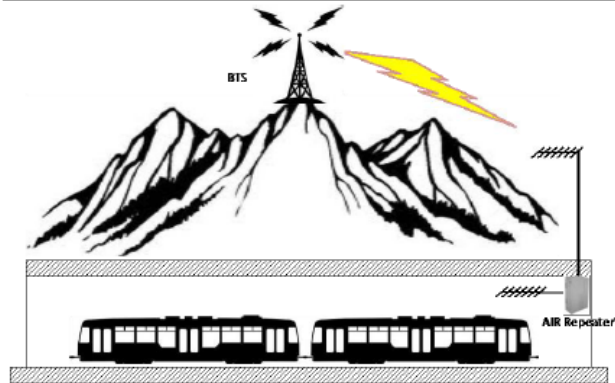
Solution for Cellular Phone coverage

AIR Repeater™ RF/RF 2G/3G/4G

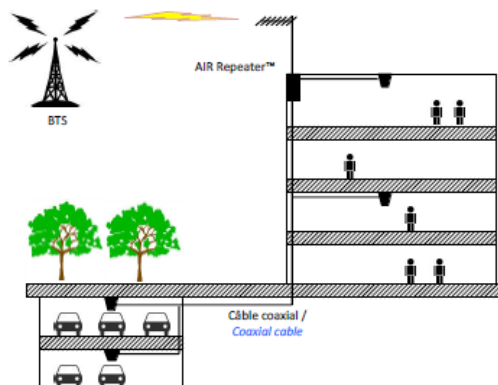
Example of outdoor application



Example coverage of small rail tunnel



Example coverage of a building and an underground parking



The manufacturer retains the right to modify its products - This document is not contractual. AIR Repeater™ is a trademark of SELECOM SA.



Solution for Cellular Phone coverage

AIR Repeater™ RF/RF 2G/3G/4G

RF Features		800	900	1800	1900	2100	2600	
Frequency band	<i>Down-Link (TX)</i>	791~821 MHz	925~960 MHz	1805~1880 MHz	1930~1990 MHz	2110~2170 MHz	2620~2690 MHz	
	<i>Up-Link (RX)</i>	832~862 MHz	880~915 MHz	1710~1785 MHz	1850~1910 MHz	1920~1980 MHz	2500~2570 MHz	
Nominal output composite power DL ⁽¹⁾	<i>Single-Band Medium Power</i>	≤ 32 dBm					≤ 29 dBm	
	<i>Single-Band High Power</i>	≤ 39 dBm					≤ 37 dBm	
	<i>Dual Band Per band</i>	≤ 32 dBm					≤ 29 dBm	
Nominal output composite power UL	<i>Single-Band Medium Power</i>	≤ 15 dBm						
	<i>Single-Band High Power</i>	≤ 20 dBm						
	<i>Dual Band Per band</i>	≤ 15 dBm						
Operating bandwidth	<i>Max Bandwidth</i>	≤ 30 MHz	≤ 35 MHz	≤ 75 MHz	≤ 60 MHz	≤ 60 MHz	≤ 70 MHz	
	<i>Central frequency</i>	Adjustable						
Gain	<i>Single-Band Medium Power</i>	Adjustable from 50 dB to 80 dB						
	<i>Single-Band High Power</i>	Adjustable from 60 dB to 90 dB						
	<i>Dual Band Per band</i>	Adjustable from 50 dB to 80 dB						
Ripple in bandwidth		≤ ± 2 dB						
Noise factor @ Max Gain		≤ 5 dB	≤ 6 dB				≤ 5 dB	
Selectivity		30 dB @ ± 350 KHz 45 dB @ ± 1.1 MHz 55 dB @ ± 10 MHz						
Adjacent LTE channel rejection out of bandwidth		≥ 70 dBc						
Duplex Mode LTE		FDD (Frequency Division Duplexing)						
Intermodulation		≤ -36 dBm @ ≤ 1 GHz ≤ -30 dBm @ > 1 GHz						
Absolute group delay		≤ 6 μs						
Delta group delay		≤ 15 ns						
Conformity		ETSI TS 25 106 V11.0.1 (2012-10) ETSI TS 25 143 V11.0.0 (2012-10)						

⁽¹⁾ for a PAR (Peak Average Ratio) ≤ 8.5 dBc

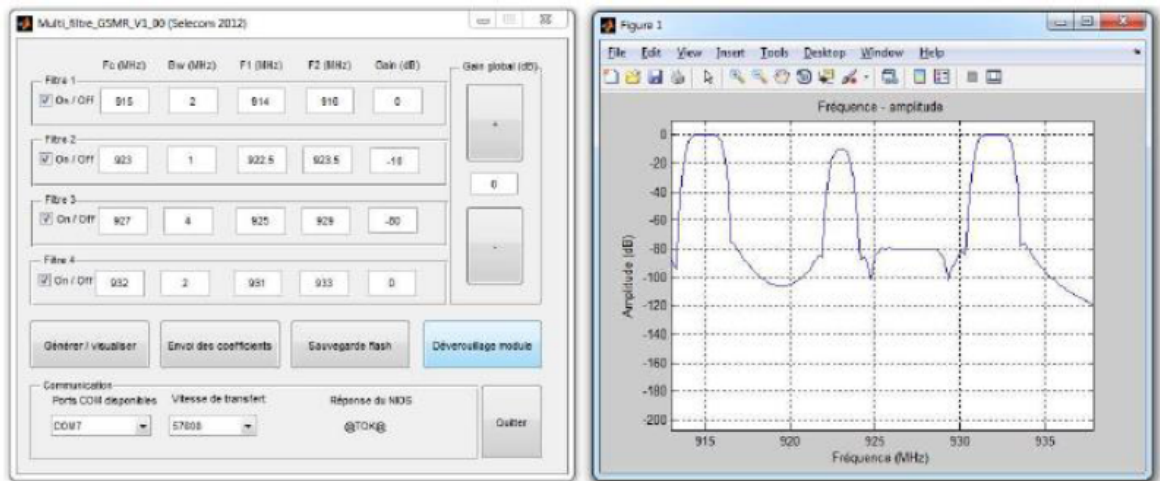
The manufacturer retains the right to modify its products - this document is not contractual. AIR Repeater™ is a trademark of SELECOM SA.



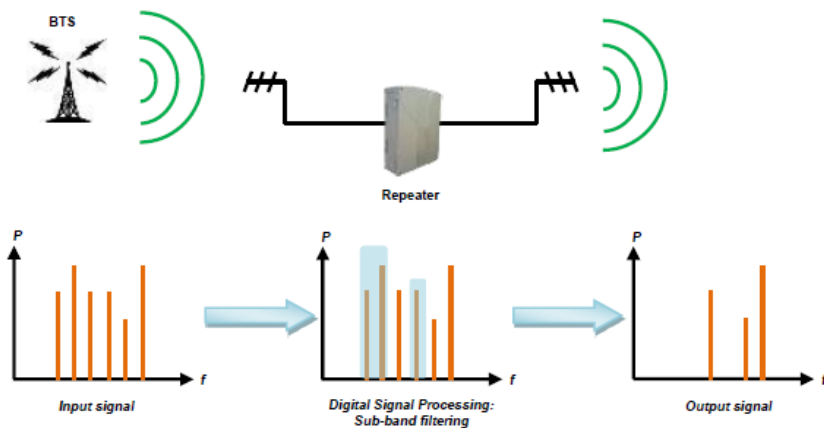
Solution for Cellular Phone coverage

AIR Repeater™ RF/RF 2G/3G/4G

Digital Smart Filter Module (optional)		
Number of rejection filters		4
For each filter	Bandwidth	Adjustable from 0 to Max. Bandwidth
	Central frequency	Adjustable from f_0 to $f_0 + (\text{Max. Bandwidth} / 2)$
	Attenuation	Adjustable from 0 dB to 30 dB



Screen of Setting Software



Because the output power of a repeater is composite, the unwanted carriers have sometimes to be eliminated to use the complete dynamic of gain for the useful carriers. The **Digital Smart Filter** permits to select the carriers to repeat with a specific mask filter, easy to program thanks to the provided software.

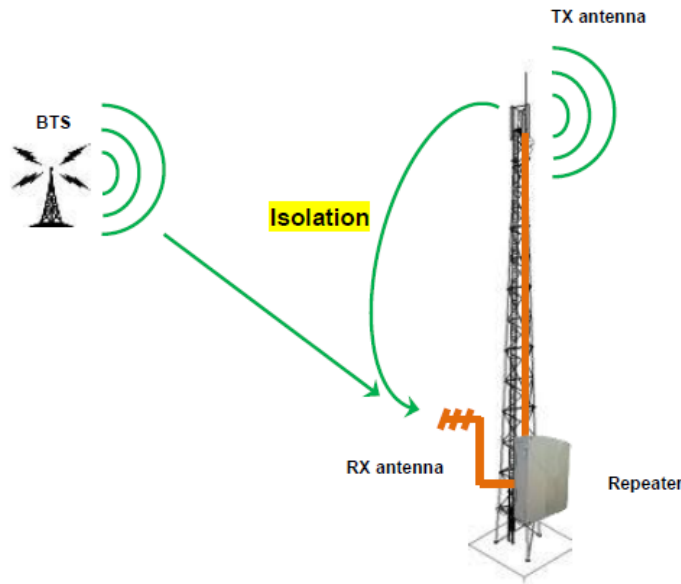
The manufacturer retains the right to modify its products - this document is not contractual. AIR Repeater™ is a trademark of SELECOM SPA.



Solution for Cellular Phone coverage

AIR Repeater™ RF/RF 2G/3G/4G

Echo-Cancellation Features	OFF	ON	Isolation benefit
Power supply voltage	$\geq \text{Gain} + 15 \text{ dB}$	$\geq \text{Gain} - 10 \text{ dB}$	25 dB
Group delay	$\leq 4.5 \mu\text{s}$		



The manufacturer retains the right to modify its products – This document is not contractual. AIR Repeater™ is a trademark of SELECOM SA.

In case of low isolation between the RX and TX antennas, the echo signal from the TX antenna into the RX antenna causes the famous **LARSEN effect**. The result is the emergence of a ripple at the input of the repeater. If this ripple is too important, the dynamic of gain of the repeater is limited to avoid the destruction of the device.

The **Echo-Canceller** algorithm permits to **reduce up to 25 dB the constraints of isolation** between RX & TX antennas, to use the repeater with its complete dynamic of gain.

The **Echo-Canceller** option is available for UMTS and LTE modulations.



Solution for Cellular Phone coverage

AIR Repeater™ RF/RF 2G/3G/4G

Mechanical Features		800	900	1800	1900	2100	2600
Power supply voltage		230 VAC or 48 VDC (IEC 60950 accordance)					
Power consumption	Single Band Medium Power	≤ 100 W					
	Single Band High Power	≤ 180 W				≤ 140 W	
	Dual Band Medium Power	≤ 230 W					
Dimensions	Single Band Medium Power	H582 x L429 x D224 mm					
	Single Band High Power	H582 x L444 x D353 mm					
	Dual Band Medium Power	H582 x L444 x D353 mm					
Weight	Single Band Medium Power	28 kg					
	Single Band High Power	49 kg					
	Dual Band Medium Power	49 kg					
Connectors		7/16 female					
Rating class / Ingress protection		IP65 / IK9					
ATEX Protection (optional)		ATmosphere Explosive certified					
Temperature range		-30°C to +45°C					
Cooling		Air convection cooling					
Signaling		One tricolor led (Green / Yellow / Red) + 1 Dry Loop					
Remote control (optional)		With embedded monitoring module : Ethernet / GPRS / HTTP / SNMP Alarms report : By email / SMS / Trap					

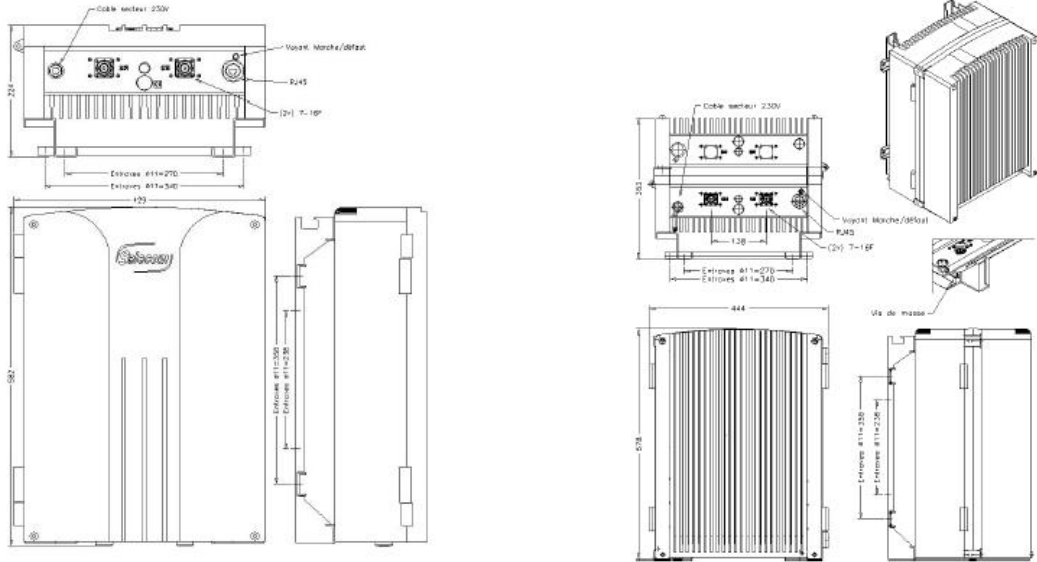
The manufacturer retains the right to modify its products - This document is not contractual. AIR Repeater™ is a trademark of SELECOM SA.



Solution for Cellular Phone coverage

AIR Repeater™ RF/RF 2G/3G/4G

Mounting Plan



The manufacturer retains the right to modify its products – This document is not contractual. AIR Repeater™ is a trademark of SELECOM SA.



Solution for Cellular Phone coverage

AIR Repeater™ RF/RF 2G/3G/4G

Ordering Information

Single-Band: AIRREP-P-F-BW-PS-ATEX Dual-Band: AIRREP-P-F1/F2-BW1/BW2-PS-ATEX							
Variable	Designation	Value	Meaning	Variable	Designation	Value	Meaning
F =	Frequency	08	800 MHz	P =	Output Power	MP	Medium Power
		09	900 MHz			HP	High Power (for Single-Band only)
		18	1800 MHz	PS =	Power Supply	230	230 VAC
		19	1900 MHz			48	48 VDC
		21	2100 MHz	ATEX =	ATmosphere EXplosive	ATEX	With
		26	2600 MHz			Ø	Without
BW =	Bandwidth	XX.X	Bandwidth in MHz 900 Mz : 3.15 ; 4 ; 4.5 ; 5 ; 6 ; 8.2 ; 10 ; 12.5 ; 25 ; 35 1800 MHz : 2.6 ; 5 ; 7.6 ; 10 ; 15 ; 16 ; 20 ; 23.8 ; 32 ; 60 2100 MHz : 2.6 ; 5 ; 7.6 ; 10 ; 15 ; 16 ; 20 ; 23.8 ; 32 ; 60				






Options		
	Variable	Designation
Monitoring Options	AIRREP-OPT-SERIALREMOTE	USB-RS485 Remote
	AIRREP-OPT-IPMTG	Monitoring Module IP-GPRS
	AIRREP-OPT-LIGHT	Led Bicolor Option AIRREP-OPT-IPMTG mandatory
	AIRREP-OPT-RJ45WP	RJ45 waterproof connector Option AIRREP-OPT-IPMTG mandatory
Digital Functions	AIRREP-OPT-DSF-F (F=08, 09, 18, 21, 26)	Digital Smart Filter Hardware & Software Key For Dual-Band, 1 option per band is required if digital advanced features are required for each band
	AIRREP-OPT-AIR-F (F=08, 09, 18, 21, 26)	Advanced Insulation Hardware & Software Key (UMTS, LTE only) For Dual-Band, 1 option per band is required if digital advanced features are required for each band
	AIRREP-OPT-DSF-AIR-F (F=08, 09, 18, 21, 26)	Digital Smart Filter & Advanced Insulation (UMTS, LTE only) For Dual-Band, 1 option per band is required if digital advanced features are required for each band
	AIRREP-OPT-SW-DSF-F (F=08, 09, 18, 21, 26)	Digital Smart Filter Software Key Complement of OPT-AIR-F
	AIRREP-OPT-SW-AIR-F (F=08, 09, 18, 21, 26)	Advanced Insulation Software Key (UMTS, LTE only) Complement of OPT-DSF-F
Electrical Options	AIRREP-OPT-GFCI	GFCI (Ground Fault Circuit Interrupter)
	AIRREP-OPT-AR	Automatic Re-starter (Option AIRREP-OPT-GFCI mandatory)
	AIRREP-OPT-LP	Lightning Protection (Option AIRREP-OPT-GFCI mandatory)

The manufacturer retains the right to modify its products - This document is not contractual. AIR Repeater™ is a trademark of SELECOM SA.



Solution for Cellular Phone coverage

AIR Repeater™ RF/RF 2G/3G/4G

Related Products	
<p>Cabin protection</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Protection against Sunlight and Rain ✓ Compatible with all SELECOM Repeaters ✓ Easy installation ✓ Support for laptop or measuring device
<p>Electrical Case</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Outdoor case ✓ Cost effective solution ✓ Isolation Transformer ✓ GFCI ✓ Re-starter ✓ Service Outlet ✓ CE compliant ✓ Custom design on request
<p>GPRS Modem</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ For the remote control via GPRS network
<p>NMS (Network Management System)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ NMS software manages a complete network of different ✓ Screens with complete status and reports ✓ Location on a map of each equipment ✓ SMS, EMAIL alerts ✓ Equipments control in case of needing
<p>Solar panels</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Free Energy ✓ Battery for autonomy in case of lack of sunlight ✓ Automatic relay to standard power supply ✓ Ecological solution
<p>Couplers</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Balanced couplers (1 to 2, 1 to 3, 1 to 4) ✓ Unbalanced couplers (1/3-2/3; 1/5-4/5; 1/10-9/10) ✓ For all types of antenna combinations
<p>Antennas</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Donor antenna ✓ Wall mounted antennas indoor ✓ Ceil mounted antennas indoor
<p>Feeders</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Coaxial feeders ✓ Radiating cables

The manufacturer retains the right to modify its products – This document is not contractual. AIR Repeater™ is a trademark of SELECOM SA.

285 – AIR Repeater™ RF/RF 2G-3G-4G – ed13

Quality Model FP1004D / ed 27 / 07 / 2011